

## 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

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>Rahmendaten</b>	<b>7</b>
2.1	Technologie und Kostendaten	7
<b>3</b>	<b>Aufbau selbstlernende Controller Algorithmen</b>	<b>11</b>
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
<b>4</b>	<b>Aufbau der Modellszenarien für Potenzialstudie</b>	<b>32</b>
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
<b>5</b>	<b>Ergebnisse Einsatzszenarien und Potenzialanalysen</b>	<b>36</b>
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
<b>6</b>	<b>Koordination mit COMET und Weiterentwicklung Richtung TRL 6-753</b>	

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, CO<sub>2</sub> 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 Bioenergiotechnologien 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 CO<sub>2</sub> 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 Prosumer<sup>1</sup> 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 CO<sub>2</sub>-Emissionen und weitere Treibhausgase mittels CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-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.

---

<sup>1</sup> 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	Fixkosten	Variable Kosten	Lebensdauer	Wartungskosten
Ölheizung	8180 [€]	233 [€/kW <sub>th</sub> ]	25 [a]	0,36 [€/(kW <sub>th</sub> ·M)]
Gasheizung		658 [€/kW <sub>th</sub> ]	25 [a]	1,18 [€/(kW <sub>th</sub> ·M)]
Hackschnitzel	13821 [€]	270 [€/kW <sub>th</sub> ]	25 [a]	1,72 [€/(kW <sub>th</sub> ·M)]
Scheitholzheizung	11822 [€]	51 [€/kW <sub>th</sub> ]	25 [a]	1,29 [€/(kW <sub>th</sub> ·M)]
Pellets	12390 [€]	323 [€/kW <sub>th</sub> ]	25 [a]	1,26 [€/(kW <sub>th</sub> ·M)]
Luftwärmepumpe		4722 [€/kW <sub>th</sub> ]	15 [a]	2,55 [€/(kW <sub>th</sub> ·M)]
Solewärmepumpe		6498 [€/kW <sub>th</sub> ]	20 [a]	3,87 [€/(kW <sub>th</sub> ·M)]
Solarthermie		796 [€/kW <sub>th</sub> ]	20 [a]	n.A [€/(kW <sub>th</sub> ·M)]
Photovoltaik	2400 [€]	990 [€/kW <sub>p</sub> ]	25 [a]	n.A [€/(kW <sub>el</sub> ·M)]
Windkraft		8000 [€/kW <sub>e</sub> ]	25 [a]	6,67 [€/(kW <sub>el</sub> ·M)]
Zentralkühlung Raumkühlung		2730 [€/kW <sub>e</sub> ]	20 [a]	n.A [€/(kW <sub>el</sub> ·M)]
Zentralkühlung Kühlräume		2300 [€/kW <sub>e</sub> ]	20 [a]	n.A [€/(kW <sub>el</sub> ·M)]
Absorptionskälte- maschine Raumkühlung	71095 [€]	4425 [€/kW <sub>cool</sub> ]	20 [a]	1,08 [€/(kW <sub>cool</sub> ·M)]
Absorptionskälte- maschine Kühlräume	102110 [€]	3395 [€/kW <sub>cool</sub> ]	20 [a]	1,53 [€/(kW <sub>cool</sub> ·M)]
Wärmespeicher	520 [€]	22 [€/kW <sub>h<sub>th</sub></sub> ]	25 [a]	n.A [€/(kW <sub>h<sub>th</sub></sub> ·M)]
Kältespeicher	520 [€]	55 [€/kW <sub>h<sub>th</sub></sub> ]	25 [a]	n.A [€/(kW <sub>h<sub>th</sub></sub> ·M)]
Stromspeicher		500 [€/kW <sub>h<sub>el</sub></sub> ]	8 [a]	n.A [€/(kW <sub>h<sub>el</sub></sub> ·M)]
Flow Batterie Energy		400 [€/kW <sub>h<sub>el</sub></sub> ]	20 [a]	n.A [€/(kW <sub>h<sub>el</sub></sub> ·M)]
Flow Batterie Power		1250 [€/kW <sub>e</sub> ]	20 [a]	n.A [€/(kW <sub>el</sub> ·M)]
Elektrofahrzeug		150 [€/kW <sub>h<sub>el</sub></sub> ]	8 [a]	3,60 [€/(kW <sub>h<sub>el</sub></sub> ·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 CO<sub>2</sub>-Emission in kg/kW<sub>h<sub>el</sub></sub> auf nationaler Ebene erstellt. Abbildung 1 zeigt die prozentuelle Aufbringung der elektrischen Stromversorgung in Österreich für das Jahr 2016.

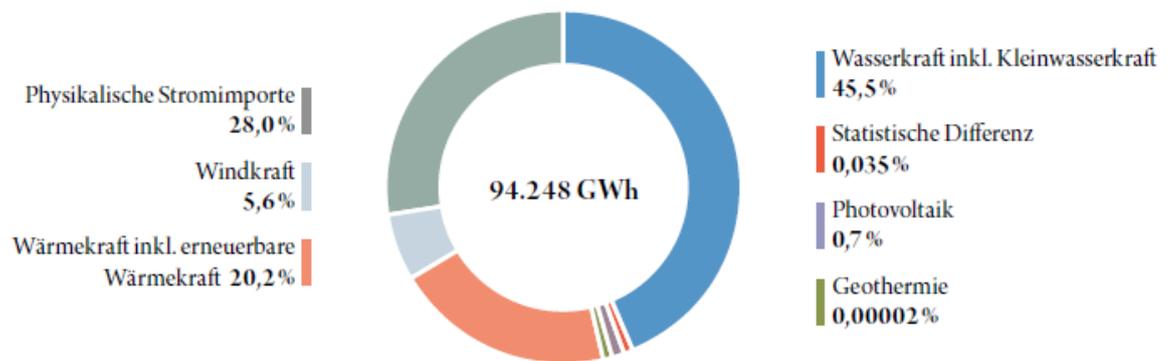


Abbildung 1: Struktur der Aufbringung von elektrischem Strom in Österreich, gesamte Versorgung im Jahr 2016 (BMNT, 2017)

Da Österreich seit 2000 mehr Stromimporte als -exporte aufweist, kann in der Analyse der CO<sub>2</sub>-Emissionswerte nicht nur der heimische Durchschnitt verwendet werden. Daher wurden die Stromimporte nach ihren Herkunftsländern und deren CO<sub>2</sub>-Belastung pro Kilowattstunde Strom kalkuliert.

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

Tabelle 2: Stromimporte Österreichs und deren CO<sub>2</sub>-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 <sub>2</sub> -Belastung [kg/kWh <sub>el</sub> ] <sup>2</sup>	0,471	0,149	0,229	0,178	0,206	0,670

<sup>2</sup> Literaturquellen für die durchschnittlichen CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionswerten können monatlich gemittelte CO<sub>2</sub>-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 CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Monat [kg/kWh<sub>el</sub>]

	Jahr	Jan	Feb	Mrz	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
CO <sub>2</sub> kg/kWh <sub>el</sub>	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:

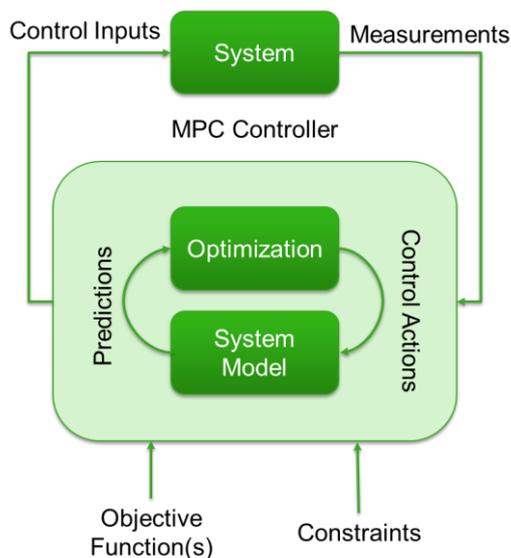


Abbildung 2: MPC Framework (BEST GmbH)

Bei jedem Zeitschritt, das können 5- 15 Min Schritte sein, berechnet der übergeordnete Systemregler die Regelungswert 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 CO<sub>2</sub>

Emissionen. Dies kann z.B. durch die Erhöhung der Eigennutzung von vor Ort produzierter Energie erfolgen. Zur Lösung des Optimierungsproblems wird der IBM Solver CPLEX eingesetzt.

Die aktuell entwickelte Version des übergeordneten Systemreglers wurde in unterschiedlichen Use Cases unter Laborbedingungen erfolgreich getestet (Details dazu siehe Kapitel 3). In der Konzeptionierung und im Aufbau des Systemreglers wurde darauf geachtet, dass eine Erweiterung hinsichtlich Technologien und Schnittstellen möglichst effizient erfolgen kann. Der aktuelle Entwicklungsstand umfasst unterschiedliche Erzeugungs- und Speichertechnologien (PV, Wärmepumpe, Heizstab, Batterien, Wärmespeicher, E-Ladeinfrastruktur, Biomassekessel).

### 3.1 Model Predictive Control (MPC)

Der im Rahmen dieser Forschungsarbeit entwickelte übergeordnete Systemregler, der SMG-Regler (Smart- und Microgrid Controller), ist verantwortlich für die Optimierung verschiedener, dezentral verteilter Energiere Ressourcen (Distributed Energy Resources, DERs) und deren koordinierten Echtzeitbetrieb innerhalb eines sektorgekoppelten, dezentralen Energiesystems, z.B. in Form eines Microgrids oder erneuerbarer Energiegemeinschaften.

Dabei basiert die Modellierung des SMG-Regler-Frameworks auf einer Modellprädiktiven Regelung, zumeist Model Predictive Control (MPC) genannt. Diese berechnet in jedem Zeitschritt (in unserem Fall 5 min) in Abhängigkeit von den Eingangssignalen die Regelungswerte durch das Lösen eines Optimierungsproblems für den gewählten Vorhersagehorizont (in unserem Fall 48h, der jedoch beliebig angepasst werden kann) und wendet dann die ersten Sollwerte der berechneten Steuersequenzen auf das Energiesystem an. Der Ausgang bzw. die optimalen Ausgangssignale des Optimierungsproblems basieren auf Prognosen und Echtzeitmessungen (Eingangssignale).

Beim nächsten Zeitschritt werden die aktualisierten Zustände und Messungen des Energiesystems vom Regler erfasst und der Optimierungsschritt in einem rollierenden Horizontmuster wiederholt, was als Rückkopplung aufgefasst werden kann und die MPC im Gegensatz zu Optimalsteuerungen zu einer Regelung macht. Dies erlaubt die Berücksichtigung von Störungen, erfordert aber auch eine erhebliche Rechenleistung.

Die mathematische Optimierung innerhalb des MPC-Reglers muss dabei die Energiebilanz des betrachteten Energiesystems mit den gegebenen Technologiegrößen in jedem 5-min Zeitschritt erfüllen, d.h. in jedem Zeitschritt muss das Angebot gleich der Nachfrage sein. Der SMG-Regler auf MPC-Basis versucht nun diese Energiebilanz für den betrachteten Vorhersagehorizont zu optimieren und je nach festgelegter Zielfunktion die gesamten Energiekosten oder CO<sub>2</sub> Emissionen im Betrieb zu minimieren. Weiters fließt in die Optimierungsrechnung auch eine Vielzahl von Rahmenbedingungen mit ein: Etwa operative Rahmenbedingungen wie Betriebsparameter oder Wirkungsgrade der modellierten Technologien, finanzielle

Rahmenbedingungen wie Stromtarife, Leistungspreise, Marktpreissignale, etc. oder auch regulatorische Rahmenbedingungen, wie z.B. eine potentielle CO<sub>2</sub>-Steuer.

Das SMG-Regler-Framework auf MPC-Basis ist in der folgenden Abbildung 3 schematisch dargestellt:

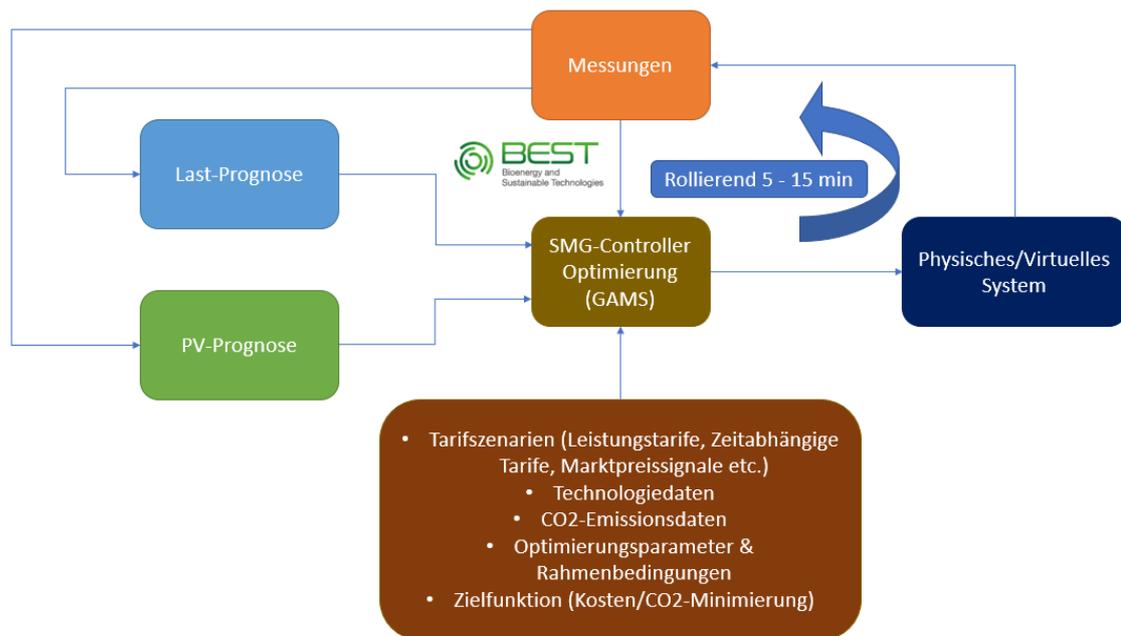


Abbildung 3: Schematische Darstellung des SMG-Regler-Frameworks auf MPC-Basis.

Dabei wurden diese Rahmenbedingungen und die entsprechenden Zielfunktionen mathematisch modelliert und als großes, lineares Gleichungssystem mit einer Vielzahl von gemischt ganzzahligen Entscheidungsvariablen beschrieben. Daher wird dieses Optimierungsproblem auch als gemischt ganzzahliges Optimierungsproblem bezeichnet (engl. Mixed Integer Linear Programming - MILP). Für die Modellierung wird die algebraische Modellierungssyntax GAMS verwendet, die prinzipiell plattformunabhängig ist und als kommerzielles Softwareprodukt vertrieben wird. Das lineare Gleichungssystem wird dann über das Simplex-Verfahren gelöst, was sich gegenüber anderen Verfahren bzw. Algorithmen wie dem Innere Punkte Verfahren bewährt hat. Das Simplex-Verfahren löst solche linearen Problemstellungen nach endlich vielen Schritten immer exakt oder stellt dessen Unlösbarkeit bzw. Unbeschränktheit fest. Hierfür wird der CPLEX Solver von IBM verwendet.

$$\begin{aligned}
 & \min_{x_1, \dots, x_n} c_0 + \sum_{i=1}^n c_i x_i && x_i \in \mathbb{Z}, && \text{for some } i = 1, \dots, n \\
 & && x_i \in \mathbb{R}, && \text{for the remaining } i = 1, \dots, n \\
 & \text{s.t. } \sum_{i=1}^n A_{j,i}^e x_i = b_j^e, && \forall j = 1, \dots, m_e \\
 & && \sum_{i=1}^n A_{j,i}^g x_i \geq b_j^g, && \forall j = 1, \dots, m_g \\
 & && \sum_{i=1}^n A_{j,i}^l x_i \leq b_j^l, && \forall j = 1, \dots, m_l.
 \end{aligned}$$

### 3.2 System Architektur

Die aktuelle Systemarchitektur des übergeordneten Systemreglers ist in der nachfolgenden Abbildung 4 dargestellt. Dabei wurden die Regelungsalgorithmen zum Testen in unterschiedliche Testsysteme eingebunden und Versuche durchgeführt bzw. analysiert. Dafür wurden einerseits die Betriebsstrategien, welche der übergeordnete Systemregler vorgibt, mit herkömmlichen Standardregelungen verglichen und evaluiert, andererseits wurde durch das unterschiedliche Setting der Testszenerien die Anpassungsfähigkeit überprüft.

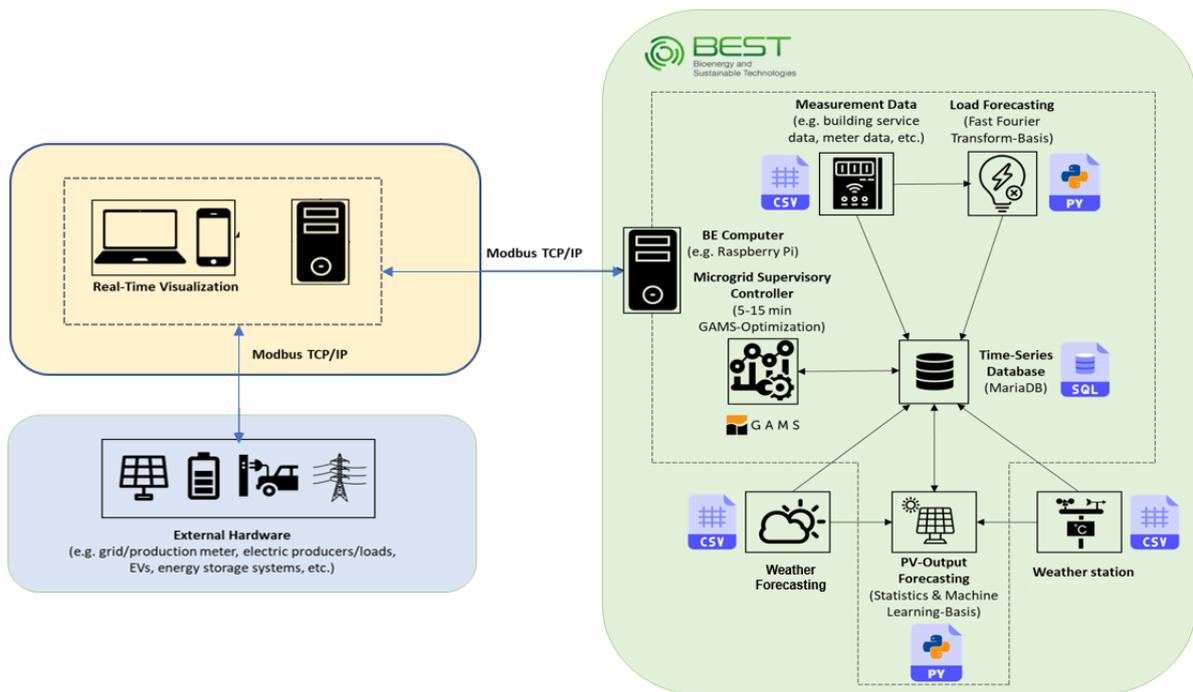


Abbildung 4: Systemarchitektur des übergeordneten Systemreglers

Die entwickelten Komponenten bestehen hauptsächlich aus den Python- und GAMS-basierten Programmiermodulen. Diese Programmiermodule interagieren mit den verschiedenen Gebäudesensoren, Gebäude- und Energiemanagement-Systemen und Erzeugungsanlagen, um

die Echtzeit-Messdaten zu erfassen, wie z. B. Daten in Bezug auf die Haustechnik und Versorgungszähler sowie mit externen Wettervorhersagen bzw. - wenn vorhanden - Echtzeit-Wetterdaten einer Wetterstation. Auch die Integration von Schnittstellen zu Energiemarktdaten wurde implementiert, was ein Reagieren auf Marktpreissignale ermöglicht.

Für die Last- und PV-Prognose wurden spezielle auf AI-basierende Forecasting Algorithmen entwickelt, die sowohl aktuelle als auch historische Daten verwenden, um die nächsten 48-Stunden-basierten Last- und Solar-PV-Prognosen vorherzusagen. Die aktuellen und historischen Messdaten sowie die Prognosedaten werden dann in der Zeitreihen-Datenbank gespeichert, die auf der MySQL MariaDB basiert. Das Optimierungsmodul greift auf diese Daten zu, führt die Optimierung in 5-Minuten- bis 15-Minuten-Zeitschritten durch und generiert die übergeordneten Steuerungs-Sollwerte. Diese Sollwerte werden dann über ein geeignetes Kommunikationsprotokoll vom Systemrechner der BEST GmbH an ein Energiemanagementsystem oder direkt an die Technologien übergeben.

### 3.3 Integration/ Schnittstellen

Um die Erfassung und Speicherung aller relevanter Energiedaten zu ermöglichen, wird in erster Instanz ein Netzwerkplan für die Mess-, Regelungs- und Kommunikationsinfrastruktur innerhalb des betrachteten Energiesystems erstellt und realisiert. Dabei werden sämtliche Energietechnologien (wie z.B. PV, Batterie-Wechselrichter, E-Ladestationen, Wärmepumpen, Pufferspeicher), Zähler, Sensoren, externe Dienste (z.B. ZAMG-Wetterdienst, Solcast-Solarprognosedienste, aWATTar-Strommarktpreise) und deren Kommunikationsschnittstellen in das entsprechende IT-Netzwerk des dezentralen Energiesystems bzw. in das BEST-interne Monitoringsystem integriert. Die Kommunikation mit der Mess- und Regelungsinfrastruktur bzw. mit den jeweiligen Energietechnologien und der darauf aufbauende Datenaustausch erfolgt dabei über unterschiedliche Schnittstellen bzw. Kommunikationsprotokolle, wobei die Daten in den bisherigen Forschungsarbeiten primär über die Kommunikationsschnittstellen Modbus TCP, M-Bus, REST/JSON und FTP/CSV ausgelesen werden. Dementsprechend wird auf diese Kommunikationsschnittstellen im Folgenden näher eingegangen:

#### 3.3.1 Modbus TCP/IP

Grundsätzlich handelt es sich bei Modbus TCP/IP um ein serielles Kommunikationsprotokoll, das prinzipiell für die Übertragung von Informationen bzw. Daten über serielle Leitungen zwischen elektronischen Geräten verwendet wird und auf einer Client/Server-Architektur basiert. Diese wird auch typischerweise als Master/Slave-Architektur bezeichnet.

Es ist zudem ein offenes Protokoll, d. h., dass Hersteller das Protokoll kostenlos in ihre Geräte einbauen können, womit es sich quasi zu einem De-facto Standard entwickelt hat. In der Industrie wird es daher als Standard-Kommunikationsprotokoll eingesetzt und ist heute das am weitesten verbreitete Protokoll zur Verbindung von industriellen Geräten und zum Datenaustausch.

Für die Datenübertragung wird hauptsächlich das Modbus TCP/IP Format verwendet. Dabei handelt es sich um eine normierte Variante des Modbus-Protokolls für die Kommunikation mit Geräten über das physikalische Netzwerk (Ethernet) und wird z.B. bei der Überwachung und Steuerung von Automatisierungsgeräten verwendet.

Zusammenfassend kann man sagen, dass Modbus durch die Kombination eines universellen Netzwerkstandards (also TCP/IP) und der herstellerunabhängigen, de-facto standardisierten Datendarstellung einen wirklich offenen und zugänglichen Kommunikationsweg für den Austausch von Energiedaten darstellt.

Eine typische Modbus-TCP-Kommunikation über Ethernet mit Modbus-Master- und Slave-Servern ist in der folgenden Abbildung 5 dargestellt.

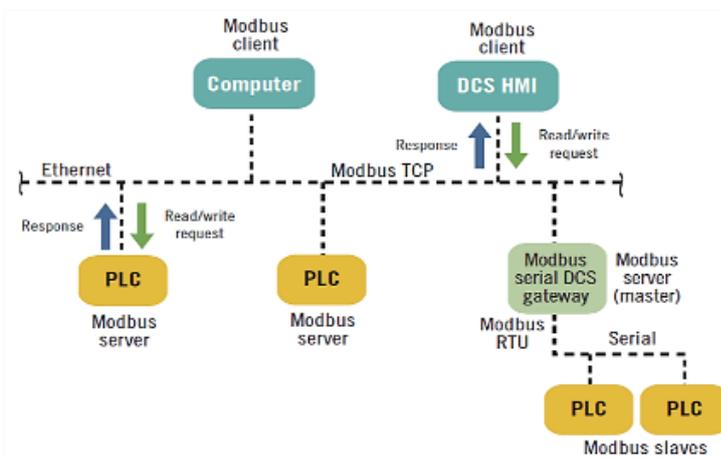


Abbildung 5: Eine typische Modbus-TCP-Kommunikation über Ethernet<sup>3</sup>

### 3.3.2 M-Bus

M-Bus "Meter-Bus" ist ein europäischer Standard, der hauptsächlich für den ein- oder zweiseitigen Datenaustausch mit Versorgungszählern (Wasser, Gas oder Strom) verwendet wird. M-Bus wird typischerweise für Zähleranwendungen wie etwa Wärmemengenzähler verwendet.

Er kann auch für verschiedene Sensoren (z.B. Temperatursensoren) und andere Aktoren verwendet werden. Ein entscheidender Vorteil bei diesem Protokoll ist, dass viele Slaves (z.B. Messgeräte oder Sensoren) an einem Bus (Segment) betrieben werden können und man so die entsprechenden Daten gleichzeitig auslesen kann. Die Datenübertragung ist dadurch allerdings im Vergleich zu anderen Protokollen wie etwa Modbus TCP langsamer und daher für die Prozesssteuerung eher ungeeignet. Das Protokoll ist außerdem durch die Normungsgruppe CEN TC 294, "Kommunikationssysteme für Zähler und Fernauslesung von Zählern" in der EN 13757 Reihe genormt, womit es einen Kommunikationsstandard darstellt.

<sup>3</sup> Controlglobal; <https://www.controlglobal.com/articles/2019/introduction-to-modbus/>

Ein typisches Diagramm eines M-Bus-basierten Kommunikationsnetzwerks ist in der folgenden Abbildung 6 dargestellt.

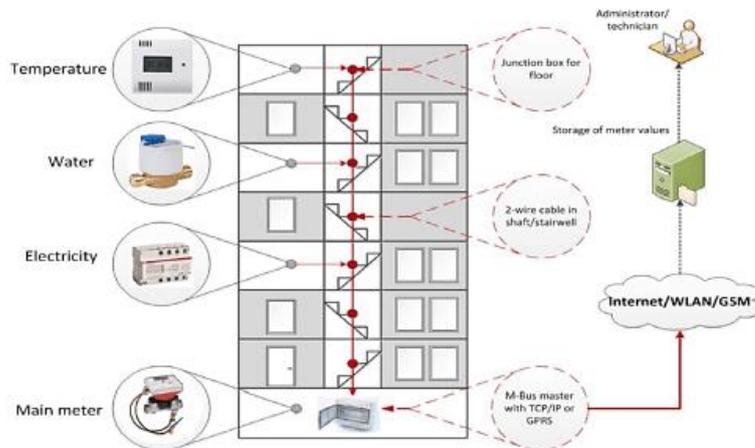


Abbildung 6: Typisches Diagramm eines M-Bus-basierten Kommunikationsnetzwerks<sup>4</sup>

### 3.3.3 Representational State Transfer (REST)

Representational State Transfer (REST) ist ein Software-Architekturstil, der eine Teilmenge von HTTP (Internetprotokoll) verwendet und schwerpunktmäßig oft in der automatisierten Maschine-zu-Maschine Kommunikation eingesetzt wird. Die REST-Architektur beschreibt quasi, wie verteilte Systeme miteinander über das Internet kommunizieren können und wird häufig für interaktive Anwendungen verwendet, die sogenannte Webdienste oder Webservices nutzen.

Die Kommunikation erfolgt hier über sogenannte Webservice-Programmierschnittstellen (auch APIs genannt), die sich an die REST-Architekturvorgaben halten. Diese werden auch oft einfach als RESTful APIs bezeichnet.

Wenn also eine Client-Anforderung über eine RESTful-API gestellt wird (sprich das BEST-interne Monitoringsystem etwa gewisse Daten abfragen will) wird eine definierte Darstellung des momentanen Zustands des Endgeräts (das kann z.B. der Zählerwert eines Energiezählers sein) an den Anforderer übertragen. Diese Informationen bzw. Darstellung wird in einem bestimmten Format über HTTP geliefert. Meist erfolgt dies über das JSON (Javascript Object Notation), HTML oder XML Format. JSON ist hier jedoch die am häufigsten verwendete Programmiersprache, da sie programmiersprachunabhängig ist und sowohl von Menschen als auch von Maschinen leicht gelesen werden kann.

Ein typisches REST-API-Kommunikationsdiagramm über JSON/XML/HTML ist in der folgenden Abbildung 7 dargestellt.

<sup>4</sup> Engineering-update; <https://engineering-update.co.uk/2020/12/14/what-is-difference-between-m-bus-and-modbus-communication-outputs/>

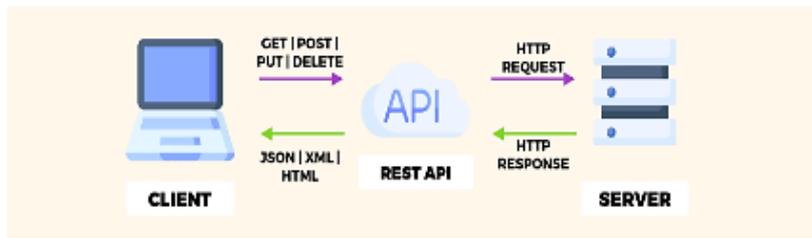


Abbildung 7: Schematische Darstellung einer REST API Kommunikation<sup>5</sup>

### 3.3.4 FTP/CSV

Mit dem File Transfer Protocol (FTP) können Benutzer ganze Dateien von einem Gerät auf ein anderes Gerät übertragen, indem die Dateien von der FTP-Client Seite aus auf einem FTP-Server hochgeladen werden, wo diese dann für andere Clients zugänglich gemacht werden. Zu den Dateitypen können Programmdateien unter anderem (z.B. CSV-Dateien, in denen Energiedaten gespeichert werden), Multimediadateien, Textdateien oder Dokumente gehören.

Prinzipiell ist das FTP ein Standard-Internetprotokoll zur Übertragung von Dateien zwischen Computern im Internet über TCP/IP-Verbindungen. Der Rechner des Endanwenders wird in der Regel als lokaler Host-Rechner bezeichnet, der über das Internet mit dem Remote-Host verbunden ist. Dies ist dann der zweite Rechner, auf dem die FTP-Software läuft und von welchem aus die Dateien ausgelesen werden können.

Eine typische FTP-Kommunikation ist in der folgenden Abbildung 8 dargestellt.

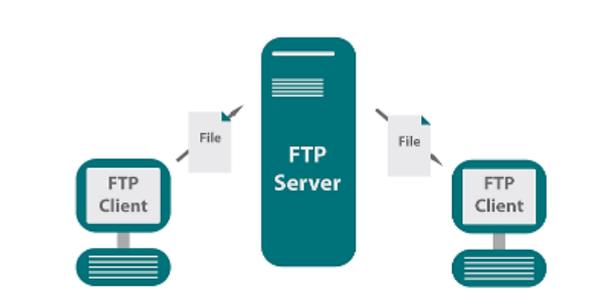


Abbildung 8: Schematische Funktionsweise der FTP-Kommunikation<sup>6</sup>

Für die Datenauslesung wurden Python-basierte Module bzw. Services erstellt und so ein BEST-internes Monitoringsystem realisiert, welches die Daten in einem Zeitintervall von 30s (bzw. 1h bei externen Datenbereitstellungsdiensten wie Wetterdiensten oder Marktpreisdiensten) automatisiert ausliest und in die interne MySQL-Datenbanken speichert. Diese Datenbanken sind

<sup>5</sup> Dev Community; <https://dev.to/duomly/rest-api-vs-graphql-comparison-3j6g>

<sup>6</sup> Progress - Ipswitch: <https://www.ipswitch.com/de/blog>

aus sicherheitstechnischen Gründen prinzipiell nur über das lokale Energiesystem IT-Netzwerk erreichbar.

### 3.4 Forecasting

Zur Umsetzung der adaptiven Systemregelung ist es von hoher Bedeutung, Prognosen über die Entwicklung von Last- und Erzeugungsprofilen für die nächsten 24h bis 48h zu generieren. Das Prognosemodul ist ein integraler Bestandteil des MPC Reglers, da genaue und zeitnahe Prognosen aller Leistungsflüsse als Parameter für die Optimierung erforderlich sind. Vor jedem Optimierungslauf werden neue Prognosen erstellt, die auf den neuesten Informationen aus dem System sowie auf Aktualisierungen der exogenen Variablen (z. B. Globalstrahlung für Photovoltaik) basieren.

Dabei wurden unterschiedliche Ansätze entwickelt und in unterschiedlichen Use Cases auf deren Genauigkeit und Anpassungsfähigkeit getestet.

#### 3.4.1 Fast Fourier Transformation (FFT)

Der anfängliche Ansatz, der in diesem Bereich verfolgt wurde, ist die Fast Fourier Transformation (FFT) zur Vorhersage von Lasten. Dabei werden historische Lastdaten mittels FFT analysiert und mittels inverser Fourier Transformation Vorhersagen über die Entwicklung der Last abgeleitet.

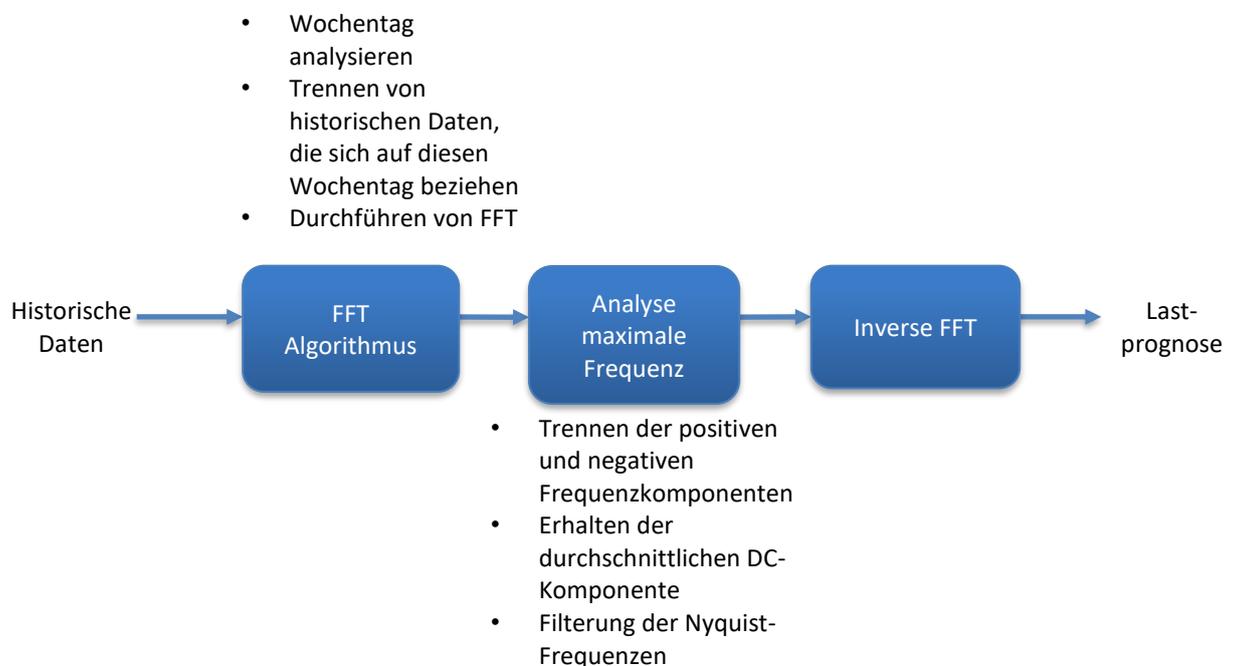


Abbildung 9: FFT-Prozess

Neben der FFT werden auch Methoden wie Auto Regressive Integrated Moving Average (ARIMA) eingesetzt und hinsichtlich deren Performance und Genauigkeit getestet und mit der FFT Methode verglichen.

Zur Bewertung der Genauigkeit der entwickelten Prognosealgorithmen wurden zwei wesentliche Messgrößen, nämlich der normalisierte mittlere quadratische Fehler (nRMSE) und der mittlere absolute prozentuale Fehler (MAPE) verwendet.

$$nRMSE = \frac{1}{P_{max} - P_{min}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$$

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i}$$

where:

- $n$  = number of non-missing data points
- $y_i$  = real observations of timeseries
- $\hat{y}_i$  = estimated values of timeseries to
- $P_{max}$  = maximum power value of the training data
- $P_{min}$  = minimum power value of the training data

Abbildung 10: Im Retrain-Zyklus verwendete Metriken zur Vorhersagegenauigkeit

Load Forecast Accuracy  
 FFT-RMSE = 8.77 kW  
 ARIMA-RMSE = 4.61 kW

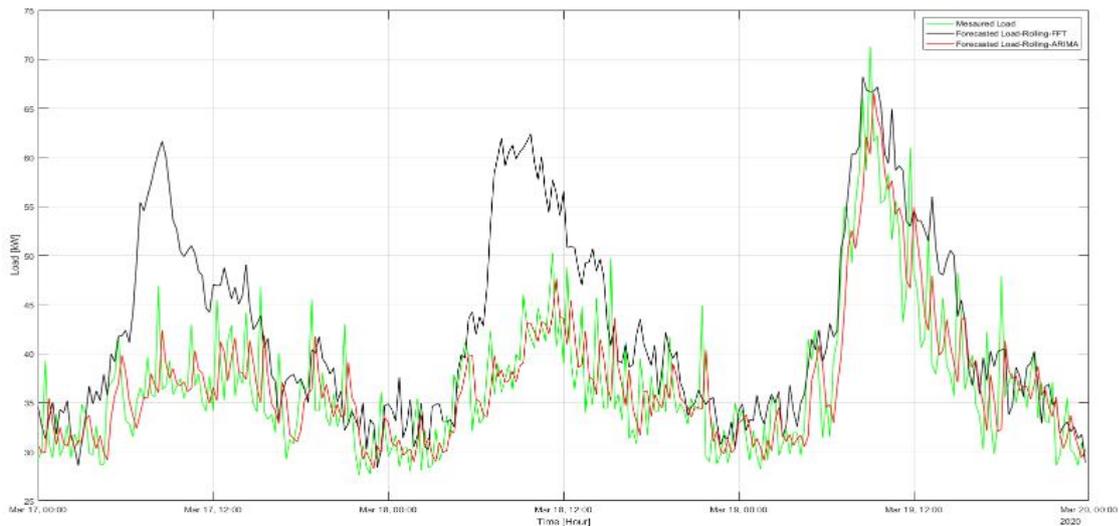


Abbildung 11: Vergleich Lastprognosemethoden

Dabei ist in  
Abbildung 11 ersichtlich, dass die Methode der FFT für sehr schwankende Lasten oder sich nicht  
regelmäßig wiederholende Muster nur bedingt anwendbar ist.

### 3.4.2 Selbstlernende maschinelle Prognosealgorithmen

Aufbauend auf den Entwicklungen wurde ein Prognosemodul entwickelt, welches selbstlernende maschinelle Prognosealgorithmen umfasst, die in eine proprietäre hybride Prognosemethode eingebettet sind, um so höchste Prognosegenauigkeit zu erzielen. Wie in Abbildung 12 auf der nachfolgenden Seite zu sehen ist, verfügt das Prognosemodul über drei Betriebsmodi, nämlich *i) Training*, *ii) Laufzeit* und *iii) Neu-Training*. Bei der Initialisierung *trainiert* das Prognosemodul alle Prognosemodelle auf Grundlage der verfügbaren historischen Daten. Im Echtzeitbetrieb des übergeordneten Systemreglers werden Vorhersagen auf rollierender Basis erstellt, wobei die neuesten Mess- und Wettervorhersagedaten (NWP) über die Schnittstelle des adaptiven Systemreglers bereitgestellt werden.

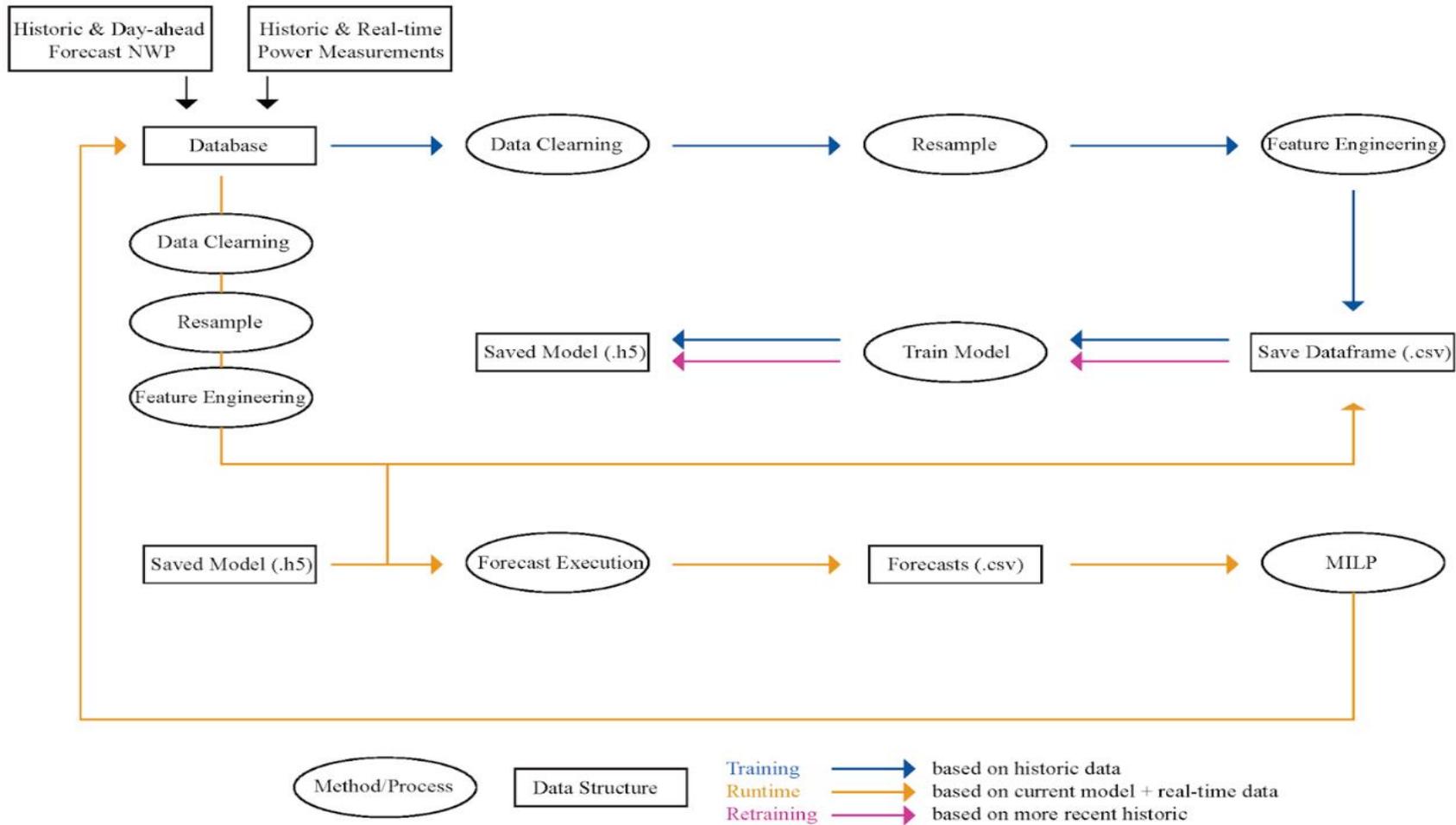


Abbildung 12: Prognosemodul: Datenflussdiagramm

Wenn die Genauigkeit der Vorhersagen über einen längeren Zeitraum unter einen vordefinierten Schwellenwert fällt oder sich Rahmenbedingungen ändern (z.B. neue Mitglieder einer Energiegemeinschaft beitreten oder diese verlassen, Installation von neuen Technologien oder Erweiterung von Technologien), *trainiert* das Prognosemodul seine Modelle automatisch *neu*, um die neuesten historischen Daten einzubeziehen, die bei jedem Optimierungsschritt kontinuierlich zum historischen Datensatz hinzugefügt wurden.

Innerhalb des Prognosemoduls verdienen mehrere Komponenten eine nähere Erläuterung, da sie hauptsächlich für die, auf maschinellem Lernen basierenden Prognosen verantwortlich sind. Abbildung 13 zeigt diese Komponenten, die im Sinne von Abbildung 12 in den Funktionen "train model" und "forecast execution" zusammengefasst sind. Genauer gesagt sind diese Komponenten für die Erstellung eines Programmes verantwortlich, welches beim Aufrufen Energiewerte für mehrere Zeitschritte vorhersagt.

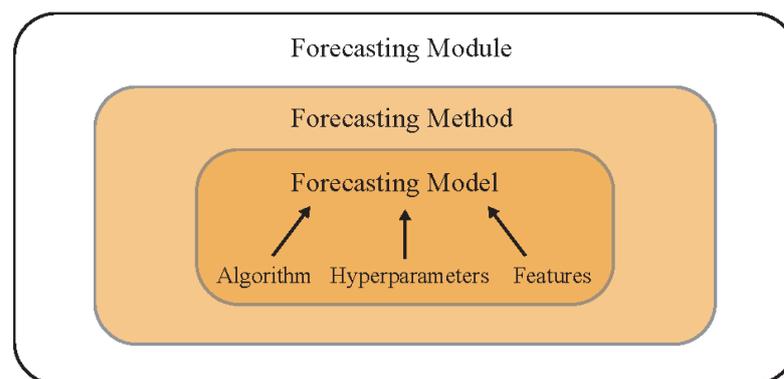


Abbildung 13: Komponenten des Prognosemoduls

Die entwickelte Prognosemethode ist eine mehrstufige Vorausberechnung. Dies ist notwendig, weil das Optimierungsprogramm einen Prognosewert für jeden Leistungsfluss und jeden Zeitschritt des Horizonts benötigt.

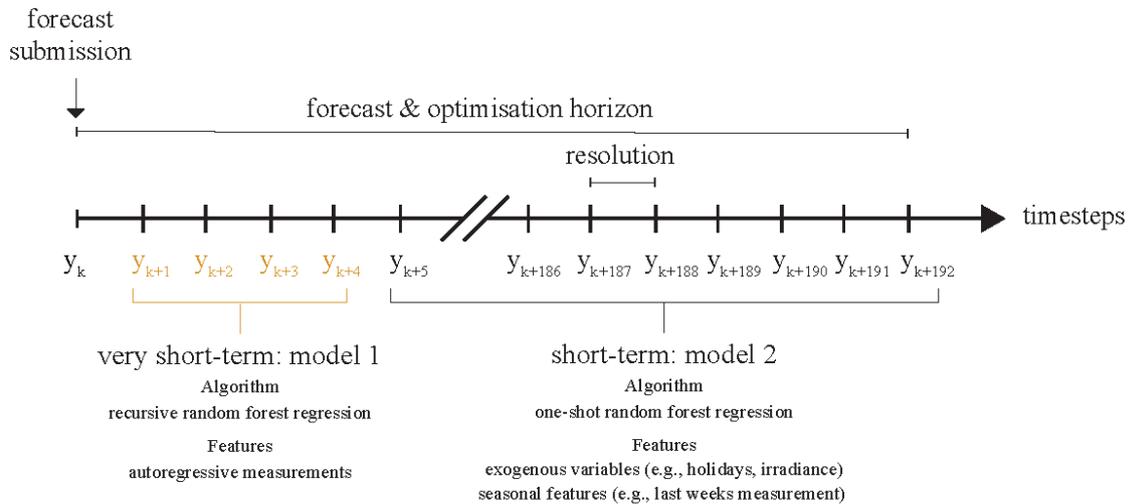


Abbildung 14: Prognosemethode

Wie in Abbildung 14 dargestellt, deckt sich der Optimierungshorizont von 192 Zeitschritten (mit einer Auflösung von 15 Minuten, was in Summe 48 Stunden entspricht) mit dem Prognosehorizont. Die entwickelte Methode für die mehrstufige Vorhersage ist eine hybride Methode, die den Vorhersagehorizont in zwei Teile aufteilt (sehr kurzfristig = eine Stunde im Voraus und kurzfristig = 48 Stunden im Voraus). Es ist zu beachten, dass der Umschaltzeitpunkt zwischen den Modellen nicht festgelegt ist. Dieser wurde systematisch durch Kreuzvalidierung bestimmt (siehe nächster Abschnitt). Durch die Kombination einer rekursiven Regression auf aktuelle (autoregressive) Messungen im sehr kurzfristigen Bereich mit einer Regression auf exogene Merkmale im kurzfristigen Bereich besteht diese Methode aus zwei Modellen (siehe nächster Abschnitt). Die Ergebnisse der einzelnen Modelle werden dann miteinander verknüpft, um die vollständige Prognosezeitreihe zu erhalten. Der Grund für die Wahl dieser Methode ist die Tatsache, dass verzögerte Messungen nur bei sehr kurzen Vorlaufzeiten (einige Stunden im Voraus = sehr kurzfristig) nützlich sind, die Genauigkeit jedoch abnimmt, wenn man versucht längere Vorlaufzeiten (Tage im Voraus = kurzfristig) vorherzusagen. Wie aus Abbildung 14 hervorgeht, schließt Modell 2, welches für den zweiten Teil des Horizonts (kurzfristig) verwendet wird, autoregressive Merkmale ("Lag-Variablen") aus. Aus dieser Kombination der Methoden ergeben sich zwei wesentliche Vorteile:

- hohe Genauigkeit für volatiles Zeitreihenverhalten in den ersten Zeitschritten (sehr kurzfristig), mit einer zuverlässigen Trendvorhersage für den Rest (kurzfristig)
- geringer Rechenaufwand für Training und Ausführung, da nur zwei Modelle trainiert werden (nicht ein Modell pro Durchlaufzeit wie bei MIMO-Methoden, z. B. MultiOutputRegressor von Scikit-learn)

Das Prognosemodul und die Methode sind unabhängig von dem/den verwendeten Prognosemodell(en). Im Rahmen des maschinellen Lernens definieren wir das *Prognosemodell* als einen Algorithmus mit bestimmten Hyperparametern, der Parameter aus Trainingsdaten (historischen Daten) gelernt hat. Die Auswahl von Algorithmus, Hyperparametern und Trainingsdaten (Merkmalen) ist ein iterativer Prozess. Bei jeder Iteration wurde eine *Walk-Forward-Kreuzvalidierung* verwendet, die eine gängige Praxis bei der Entwicklung von Modellen für Zeitreihen ist.

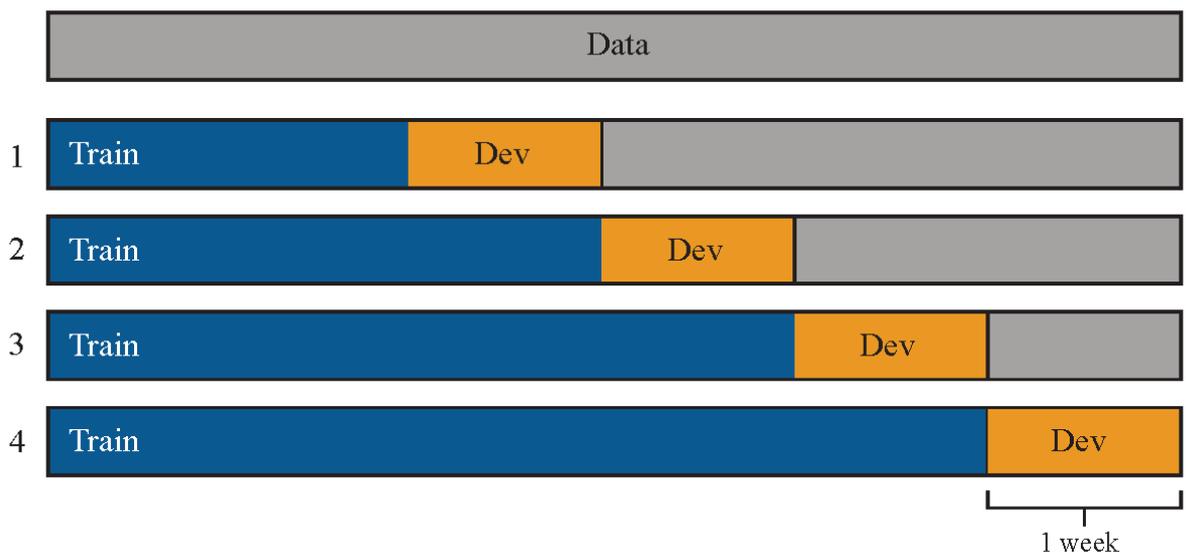


Abbildung 15: Walk-Forward Cross-Validation

Genauigkeitsbewertungen und Rechengeschwindigkeiten wurden durch die Walk-Forward-Kreuzvalidierung (siehe oben) für alle Kombinationen von Merkmalen und Algorithmen (und variierenden Hyperparametern) berechnet, um das am besten geeignete Modell für die im obigen Abschnitt beschriebene Prognosemethode zu finden und den optimalen Umschaltzeitpunkt von Modell 1 und Modell 2 zu ermitteln.

Die folgenden Ergebnisse stammen aus einer Fallstudie über eine Energiegemeinschaft mit 9 Teilnehmern in Kärnten.

Tabelle 4 zeigt, dass die verschiedenen Algorithmen in Bezug auf die Genauigkeit sehr unterschiedliche Ergebnisse liefern.

Tabelle 4: Vorhersageergebnisse nach Algorithmus

Accuracy	Model_type	Lags: 48_LinearRegression()	Lags: 48_SVR()	Lags: 48_RandomForestRegressor()	Lags: 48_XGBRegressor()
RMSE	Lag	0.08127761959391513	0.08723017300547481	0.07185827218487638	0.06895084155868052
RMSE	Trend	0.07689640272878959	0.07210420186624587	0.07397114807796724	0.07233524248631898
MAE	Lag	0.0066284389862570825	0.007677363594216367	0.005181877614521252	0.004766766512065138
MAE	Trend	0.005913140763211334	0.005199115497646065	0.005471767352726936	0.005232417661927185

Durch den im obigen Abschnitt beschriebenen Prozess haben sich RandomForest und XGBoost in Bezug auf die Genauigkeit mit einem normalisierten RMSE von ~7 % durchgesetzt. Dies wird deutlich, wenn man die Genauigkeit über die Vorlaufzeit in Abbildung 16 aufträgt.

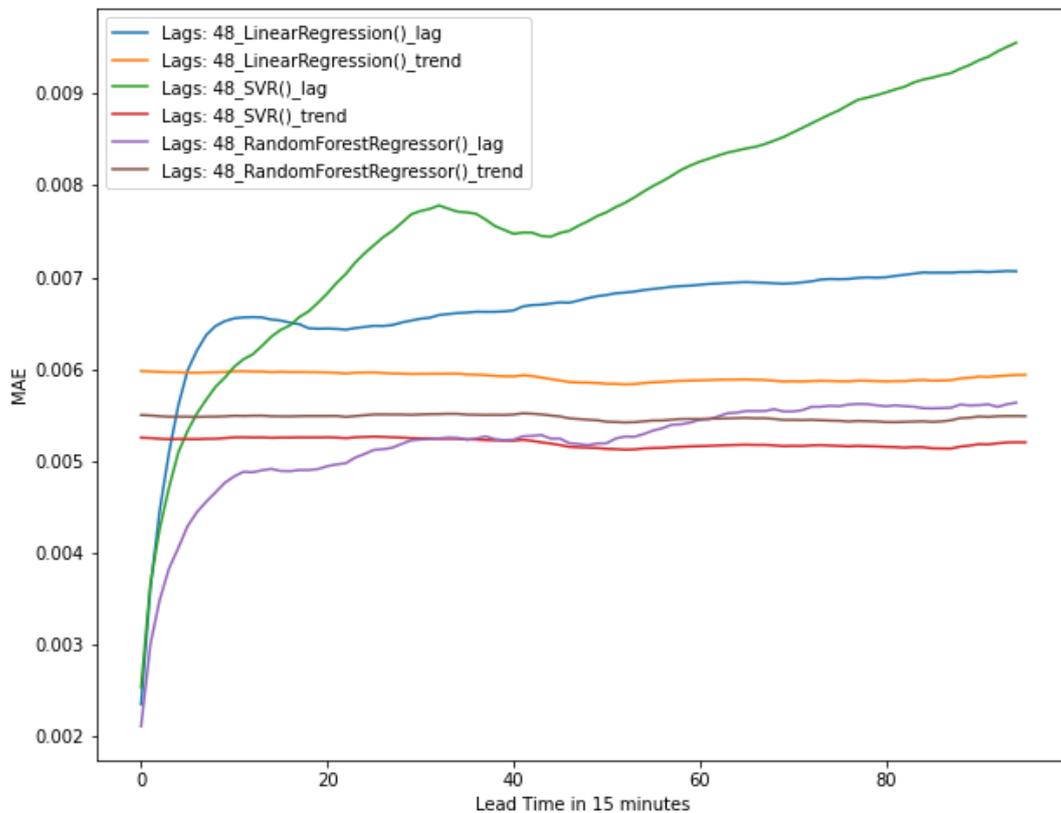


Abbildung 16: Vergleich der Algorithmen

Nach der Auswahl des Algorithmus wurden die optimale Merkmalsauswahl und der optimale Schwellenwert bestimmt, wie in Abbildung 17 dargestellt.

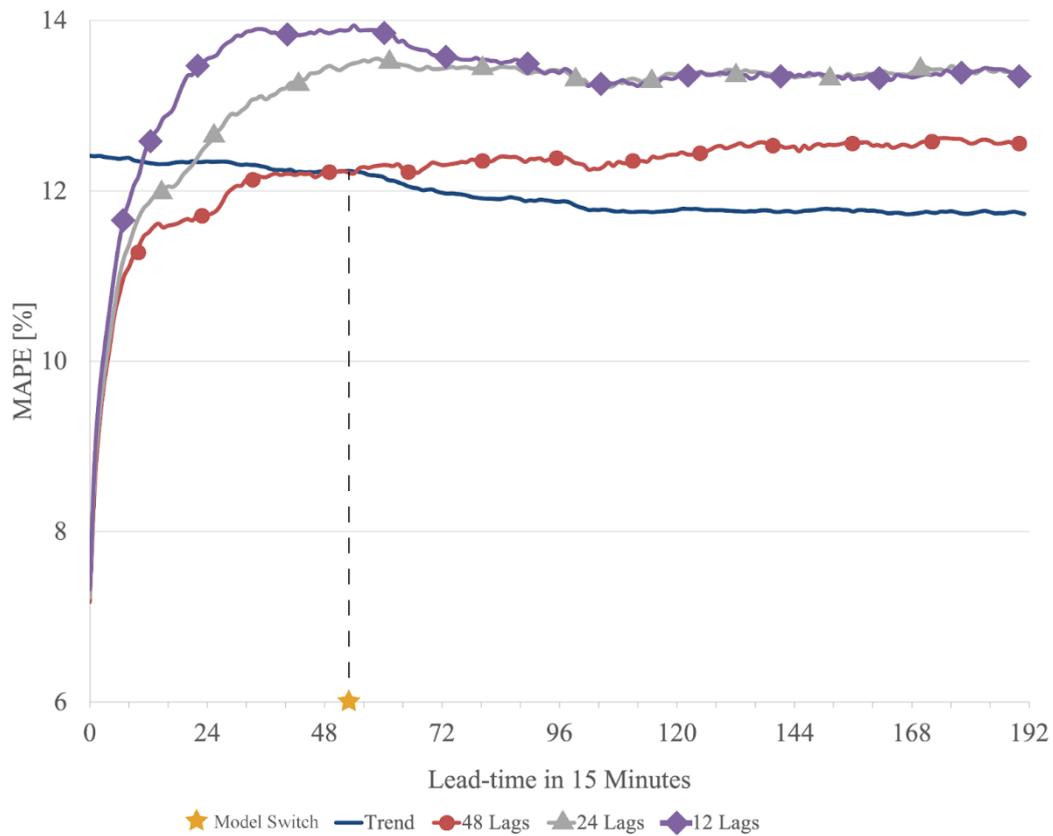


Abbildung 17: Optimaler Umschaltzeitpunkt zwischen Modell 1 und 2

Die Genauigkeit der verschiedenen Modelle mit unterschiedlichen Verzögerungen ist in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Vorhersageergebnisse nach Merkmalen

Accuracy	Model_type	Lags: 12_RandomForestRegressor()	Lags: 24_RandomForestRegressor()	Lags: 48_RandomForestRegressor()
RMSE	Lag	0.06272658721438858	0.06247740391049004	0.060890116330269174
RMSE	Trend	0.06051557541119012	0.06069744061840118	0.06065879008946773
MAPE	Lag	13.30106195801514	13.083572223067913	12.197856543647779
MAPE	Trend	11.92961206625917	12.00855744925836	11.970311797723248

Abbildung 18 zeigt einen direkten Vergleich von Modell 1 und Modell 2. Es wird deutlich, dass Modell 1 in den ersten Stunden viel stärker an den Messwerten "klebt", während Modell 2 später besser abschneidet.

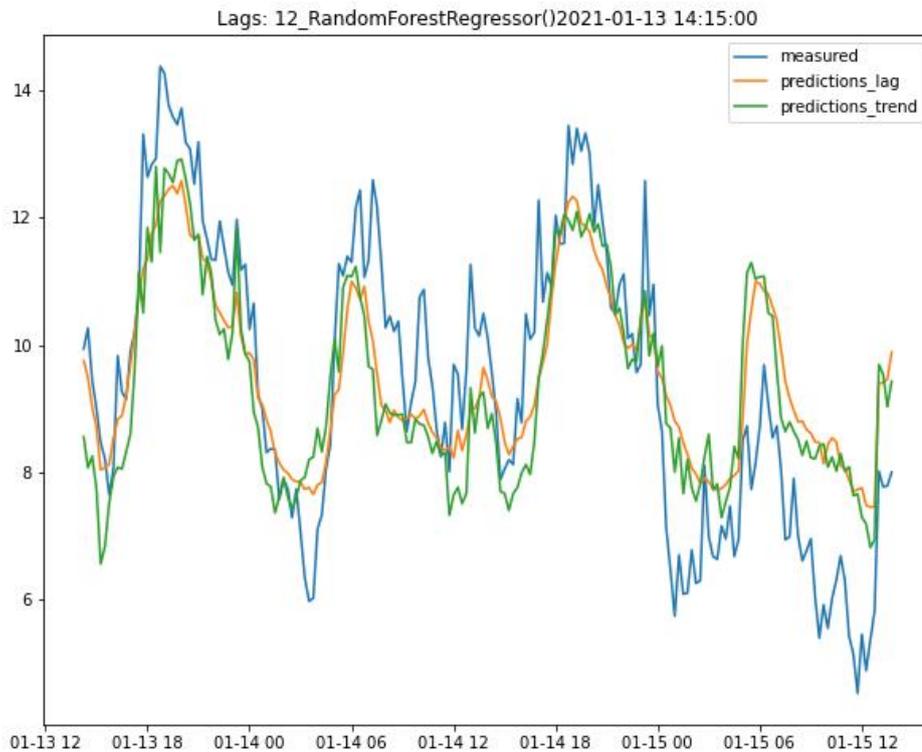


Abbildung 18: 48h-Ahead-Prognose der elektrischen Last, Modell 1 gegenüber Modell 2

Zu beachten ist, dass die oben genannten Ergebnisse Teil eines Arbeitspapiers sind, das im Frühsommer 2022 eingereicht wird: *Optimal Operation Dispatch Control of Multi-Energy System Microgrid*.

### 3.5 Visualisierung

Die für die Berechnung der Prognosen und die Erstellung des optimierten Einsatzplanes notwendigen Messdaten werden in MySQL-Datenbanken erfasst. Zur Visualisierung der Messwerte in einer übersichtlichen und interaktiven Form wurde die plattformunabhängige Open-Source-Anwendung „Grafana“ herangezogen. Diese ermöglicht es, alle relevanten Daten grafisch in einem Dashboard darzustellen und über einen Web-Browser aufzurufen .

So wurden etwa die erfassten Daten der verschiedenen Technologien am Forschungslabor Microgrid Lab in Wieselburg über verschiedene Anzeigeformen (Diagramme, Tabellen, einzelne Werte, etc.) visualisiert. Außerdem sind die Daten nach dem entsprechenden Energiesektor (Strom, Wärme, Kälte) bzw. Datentyp (Wetterdaten, Prognosedaten) kategorisiert und so zu unterschiedlichen Dashboards zusammengefügt, was in den nachfolgenden Abbildungen beispielhaft zu sehen ist. Die Darstellungen auf den Grafana-Dashboards werden zudem alle 30

Sekunden aktualisiert, so dass die gespeicherten Werte in der Datenbank laufend aktualisiert und angezeigt werden.

**Strom:**

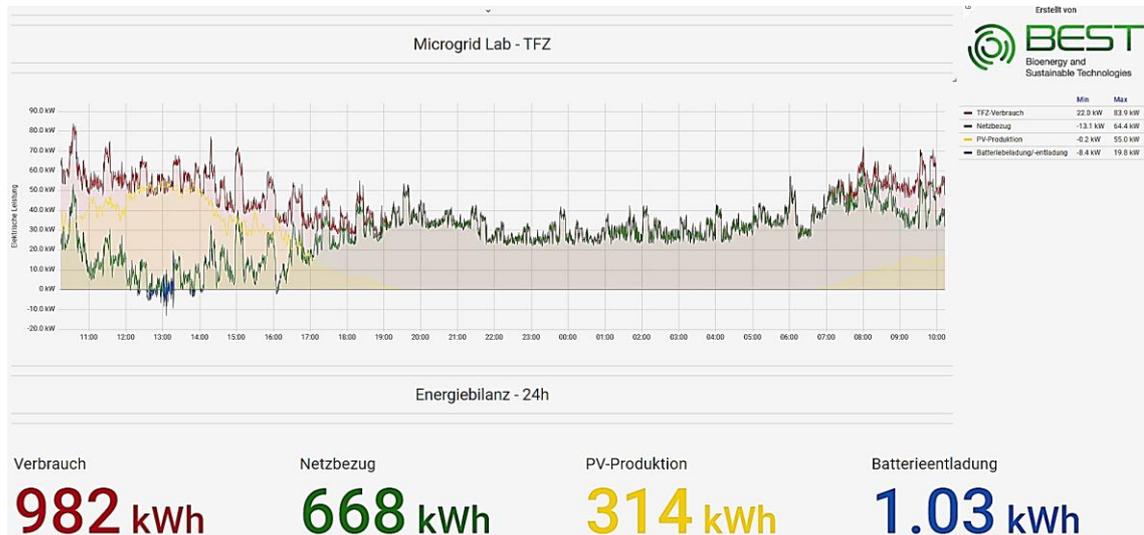


Abbildung 19: Darstellung der erfassten, elektrischen Energiemonitoringdaten. Die blaue Linie entspricht der Lade-/Entladeleistung der Batterie, die gelbe Linie der PV Leistung, die grüne Linie entspricht dem Netzbezug bzw. der Netzeinspeisung und die rote Linie dem Stromverbrauch

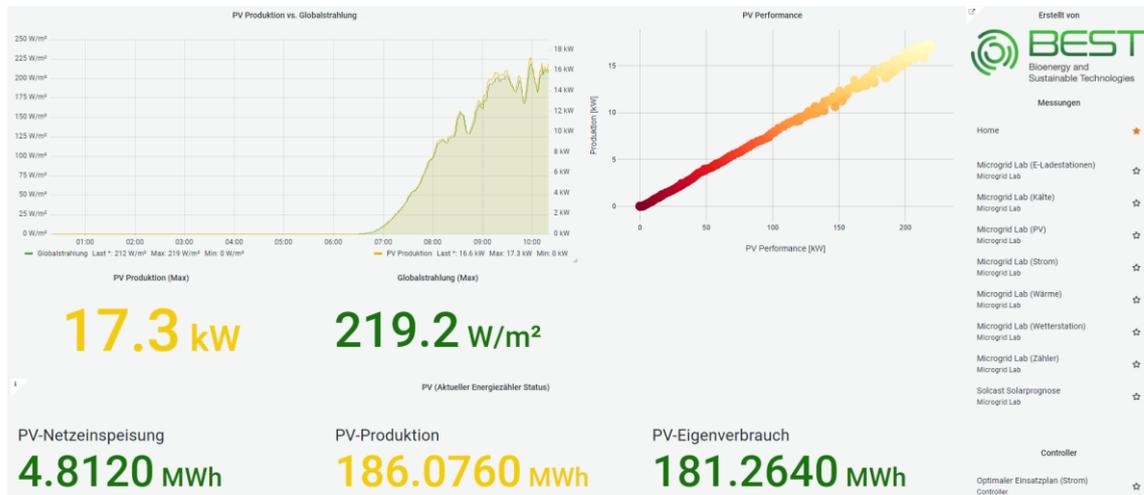


Abbildung 20: Darstellung der PV Leistung (gelb), der gemessenen Globalstrahlung (grün) und der PV Performance Ratio (rechte Abbildung oben).

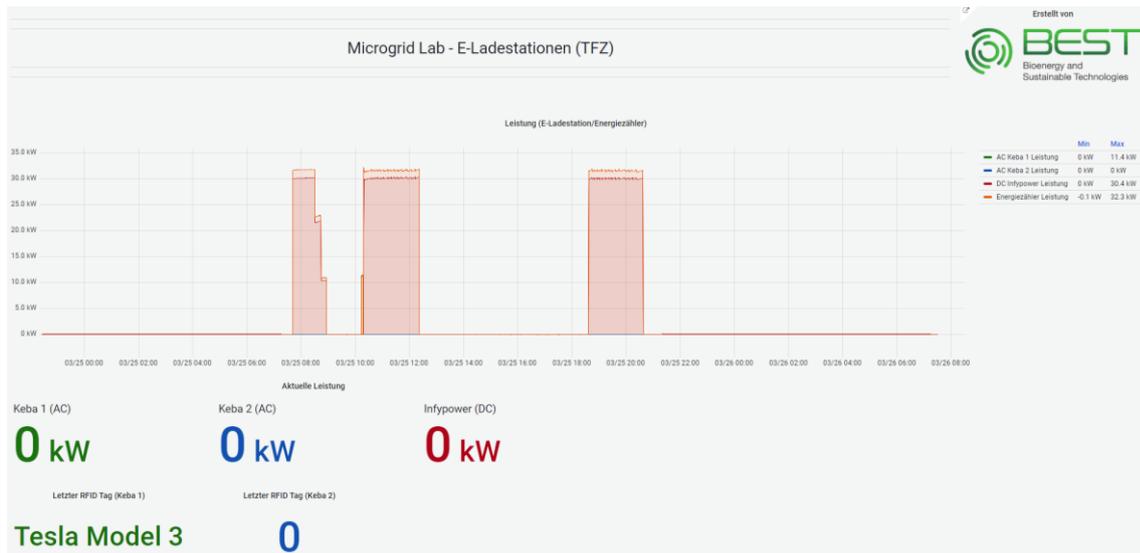


Abbildung 21: Darstellung der E-Ladeleistung und der zuletzt genutzten E-Fahrzeuge mittels RFID Tag.

**Wärme:**

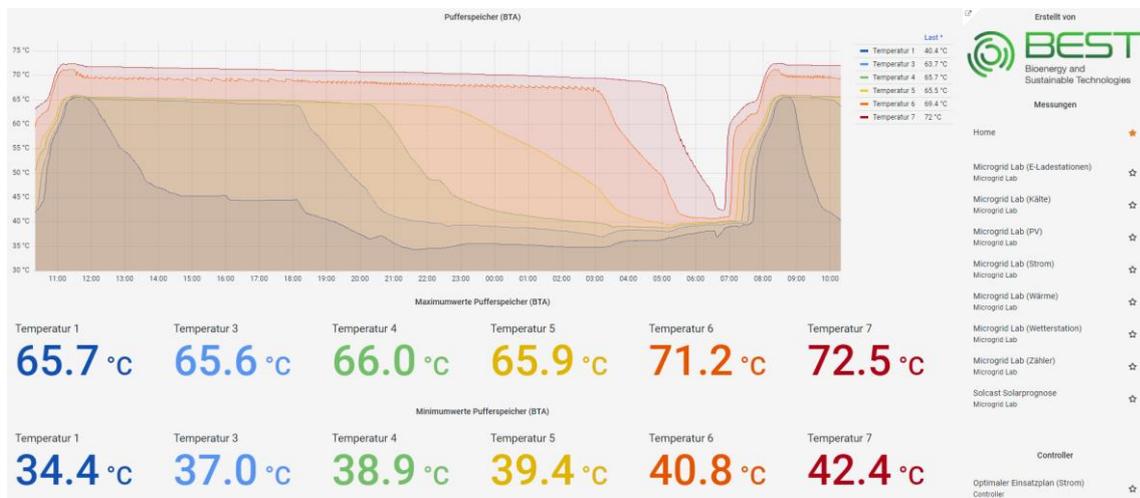


Abbildung 22 Darstellung der gemessenen Pufferspeichertemperaturen: Farblich sind die verschiedenen Temperaturniveaus des thermischen Pufferspeichers dargestellt (insgesamt sechs verschiedene Niveaus).

**Wetterdaten:**

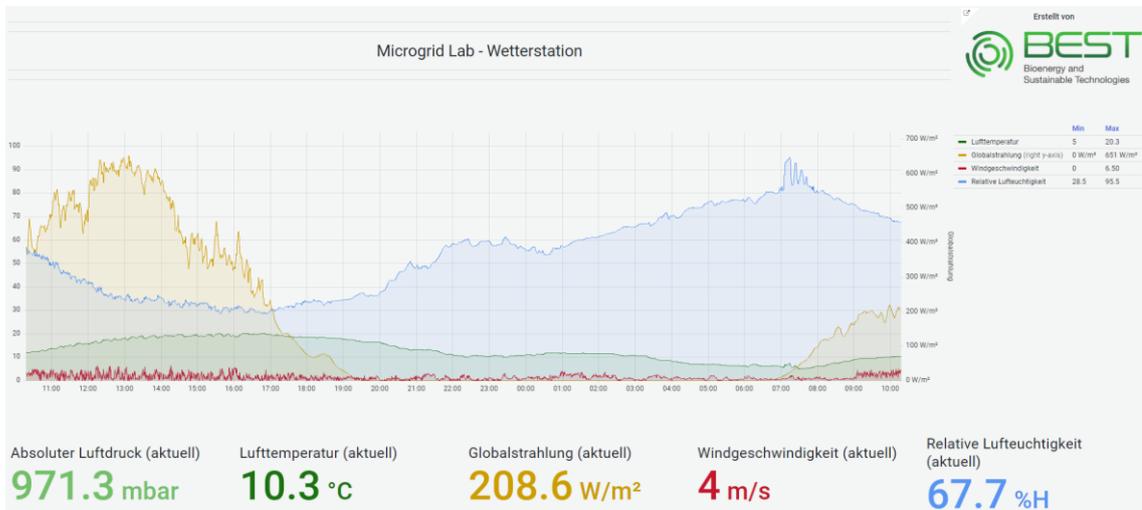


Abbildung 23: Darstellung der gemessenen Wetterdaten: Absoluter Luftdruck (hellgrün), Lufttemperatur (dunkelgrün), Globalstrahlung (gelb), Windgeschwindigkeit (rot), relative Feuchtigkeit (blau).

**Prognosedaten:**



Abbildung 24: Darstellung der prognostizierten Wetter-/Strahlungsdaten: Globalstrahlung (gelb), Direktstrahlung (rot), Diffusstrahlung (hellblau), Temperatur (grün), Bewölkungsgrad (dunkelblau).

## 4 Aufbau der Modellszenarien für Potenzialstudie

Zur Bestimmung der Potenziale von übergeordneten Systemreglern und integrierten erneuerbaren Energieerzeugungs- und Speichertechnologien wurde eine umfassende Potenzialstudie im Rahmen des Arbeitspakets V durchgeführt. Das nachfolgende Unterkapitel vermittelt einen Überblick über die Schwerpunkte der Studie.

### 4.1 Überblick über die Modellszenarien

Die Studie zur Ermittlung von technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Potenzialen von übergeordneten Systemreglern und erneuerbaren Energiesystemen betrachtete Marktpotenziale von Microgrids und Microgrid-Controllern, die Implementation von Gemeinde-Microgrids in Niederösterreich, den Einsatz übergeordneter Systemregler in Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften in Österreich, sowie den gegenwärtigen und im Jahr 2030 möglichen Stand von Energiegemeinschaften in Europa. Die unterschiedlichen Analysen werden in den folgenden Absätzen näher beschrieben und die Ergebnisse in Kapitel 5.2 dargelegt.

Für die Bestimmung der Marktpotenziale von Microgrids und Microgrid-Controllern wurden Marktforschungsberichte recherchiert, analysiert und ausgewertet.

Die aus der Implementation von Gemeinde-Microgrids in Niederösterreich resultierenden Potenziale wurden anhand einer Masterarbeit bestimmt, welche Referenzgemeinden zwischen 500 und 2000 Einwohnern ganzheitlich betrachtet.

Eine umfassende Potenzialstudie für den Einsatz übergeordneter Systemregler in Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften in Österreich ist im nachfolgenden Unterkapitel detailliert beschrieben. Dabei erfolgte der Vergleich eines herkömmlichen regelbasierten Steuergeräts mit dem übergeordneten Systemregler.

Um internationale Betrachtungen zu ermöglichen, wurden der gegenwärtige Stand und aktuelle Zielsetzungen zur Etablierung von Energiegemeinschaften in Europa analysiert und die gewonnenen Erkenntnisse zusammengebracht.

### 4.2 Methodik zur Potenzialerhebung von übergeordneten Systemreglern in österreichischen Energiegemeinschaften

Energiegemeinschaften können als abstrahierte Microgrids betrachtet werden, sofern Informations- und Kommunikationstechnologien und übergeordnete Systemregler für den optimalen Betrieb zum Einsatz kommen. Besonders vorteilhaft ist der Einsatz übergeordneter Systemregler in Energiegemeinschaften, da der Komplexitätsgrad mit zunehmender Anzahl und Diversität an Mitgliedern, Technologien und Energieträgern exponentiell steigt und dennoch die optimale Energieverteilung gewährleistet werden kann.

Die Potenzialstudie betrachtete zwei exemplarische Energiegemeinschaften. Eine der Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften (EEG) entspricht einem Cluster aus 10 Einfamilienhäusern mit insgesamt 27 Bewohnern. Die zweite EEG umfasst zwei Mehrfamilienhäuser mit insgesamt 64 Personen, aufgeteilt auf 16 Haushalte und insgesamt 32 Bewohner pro Mehrparteiengebäude. In Abbildung 25 ist eine exemplarische Energiegemeinschaft dargestellt:

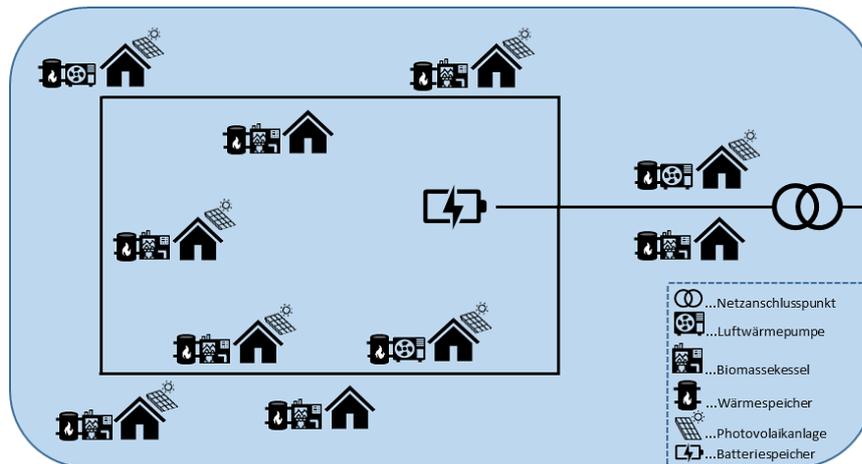


Abbildung 25: Darstellung einer Erneuerbaren-Energie-Gemeinschaft bestehend aus zehn Wohngebäuden und einem Community-Batteriespeicher.

#### 4.2.1 Gegenüberstellung der Regler

Für das Ausgangsszenario wurden die Technologien beider Energiegemeinschaften auf Basis statistischer Daten des Wohnsektors bestimmt. Die Betriebsweise der Technologien wurde mithilfe eines eigens entwickelten Tools simuliert, welches herkömmliche regelbasierte Steuergeräte simuliert. Resultierende Kosten und Emissionswerte ergeben sich ausschließlich aus der Betriebsführung.

Im Anschluss erfolgten sowohl die optimale Auslegung der Technologien als auch die Ermittlung der optimalen Betriebsweise mithilfe des MILP-basierten Optimierungsalgorithmus für den Einsatz der übergeordneten Systemregler auf Basis der  $CO_{2eq}$ -Minimierung als Zielfunktion. In diesem Fall kann der übergeordnete Systemregler somit über die Festlegung der Nennleistungen neuer Technologien verfügen, um das emissionsoptimale Szenario bei gleichbleibenden Kosten zu identifizieren.

Die Gegenüberstellung dieser Szenarien erfolgte in Bezug auf die resultierende Wirtschaftlichkeit der Anlagen und der Betriebsführung,  $CO_2$ -Emissionsäquivalente und Nennleistungen bzw. Kapazitäten der Technologien.

#### 4.2.2 Framework

Die zugrundeliegenden Rahmenbedingungen der EEG wurden auf Basis einer umfassenden Analyse von statistischen Daten zum Gebäudebestand und den Wohnverhältnissen Österreichs bestimmt, nachdem zuvor die Anzahl der Gebäude und die eingesetzten Technologien für beide Energiegemeinschaften festgelegt wurden. Dies betrifft insbesondere Gebäudecharakteristika und die Größenordnungen eingesetzter Technologien. Weiters wurden für die Betrachtung wirtschaftliche Parameter (Technologiekosten, Energiepreise, Kapitalzinssatz), Emissionsraten der Energieträger, meteorologische Daten des EEG-Standorts und Lastprofile für die Energieflüsse herangezogen.

Der Gebäudebestand und die Wohnverhältnisse sind maßgebend für resultierende Energiebedarfe wie Elektrizitäts-, Warmwasser- und Raumwärmebedarf, welche zur Erstellung der entsprechenden Lastprofile der einzelnen Wohngebäude benötigt wurden. Heizkessel, Wärmespeicher und Luft/Wasser-Wärmepumpen mit Heizstäben als Back-up wurden für die Bereitstellung von Wärme vorgesehen. Photovoltaikanlagen und ein Community-Batteriespeicher dienen zur Versorgung mit erneuerbar erzeugter Elektrizität. Die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen bestehen aus Investitions- und Wartungskosten der Technologien und Energiepreisen (Elektrizität, Brennstoffe, Einspeisevergütung, EEG-Energiehandelstarif). Weiters wurden Emissionswerte am Produktionsursprung des Versorgungsnetzes für den Elektrizitätsbezug sowie für Brennstoffe bestimmt. In Betracht gezogene meteorologische Parameter sind stündliche Werte der Außentemperatur und Global- und Diffusstrahlung.

#### 4.2.3 Extrapolation der Ergebnisse

In weiterer Folge wurde die Extrapolation der Resultate durchgeführt. Somit konnte die Anzahl potenzieller Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften in Österreich bestimmt werden. Zuerst wurde dafür die Anzahl an EEG in den 2095 österreichischen Gemeinden auf Basis der erwarteten Anzahl in österreichischen Energiegemeinschaften teilnehmenden Personen im Jahr 2030 bestimmt.

Anhand der Gemeinde Gresten in Niederösterreich wird in der nachfolgenden Abbildung die Anzahl und Standorte potenzieller Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften exemplarisch dargestellt. Dies entspricht 5 EEG bestehend aus jeweils 10 Einfamilienhäusern und einer EEG bestehend aus zwei Mehrfamilienhäusern, welche insgesamt 200 Mitglieder umfassen könnten.



Abbildung 26: Potenzielle Standorte für Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften in der Gemeinde Gresten (MFH=Mehrfamilienhaus, SFH=Einfamilienhaus). Eigene Darstellung, verändert nach (Basemap, 2021).

In weiterer Folge können die im Ergebniskapitel dargestellten Resultate sowohl für die einzelnen Gemeinden, als auch für das gesamte österreichische Bundesgebiet als Entscheidungsgrundlage herangezogen werden.

## 5 Ergebnisse Einsatzszenarien und Potenzialanalysen

### 5.1 Einsatzszenarien Controller in Testsystemen

Die entwickelten adaptiven Regler Algorithmen wurden in unterschiedlichen Testszenarien auf Basis von sowohl realen Messdaten als auch Simulationen hinsichtlich deren Anpassungsfähigkeit und Einsatzspektrum getestet und evaluiert. Dabei werden nachfolgend die zwei wesentlichsten Testszenarien beschrieben:

- Microgrid Lab Wieselburg
- Energiegemeinschaft mit 9 Teilnehmern (öffentliche Gebäude + private Haushalte)

#### 5.1.1 Microgrid Lab Wieselburg

Im Microgrid Lab Forschungsprojekt wurde ein Microgrid für kommunale Energiekonzepte in einem realen Umfeld geplant, errichtet, evaluiert und auf wissenschaftlicher Ebene weiterentwickelt. Ziel ist die Etablierung des Forschungslabors für verschiedene Wirtschaftszweige, um Planungs-, Steuerungs-, Integrations- und Kommunikationskonzepte zu entwickeln und für den Markt zu testen. Das betrifft auch sektorenübergreifende Energienetze (Wärme, Strom, Gas). Inhalte sind wissenschaftliche Planung, Inbetriebnahme, standardisiertes Monitoring der Verbraucher/Erzeuger (u.a. Biomasse, PV, Batterie, E-Ladestationen, Absorptionskälte), die Entwicklung von Testzyklen, Weiterentwicklung der Optimierungsalgorithmen und Wissenstransfer. Mithilfe entwickelter mathematischer Methoden wurde ein optimales Energieplanungskonzept entwickelt, welches auf andere Systeme übertragen werden kann. Das Microgrid Forschungslabor in Wieselburg ist das erste Microgrid-Forschungslabor in Österreich, das erneuerbare Energien, Versorgungsstrom, Wärmetechnologien, Biomassetechnologien, Elektromobilität, Speichertechnologien, Gebäudesteuerung sowie intelligente Netzwerkkommunikation integriert und das Testen und Evaluieren verschiedener Regelungsstrategien sowie übergeordnete Systemregler-Ansätze ermöglicht. Der aktuell im Microgrid Lab im Test befindliche SMG-Regler (ein auf Mixed-Integer Linear Programming (MILP) basierte Model Predictive Control (MPC)) ist für die Optimierung verschiedener verteilter Energieressourcen und deren koordinierten Echtzeitbetrieb innerhalb des Systems verantwortlich<sup>7</sup>.

Der schematische Aufbau des Microgrid Labs in Wieselburg ist in Abbildung 27 dargestellt. Die Infrastruktur des Microgrid-Testbeds besteht hauptsächlich aus einer PV-Anlage, einem Batteriespeicher, Ladestationen für Elektrofahrzeuge, einem gemeinsamen Kopplungspunkt für den Netzbezug bzw. für die Netzeinspeisung, Biomassekesseln, Wärmespeichern sowie eine Absorptionskälte- und Kompressionskältetechnologie, die in den drei Hauptgebäuden

---

<sup>7</sup> Armin Cosic, Michael Stadler, Muhammad Mansoor, Michael Zellinger: "Mixed-integer linear programming based optimization strategies for renewable energy communities", Energy, 23.July 2021, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121559>

(Technologie- und Forschungszentrum Bauteil A und B sowie das Feuerwehrhaus) des Standorts verteilt sind.

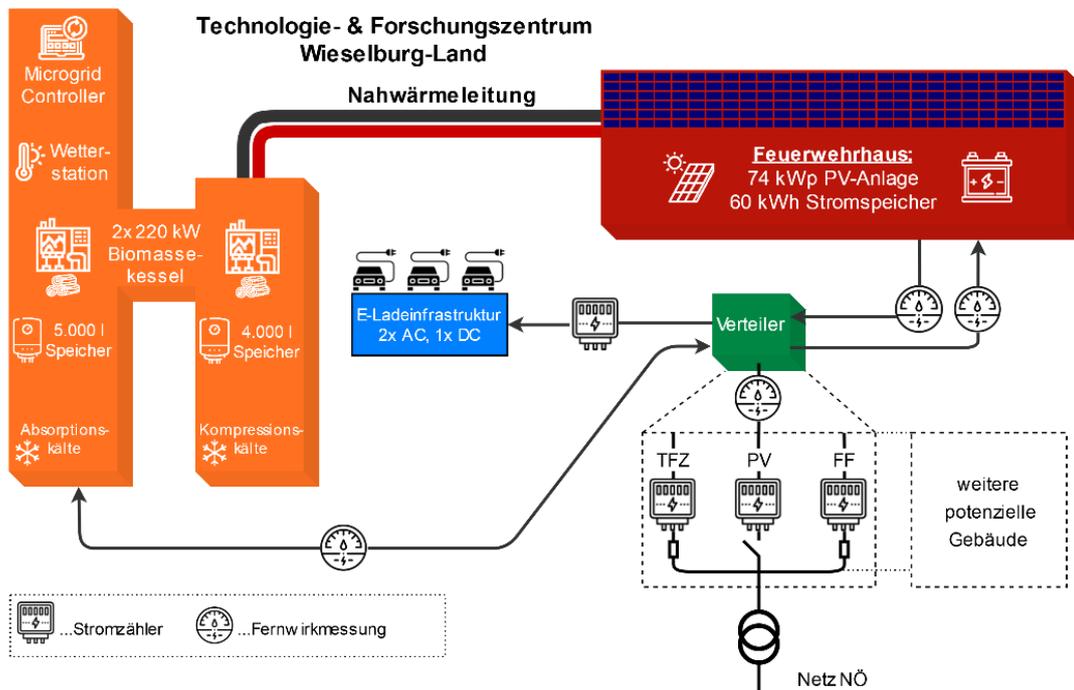


Abbildung 27: Schema des Microgrid Forschungslabor in Wieselburg (Quelle: BEST GmbH)

Um die Echtzeitdaten der Technologien des Microgrid-Labors zu erfassen, werden verschiedene Messgeräte und Sensoren benötigt. Diese benötigen spezielle Protokolle zur Kommunikation mit dem Datenerfassungssystem und sind somit das Rückgrat der Echtzeitmessung des Microgrid Labs. Die von den Messgeräten und Sensoren erfassten Daten werden in einer Zeitreihendatenbank gespeichert, die auf einer MySQL-MariaDB Datenbank basiert. Weiters wurde die Zeitreihendatenbank mit einer HTML-basierten Grafana-Umgebung für die Visualisierung der erfassten Rohdaten und weiteren Analysen verbunden. Diese Daten werden unter anderem für die Überwachung und Analyse des übergeordneten Systemreglers, verschiedene Testzyklen, die Überwachung von Ausfällen und die Interaktion zwischen Versorgungsunternehmen und Netz verwendet. Ohne diese Daten könnte der übergeordnete Systemregler nicht in Echtzeit betrieben werden bzw. müsste beim Auftreten von Datenausfällen auf ein einfaches regelbasiertes Energiemanagementsystem zurückgreifen, wodurch keine Optimierungsziele (Kosten- & CO<sub>2</sub>-Minimierung) verfolgt werden könnten.

Projektziel ist es, ein Microgrid-Testlabor zu etablieren, welches über einen übergeordneten Systemregler verfügt und die Methodik bzw. das Know-How zu Microgrids für Dienstleister und Entwickler von Systemkomponenten (z.B. Daten-Monitoring, Energiemanagementsysteme, E-Laderegler) zugänglich macht. Über einen offenen Zugang zum Forschungslabor können verschiedene Testzyklen unter der Verwendung von gemessenen Echtzeit-Lastdaten,

Wetterdaten und Prognosedaten von entsprechenden Anwendern durchgeführt werden. Diese Testzyklen können zum Beispiel aus einem einfachen Microgrid-Szenario bestehen, in dem bspw. eine PV-Anlage in Kombination mit einem Batteriespeicher für den Eigenverbrauch optimal genutzt wird, wodurch Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen innerhalb des Energiesystems gespart werden.

Ferner ist es möglich, über einen koordinierten Einsatzplan der verfügbaren Energietechnologien (wie PV und Batterie) verschiedene Ladeszenarien an Wochenendtagen und Entladeszenarien an den Wochentagen zu realisieren. Elektrofahrzeuge (EVs) können so ebenfalls in den Testzyklen berücksichtigt werden, wobei der vorhergesagte Zeitplan für die E-Ladezeiten verwendet werden kann. So können das PV- und Batteriespeichersystem optimal genutzt werden, um E-Autos zu laden und Lastspitzen zu vermeiden. Dabei würden die definierten Zielfunktionen der verwendeten Steuerungsalgorithmen (Kosten- und/oder CO<sub>2</sub>-Minimierung des Microgrids) in allen Testzyklen in Echtzeit zum Einsatz kommen.

Das erste Ziel des Forschungslabors war, die Technologieerweiterungen zu planen und die optimalen Kapazitäten für z.B. PV, elektrische Speicher und E-Ladestationen für die verschiedenen Anwendungsfälle und späteren Labortests festzulegen. Bereits die Konzeptionierung des Forschungslabors stellte eine komplexe Forschungsfrage dar, weil die Planung von Gebäuden mit ganzheitlicher Optimierung aller Energiesysteme und Gebäudeelemente noch nie durchgeführt wurde. D.h. das Microgrid Forschungslabor in Wieselburg ist das erste Mikronetz, welches Strom-, Wärme- und Speichertechnologien, Biomasse-Technologien, Elektromobilität und Gebäudesteuerung integriert und im Hinblick auf die optimierte Eigenversorgung intelligent vernetzt. Weiteres wurde analysiert, wie das Nachbargebäude (Feuerwehrhaus Wieselburg Stadt & Land) in das Microgrid-Forschungslabor am effizientesten eingebunden werden kann.

Die Planung der Technologieerweiterung erfolgte bereits mit dem bei BEST GmbH entwickelten mathematischen MILP Optimierungsprogramm und lieferte folgende Ergebnisse:

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der Energieoptimierungsplanung dargestellt. Die erste Spalte zeigt den Referenzfall (Szenario 1), wobei hier 100% des Strombedarfs vom Energieversorger bezogen wird und der Wärme- und Kältebedarf mit den bereits installierten Technologien gedeckt wird. Szenario 2 zeigt das Ergebnis der kostenoptimierten Berechnung: Bei der Installation einer 136 kW<sub>peak</sub> Photovoltaik, wobei sowohl das Dachflächenpotenzial vom Feuerwehrhaus als auch vom Technologie- und Forschungszentrum (TFZ) berücksichtigt werden, wird die höchste Kosteneinsparung von jährlich -23 % (Energiekosten inkl. amortisierter Investitionskosten) erreicht. Mit der Zielfunktion CO<sub>2</sub>-Minimierung und sonst den gleichen Rahmenbedingungen wie in Szenario 2 wird in Szenario 3 eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von jährlich -30% erreicht, wenn zusätzlich ein Batteriespeicher mit 326 kWh Speicherkapazität installiert wird. Im Vergleich zu Szenario 2 ist die weitere CO<sub>2</sub>-Minimierung nur marginal und der Kostenaufwand für den zusätzlichen Batteriespeicher sehr hoch. Da die Eigentümer des TFZ keine Photovoltaik am Dach des TFZ installieren wollten, wurde für Szenario 4 die für die Photovoltaik verfügbare Fläche nur auf die

günstig nutzbare Dachfläche des Feuerwehrhauses begrenzt (Südausrichtung 500m<sup>2</sup>). Auch bei Szenario 4 wird eine CO<sub>2</sub>-Minimierung als Zielfunktion angestrebt. Das Ergebnis von Szenario 4 zeigt eine jährliche Kosteneinsparung von -12% (Energiekosten inkl. amortisierter Investitionskosten) und eine jährliche CO<sub>2</sub>-Emissionenminderung von -18% im Vergleich zum Referenzfall. Um diese Werte zu erreichen muss eine 74 kW<sub>peak</sub> Photovoltaikanlage und ein Batteriespeicher mit 60 kWh Speicherkapazität installiert werden<sup>8</sup>.

In Bezug auf die Wärmeversorgung des Feuerwehrhauses wurde im Laufe des Projektes festgestellt, dass einer der beiden installierten Hackgutkessel (Bauteil A) mit 220 kW<sub>th</sub> eine ausreichend hohe Nennleistungs-Kapazität hat, um zusätzlich zum Bauteil A auch das Feuerwehrhaus mit Wärme mitversorgen zu können. Zur Realisierung der Wärmeversorgung wurde eine Fernwärmeleitung mit Hausübergabestation zwischen Pufferspeicher TFZ-Bauteil A und Wärmeverteilung im Feuerwehrhaus umgesetzt.

Für den weiteren Technologie- und Implementierungsplan wurden die Ergebnisse des Szenarios 4 verwendet.

Tabelle 6: Ergebnisse der Optimierungsberechnung

	Szenario 1	Szenario 2	Szenario 3	Szenario 4**
	Referenzfall	Kosten- minimierung	CO <sub>2</sub> - Minimierung	CO <sub>2</sub> - Minimierung
<b>Beschreibung</b>	100 % Strombezug vom EVU., Biomasse fürs Heizen Kompressionskälte fürs Kühlen	Alle dezentralen Technologien für Strom, Wärme/Kühlen erlaubt, Biomasse für Heizen	Alle dezentralen Technologien für Strom, Wärme/Kühlen erlaubt, Biomasse für Heizen	Alle dezentralen Technologien für Strom, Wärme/Kühlen erlaubt, Biomasse für Heizen
Energiekosten inkl. amortisierte Investitionen (€/Jahr)	<b>78000</b>	<b>60500 (-23%)</b>	<b>72000 (-8%)</b>	<b>68800 (-12%)</b>
Jährliche CO <sub>2</sub> Emissionen (t/Jahr)	<b>90</b>	<b>64 (-29%)</b>	<b>60 (-30%)</b>	<b>74 (-18%)</b>
Biomassekessel (kW)	220	220	220	220
PV (kW)	0	136*	136*	74*
Batteriespeicher (kWh)	0	0	326	60

\* durch theoretisch verfügbare Dachflächen begrenzt (TFZ und FF)

\*\* auf FF Dachfläche begrenzt (500m<sup>2</sup>)

<sup>8</sup> Aigenbauer Stefan, Michael Stadler, Michael Zellinger, Christine Mair, Pascal Liedtke, Armin Cosic, Muhammad Mansoor: „Microgrid Lab – R&D project for decentralized energy supply with biomass and other Distributed Energy Resources (DER)“, Central European Biomass Conference CEBC, Topic: Decarbonisation of the energy system, oral and visual presentation and proceedings, January 2020, Graz, Austria

Die Abbildung 28 und Abbildung 29 zeigen Luftaufnahmen der im Microgrid Forschungslabor Wieselburg beteiligten Gebäude: 1) dem Feuerwehrhaus (links im Bild) und dem Technologie- und Forschungszentrum Wieselburg-Land.



Abbildung 28: Luftaufnahme des TFZ-Wieselburg und des neuen Feuerwehrhauses mit PV-Anlage (Copyright BEST GmbH; Michael Stadler)



Abbildung 29: Technologie- und Forschungszentrum (TFZ) Wieselburg (Quelle: ecoplus)

Das aktuelle Testsystem des adaptiven Systemreglers enthält eine 74 kWp PV-Anlage, ein 60 kWh Batteriespeichersystem, eine Verbrauchslastzentrale und einen Zugangspunkt zum Versorgungsnetz. Ebenfalls wurde eine E-Ladeinfrastruktur, welche zwei AC Ladestationen mit jeweils 22 kW sowie eine DC Ladestation mit 30kW beinhaltet, in das System integriert. Die

folgende Abbildung zeigt eine Darstellung des adaptiven und übergeordneten Systemregler (SMG-Regler) Testsystems mit dem Fenecon Energiemanagementsystem (FEMS) und der externen Hardware am Microgrid Lab in Wieselburg:

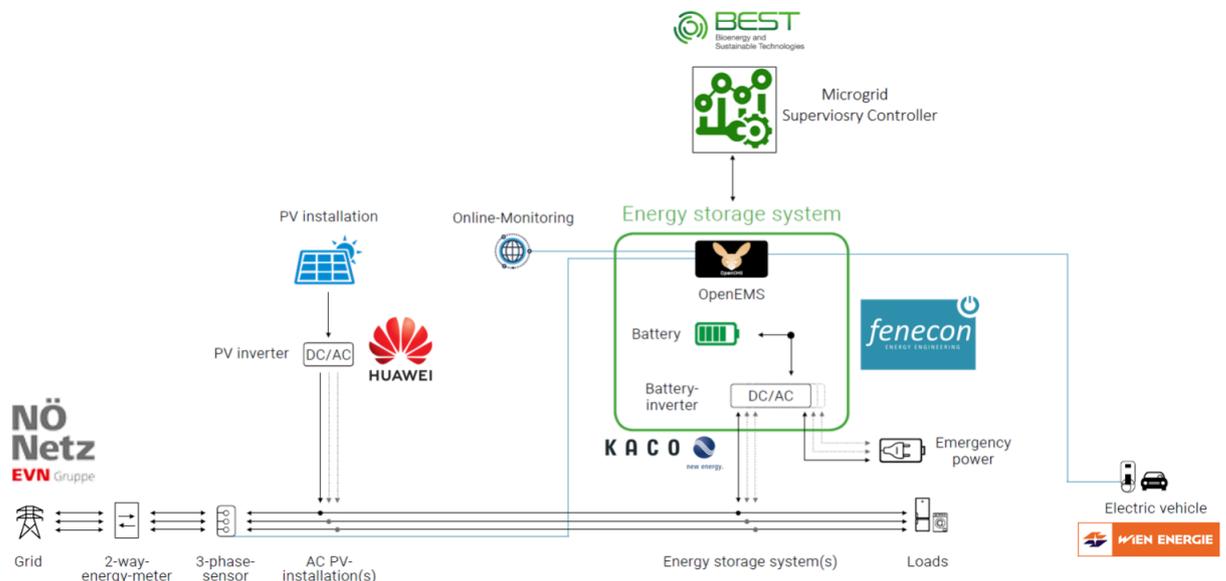


Abbildung 30: Darstellung des übergeordneten Systemregler (SMG-Regler) Testsystems mit FEMS und der externen Hardware am Microgrid Lab, Wieselburg (Quelle: OpenEMS, angepasst durch BEST GmbH)

Wie bereits in Kapitel 2.3 ausgeführt, ist der übergeordnete Systemregler so aufgebaut, dass dieser individuell an unterschiedliche Gegebenheiten angepasst werden kann. In Abbildung 31 ist ersichtlich, dass durch das Integrieren der Schnittstellen zwischen adaptivem Systemregler und den Technologien unterschiedliche Energiemanagementsysteme integriert werden können. So wurde im Microgrid Lab einerseits das Batteriemangement von FENECON und andererseits die Haustechnik von Sauter und Limoser aufgesetzt.

Die erste Komponente (rechts in der Abbildung) besteht hauptsächlich aus den auf Python und GAMS basierenden Programmiermodulen. Diese interagieren mit den verschiedenen Gebäudesensoren, um die Echtzeit-Messdaten zu erfassen, wie z.B. Last- und Erzeugungsdaten, ZAMG-Wettervorhersagen, Echtzeit-Wetterdaten einer physischen Wetterstation am Microgrid Lab. Zwei spezielle Programmiermodule sind für die Last- und PV-Prognose verantwortlich. Die aktuellen und historischen Messdaten sowie die Prognosedaten werden dann in die interne MySQL Datenbank gespeichert. Das GAMS-Programmiermodul greift auf diese Daten zu, führt die Optimierung in 5-Minuten-Zeitschritten durch und generiert die übergeordneten Steuerungswerte. Diese Sollwerte werden dann über das Modbus-TCP/IP-Kommunikationsprotokoll vom Systemrechner der BEST GmbH an die FEMS-Box für weitere Aktionen gesendet.

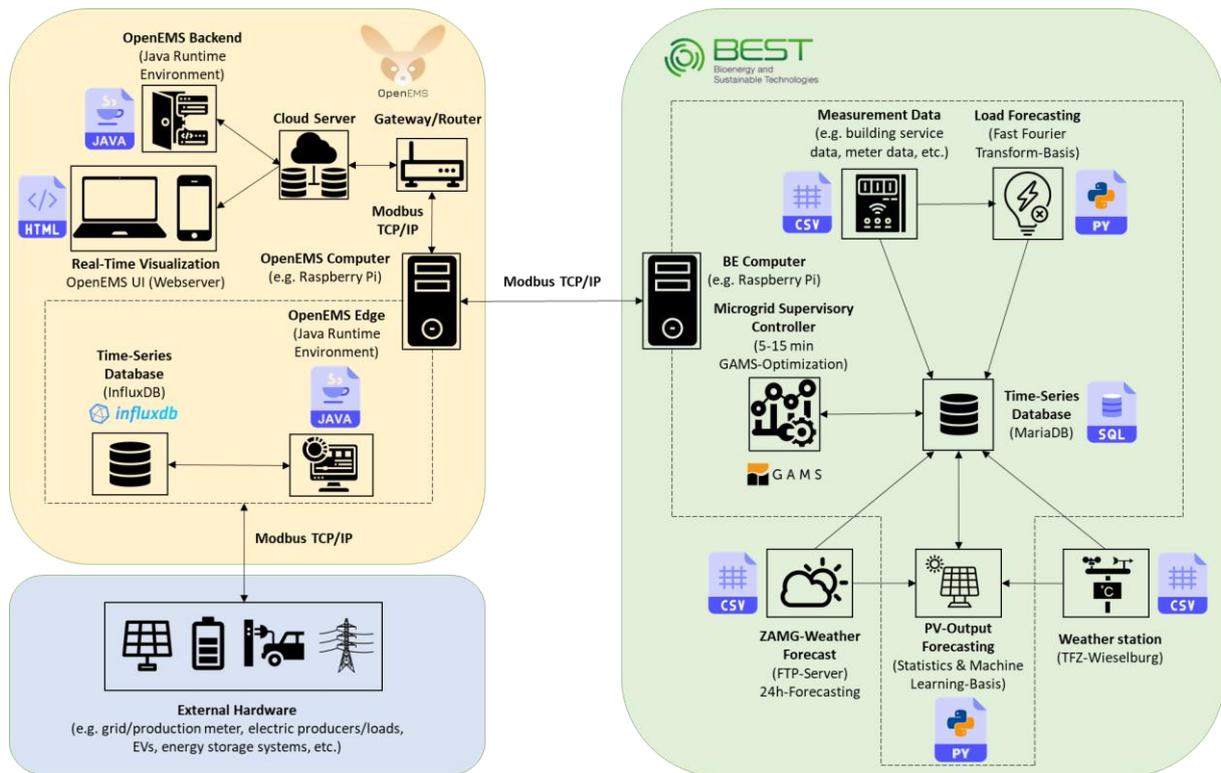


Abbildung 31: Einbindung in das Microgrid Test Lab

Die FEMS-Box ist für die Integration mit OpenEMS verantwortlich, um die Überwachungswerte zu empfangen und sie an die externe Hardware zu Steuerungszwecken zu senden. OpenEMS ist eine modulare Plattform für Energiemanagement-Anwendungen. Sie erfüllt die Anforderungen für die Steuerung, Überwachung und Integration von elektrischen Energiespeichern, Lasten und Generatoren zusammen mit ergänzenden Schnittstellen und Diensten. OpenEMS verfügt über eine herstellerneutrale Integrationsplattform, eine Open-Source-Lizenz und bietet proprietäre Anwendungen.

Tests mit dem Batterie-Energiespeichersystem durch Senden von übergeordneten Regelungswerten wurden im Microgrid Lab am Standort Wieselburg bereits durchgeführt. Dies beinhaltet das Überschreiben von Standard-Regelwerten, die durch den regulären Betrieb der elektrischen Energiebilanz vorgegeben sind.

Alleine durch die optimale Planung und Einbindung der PV-Anlage und des Batteriespeichers konnte nach ca. einem Jahr Betrieb am Microgrid-Lab ein PV-Eigennutzungsgrad von 97% erreicht werden. Am Microgrid Forschungslabor wurden unterschiedliche Testläufe des übergeordneten Systemreglers durchgeführt. Folgendes Ergebnis-Beispiel zeigt dabei den

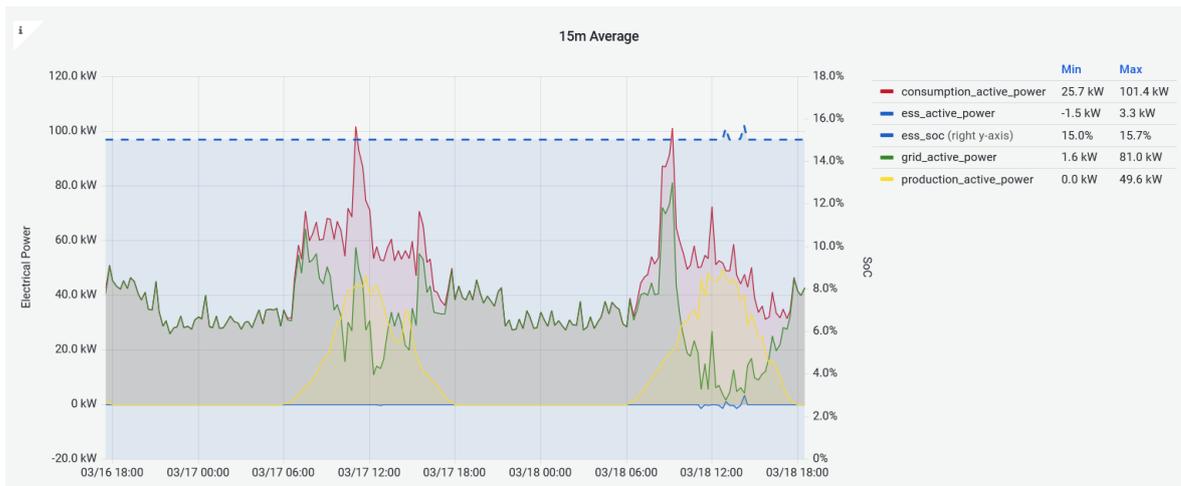


Abbildung 32: Standard-Regelung

Unterschied zwischen Standard-Regelung und übergeordneter MPC-Regelung, welche auf Marktsignale reagiert und Lastspitzen vermeidet.

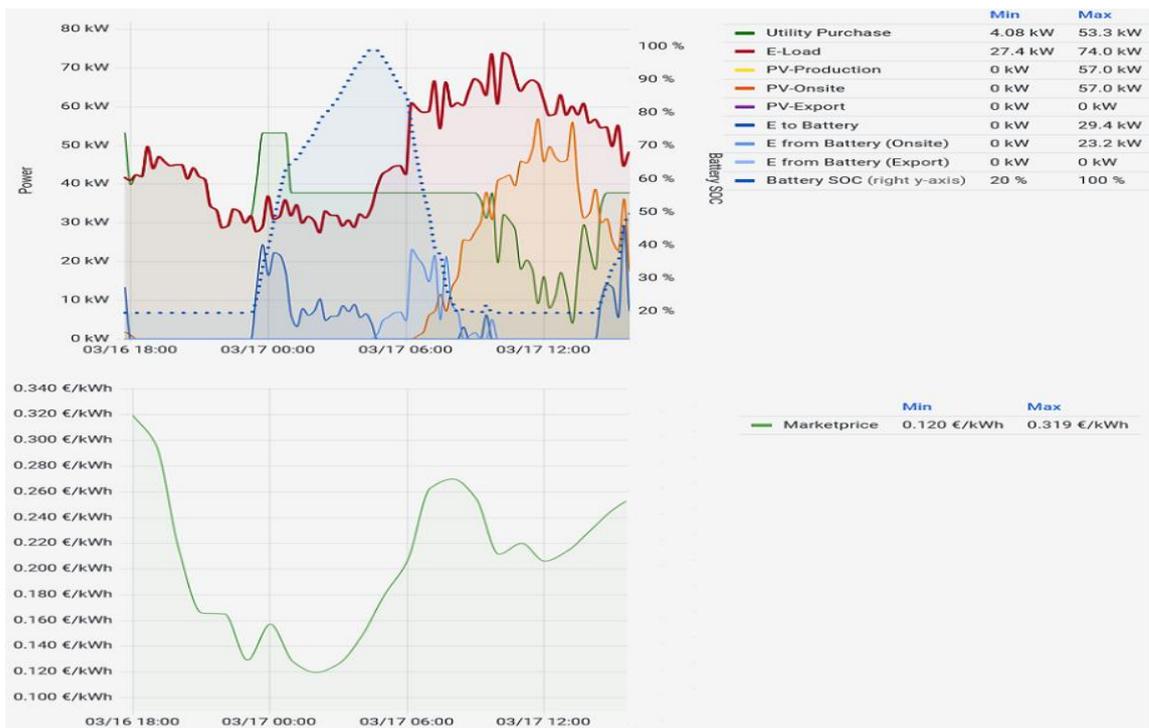


Abbildung 33: Übergeordnete Regelung reagiert auf Marktsignale und reduziert Lastspitze

Aus obiger Abbildung 33 ist ersichtlich, dass die Batterie den übergeordneten Regelungswerten folgt, die vom Python-Modul des Reglers über das Modbus/TCP-Kommunikationsprotokoll vorgegeben werden. Die solare PV-Erzeugung wird verwendet, um den Batteriespeicher mit Ladeenergie zu versorgen, während die Last in dieser Zeit durch den zusätzlichen Bezug aus dem Versorgungsnetz gedeckt wird. Dies ist besonders interessant, um zu zeigen, dass die übergeordnete Steuerung auf Marktsignale reagieren kann, wenn das

Versorgungsnetz günstigeren Strom liefert. In diesem Fall nutzt das System kostenlose Solar-PV-Energie, um die Batterie zu laden und diese gespeicherte Energie in der Zeit mit hohem Netzbezugspreis zu verwenden. Gleichzeitig wird durch Berücksichtigung von Last- und Erzeugungsprognosen eine intelligente Nutzung der Batterie möglich, welche dazu eingesetzt werden kann, Lastspitzen zu vermeiden. Das ist in der Abbildung 33 ersichtlich, wo der Bezug aus dem Netz durch eine angepasste Betriebsstrategie der Batterie geglättet wird.

Laufende Tests sind einerseits für die übergeordneten Systemregler im Microgrid Forschungslabor und des elektrischen Systems, als auch andererseits für die Wärmeversorgung bzw. das thermische System und für das gesamte, sektorgekoppelte System notwendig. In der Testumgebung des Microgrid Labs war die Kopplung der Systeme nur in einer Simulationsumgebung möglich, da die reale Steuerung der Wärmeversorgung durch bürokratische Hürden bzw. Sicherheitsbedenken nicht möglich war.

### 5.1.2 Kärnten Use Case

Im Zuge des COMET-Energiegemeinschaftsprojekts gemeinsam mit der KELAG, KNG-Kärnten Netz GmbH und meo Energy wurde ein Testbed für eine erneuerbare Energiegemeinschaft (EEG) bestehend aus neun Teilnehmern konzipiert und optimal geplant. In diesem Projekt wurden bereits die im Grundlagenforschungsprojekt entwickelten Algorithmen als Basis herangezogen und weiterentwickelt. Diese Koordination mit COMET und die Weiterentwicklung war bereits im ursprünglichen Projektplan so vorgesehen. Weitere Erläuterungen dazu sind im Kapitel 6 zu finden. Im Kärnten Use Case wurden neue erneuerbare Energie- und Speichertechnologien optimal ausgelegt. Der Aufbau des Testbeds basiert auf den Merkmalen einer typischen erneuerbaren Energiegemeinschaft, bestehend aus einer Gemeinde, einer Feuerwehr, einer Bank, einem Wohnhaus und drei Einfamilienhäusern. Diese zielt darauf ab, die in der Gemeinschaft erzeugte erneuerbare Energie auf lokaler Ebene in optimaler Weise über alle betrachteten Energiesektoren, d. h. sowohl den thermischen als auch den elektrischen Energiesektor, und nahezu in Echtzeit zu nutzen.

Das Hauptziel der Fallstudie dabei ist, die vorhandenen Flexibilitäten - in Form von dezentralen Energiespeichertechnologien - innerhalb der EEG in Abhängigkeit von der gegebenen Zielfunktion so optimal wie möglich zu nutzen und einen optimalen Einsatzplan für die betrachteten Energietechnologien zu erstellen. Das Testen der übergeordneten Systemregelung für die betrachtete EEG-Fallstudie sollte dabei über einen sogenannten Open-Loop-Test erfolgen, der später auch realisiert wurde. Dabei handelt es sich um einen Test des SMG-Reglers in einer simulierten Umgebung mit echten Messdaten ohne aber auf die jeweilige Hardware direkt einzugreifen, d.h. die Hardware folgt in diesem Fall nicht den ermittelten Sollwerten des SMG-Reglers, da nicht direkt in den Betrieb der Energietechnologien eingegriffen wird.

Auch hier war es durch den anpassungsfähigen Aufbau der Architektur sehr effizient möglich, die Einbindung der Visualisierungs-, Prognose-, und Optimierungsmodule sehr einfach mit der lokalen Hardware vor Ort zu verbinden und so die übergeordnete Systemregelung zu

ermöglichen. In diesem Fall erfolgte die Einbindung der lokalen Erzeuger und Verbraucher über den Projektpartner meo Energy. Die nachfolgende Abbildung 34 gibt die gesamte, erforderliche Systemarchitektur bzw. Kommunikationsinfrastruktur mit den dazugehörigen Schnittstellen für den Open-Loop-Test schematisch wieder.

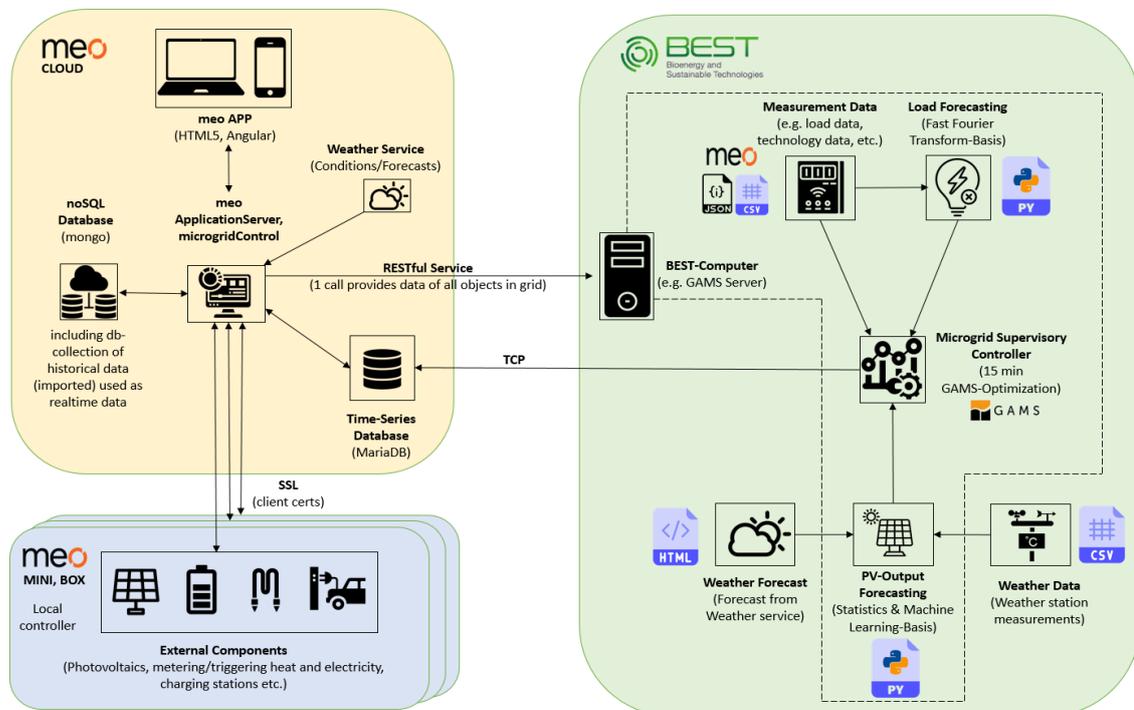


Abbildung 34: Die schematische MPC-Systemarchitektur für den Open-Loop-Test in EEG-Fallstudie.

Es wurden verschiedene Betriebsstrategien und Optimierungsszenarien für den Open-Loop-Test betrachtet. Als Flexibilitäten dienten dabei

- ein stufenloser Heizstab (P2H) mit einer Leistung von 4 kW in Kombination mit einem Warmwasserspeicher mit einem Fassungsvermögen von 400 l (typische Haushaltsgröße) und
- ein Batteriespeicher mit einer Speicherkapazität von 14 kWh.

Das Energieflussdiagramm der entsprechenden EEG-Fallstudie mit den vorhandenen Energietechnologien bzw. Flexibilitäten ist in Abbildung 35 schematisch dargestellt.

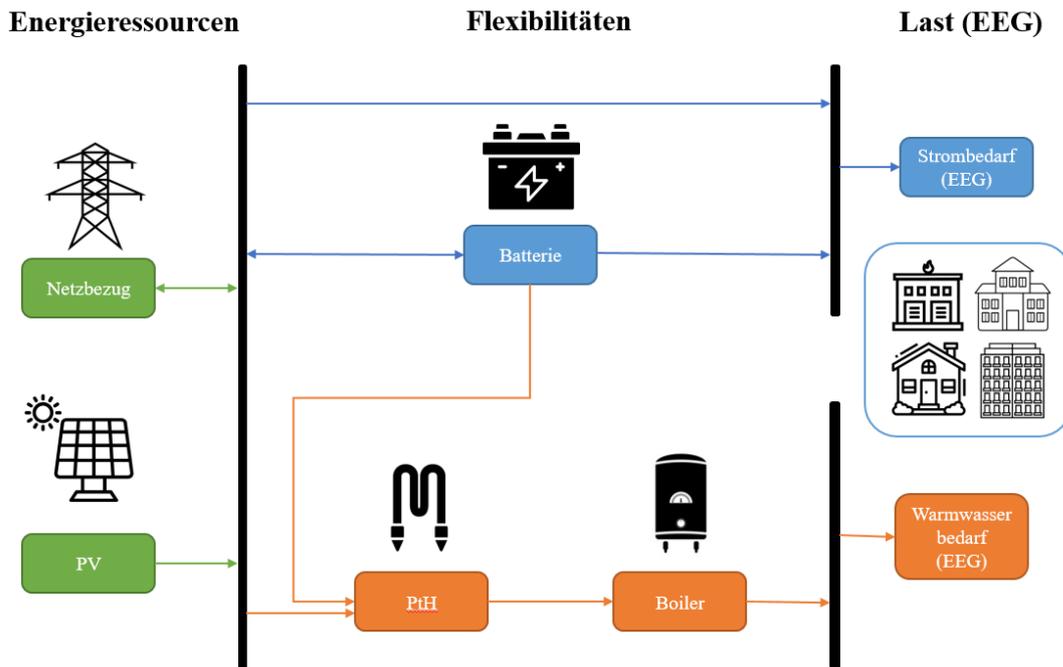


Abbildung 35: Das schematische Energieflussdiagramm der entsprechenden EEG-Fallstudie mit den vorhandenen Energietechnologien bzw. Flexibilitäten.

Als Zielfunktion für die Optimierung wurde einerseits Kostenminimierung und andererseits CO<sub>2</sub>-Minimierung vorgegeben. Bei der Kostenminimierung werden die ausgewählten Tarife bzw. betrachteten Tarifszenarien, den größten Einfluss auf das Optimierungsergebnis, also den optimalen Betriebsfahrplan, haben. Bei der CO<sub>2</sub>-Minimierung spielt primär der CO<sub>2</sub>-Emissionsfaktor für den österreichischen Strommix im betrachteten Monat eine wesentliche Rolle, also wie viele CO<sub>2</sub>-Emissionen für den Strombezug aus dem Netz anfallen.

Um also den Einfluss auf den ermittelten Einsatzplan und das Betriebsverhalten zu eruieren, wurden folgende Tarifszenarien für den Stromnetzbezug im Kostenminimierungsfall betrachtet:

1. Szenario A: Gewöhnlicher, flacher Verbraucherpreistarif in €/kWh
2. Szenario B: Marktpreissignale (EPEX Strommarktpreise) auf Stundenbasis in €/kWh
3. Szenario C: Leistungspreistarif in €/kW

Für jeden dieser drei Tarifszenarien wurde eine Kostenminimierung durchgeführt und der ermittelte Betriebsfahrplan mit einem Vorhersagehorizont von 48 Stunden grafisch über das Grafana Webinterface dargestellt.

Anschließend wurde ebenfalls eine CO<sub>2</sub>-Minimierung durchgeführt, um den emissionsärmsten Betriebsfahrplan bzw. den Fahrplan für eine maximale Deckung des Eigenbedarfs durch erneuerbare Energien zu bestimmen.

Die nachfolgende Abbildung 36 stellt den optimalen Einsatzplan beispielhaft für alle Stromtechnologien bei einer Betrachtung von stündlichen Marktpreissignalen (Szenario B) für den Netzbezug/-einspeisung dar. Die blauen Linien entsprechen der Lade-/Entladeleistung der Batterie bzw. dem Ladezustand (SOC), die gelbe Linie entspricht der PV Leistung, die orange Linie dem PV-Eigenverbrauch, die lila Linie der PV-Überschusseinspeisung, die grüne Linie entspricht dem Netzbezug und die rote Linie dem Stromverbrauch.

In der Abbildung 37 wird der dazugehörige, prognostizierte EPEX Spot-Marktpreisverlauf für die nächsten 24 Stunden dargestellt.

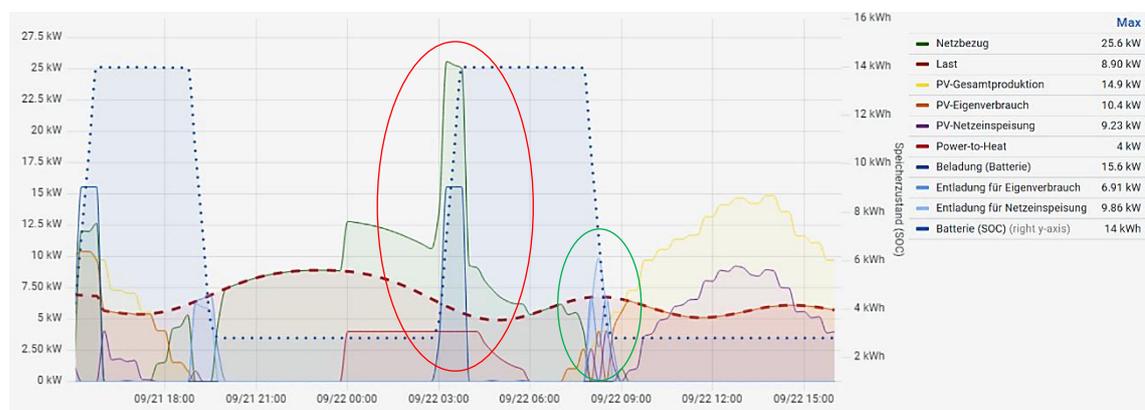


Abbildung 36: Darstellung des optimalen Einsatzfahrplanes für alle Stromtechnologien unter Berücksichtigung von Marktpreissignalen

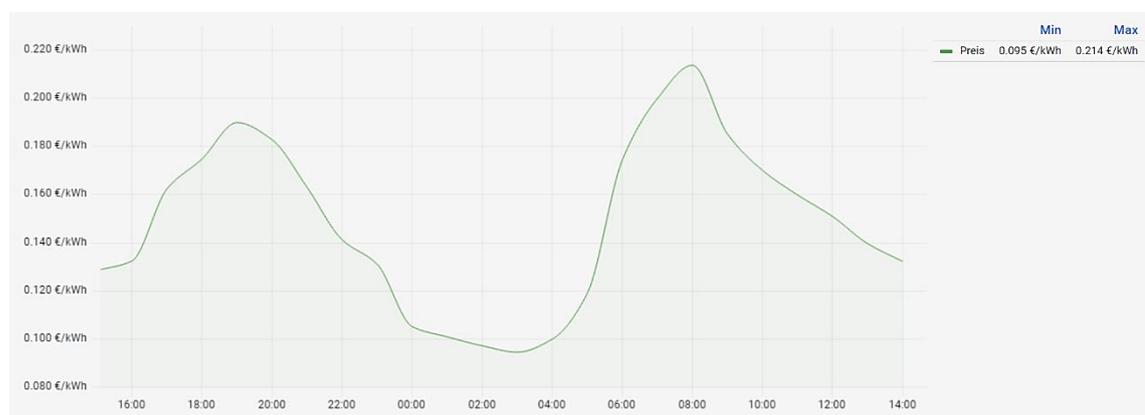


Abbildung 37: Der prognostizierte EPEX Spot-Marktpreisverlauf auf Stundenbasis für die nächsten betrachteten 24 Stunden

Das in der Abbildung 36 dargestellte Optimierungsergebnis zeigt, wie die Optimierung auf die prognostizierten, stündlichen EPEX Spot-Marktpreissignale, kostenoptimal reagiert. Dabei kann man sehr gut erkennen, wie zum kostengünstigsten Zeitpunkt (gegen 03:00 Uhr) viel Strom aus dem Netz für die Beladung des Batteriespeichers und des Warmwasserspeichers über P2H entnommen wird (in Abbildung 36 rot markiert). Daraus resultieren allerdings hohe Netzbezugsspitzen, wodurch ein netzdienliches Verhalten ohne äußere Rahmenbedingungen (z.B. fixe Vorgaben/Grenzwerte für die maximale Netzbezugsleistung) nicht gewährleistet werden kann.

Man sieht auch, dass die Batterie genau dann entladen wird, wenn der Marktpreis am höchsten ist (gegen 08:00 Uhr). Zu diesem Zeitpunkt wird die Last durch die Batterie gedeckt und gleichzeitig in das Netz eingespeist bzw. verkauft, da hier der höchste Energiepreis erzielt wird (in Abbildung 36 grün markiert).

## 5.2 Potenzialanalysen

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Potenzialstudie beschrieben, welche den Analyseschwerpunkt auf den Einsatz von übergeordneten Systemreglern in Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften legt. Die zugehörige Methodik wurde dazu in Kapitel 4 beschrieben.

### 5.2.1 Microgrid-Potenziale

Zur Bestimmung von Microgrids in der Gesamtheit, als auch Microgrid-Controller im Speziellen wurden aktuelle Marktforschungsberichte recherchiert, analysiert und bewertet. Demnach wird das Marktvolumen von Microgrids in Europa im Zeitraum von 2022 bis 2030 von 1,0 auf 2,3 Mrd. € mehr als verdoppelt werden. Das Wachstum des Marktvolumens von Microgrid-Controllern erfährt ebenfalls eine Verdoppelung von 0,1 auf 0,2 Mrd. € in Europa im selben Zeitraum. Details zu den Quellen und den dahinterliegenden Werten können dem Meilensteinbericht E4\_09\_2021\_K3-F-755001-2017 entnommen werden

### 5.2.2 Microgrid Potenziale für niederösterreichische Gemeinden

Die Masterarbeit mit dem Titel *Optimization of Renewable Based Microgrids – Use Case Lower Austria* ermittelte technische, wirtschaftliche und ökologische Potenziale, welche aus einem Szenario einer Restrukturierung des Energiesystems hervorgehen könnten. Betrachtet wurde das Szenario der großflächigen Implementation von Microgrids in niederösterreichischen Gemeinden der Größenordnung von 500-1.999 Einwohnern. Die Standorte der neun Referenzgemeinden, hervorgehend aus drei Regionen unterschiedlicher Energieintensität mit jeweils drei weiteren Abstufungen, sind in Abbildung 38 ersichtlich:

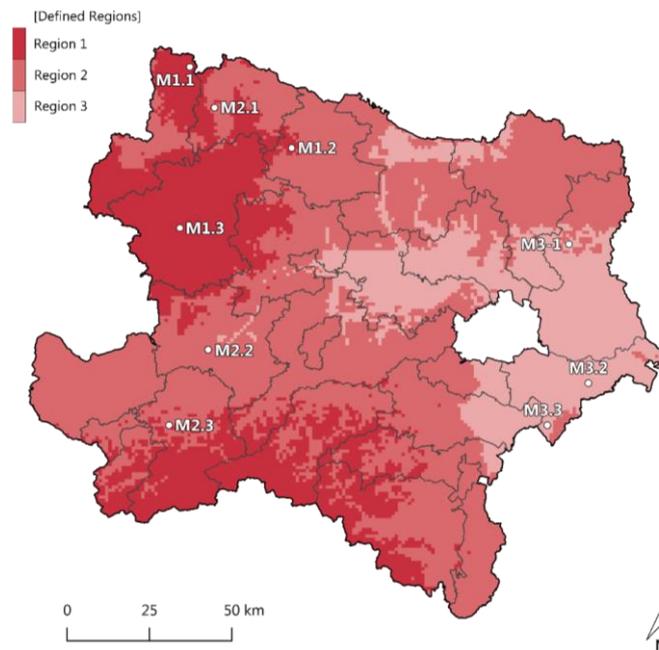


Abbildung 38: Gliederung Niederösterreichs in drei Regionen sowie Standorte der Referenzgemeinden.

Die von M1.1 bis M3.3 in aufsteigender Reihenfolge nummerierten Referenzgemeinden sind Reingers, Irnfritz-Messern, Rapottenstein, Pfaffenschlag bei Waidhofen a.d. Thaya, Erlauf, Gresten, Hohenruppersdorf, Göttlesbrunn-Arbesthal und Hof am Leithagebirge.

Die Resultate der Microgrid-Optimierung mit der Zielsetzung einer 50/50%-gewichteten Minimierung von Kosten und Emissionswerten und der anschließenden Extrapolation der Ergebnisse zeigen, dass bei etwa gleichbleibenden Kosten die jährlich resultierenden CO<sub>2</sub>-äquivalenten Emissionswerte um 66% gesenkt werden könnten. Dies gilt für den ausgewählten Betrachtungsbereich des Wohnsektors von 310 der 573 der niederösterreichischen Gemeinden.

Dieses Resultat ist erzielbar durch erheblichen Ausbau erneuerbarer Energietechnologien und somit der Dezentralisierung des Energiesystems zur nachhaltigen Dekarbonisierung des Energiesektors. Weiters werden in Tabelle 7 die techno-ökonomischen Ausbauziele erneuerbarer Energieträger am niederösterreichischen Wohnsektor innerhalb des zuvor geschilderten Betrachtungsbereichs aufgezeigt:

Tabelle 7: Technische Potenziale von Microgrids am Wohnsektor in Niederösterreich (Oberbauer, 2020).

Technologie	Nennleistung/Kapazität	Einheit
PV	983,74	MW <sub>p,el</sub>
Luft/Wasser-Wärmepumpe	118,29	MW <sub>th</sub>
Sole/Wasser-Wärmepumpe	332,85	MW <sub>th</sub>
Solarthermie	5,36	MW <sub>th</sub>
Power-to-Heat	1,00	MW <sub>th</sub>
Batteriespeicher	85,57	MWh <sub>el</sub>
Wärmespeicher	117,45	MWh <sub>th</sub>

Aus den Ergebnissen der Masterarbeit kann abgeleitet werden, dass politische Ziele zum Ausbau erneuerbarer Energietechnologien in Niederösterreich, aber auch in weiterer Folge ebenso in ganz Österreich durchaus verwirklichtbar sind und der Privatsektor dazu einen wesentlichen Beitrag leisten kann. Besonders den Ersatz bestehender und auf fossilen Energieträgern beruhenden Heizkessel mit umweltfreundlichen Technologien wie Biomassekesseln und Wärmepumpen, sowie der Ausbau von Photovoltaikanlagen und Stromspeichern zur erneuerbaren Elektrizitätsversorgung bieten ein enormes Potenzial zur Dekarbonisierung des österreichischen Wohnsektors.

### 5.2.3 Potenziale von Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften in Österreich

Da in den zuvor genannten Marktforschungsstudien der Einsatz von Controllern nur im Kontext von Microgrids betrachtet wird, erfolgte eine Erweiterung in Richtung Energiegemeinschaften.

In Tabelle 8 sind die Einzelergebnisse der zwei betrachteten Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften dargestellt, die Abkürzung MFH steht für die EEG bestehend aus zwei Mehrfamilienhäusern und SFH für die EEG bestehend aus zehn Einfamilienhäusern.

Tabelle 8: Ergebnisübersicht des Szenario 1 der Use Cases MFH und SFH.

	Szenario Einheit	MFH			SFH		
		Ist-Stand	Optimale Planung und übergeordnete Systemregelung	Optimale Planung und standard-Regelung	Ist-Stand	Optimale Planung und Systemregler	Optimale Planung und übergeordnete Systemregelung
Jährliche Kosten	[€/a]	56.538,05	56.538,05	65.320,85	38.624,17	38.624,17	51.890,21
Jährliche Emissionen	[kg CO <sub>2</sub> -eq./a]	78.588,97	16.099,85	60.722,96	54.765,64	5.470,77	48.722,19
Kostenveränderung	[%]	-	0,00	+ 15,53	-	0,00	+ 34,35
Emissionsveränderung	[%]	-	- 79,51	- 22,73	-	-90,01	- 11,04
Photovoltaik	[kW <sub>p,el</sub> ]	2	168		4	229	
Batteriespeicher	[kWh <sub>el</sub> ]	0	298		0	140	
Luft/Wasser-Wärmepumpe	[kWh <sub>el</sub> ]	0	6		0	5	
Elektro-Heizstab	[kWh <sub>el</sub> ]	10	24		9	47	
Wärmespeicher	[kWh <sub>th</sub> ]	139	162		185	139	
Pelletkessel*	[kW <sub>th</sub> ]	41	65		35	50	
Sonstige Heiztechnologien**	[kW <sub>th</sub> ]	79	0		68	0	

\*Im Fall SCM1.1 & SCS1.1 entspricht dies der Summe der Biomassekessel; \*\*Sonstige, nicht abgebildete Technologien gemäß Energiemix (Erdgas, Heizöl, Kohle, Fernwärme, Solarthermie) lt. Meilensteinbericht E4\_09\_2021\_K3-F-755001-2017

Daraus ist ersichtlich, dass in beiden Szenarien die Einsparung der Emissionen bei MFH bei knapp 80% und bei SFH bei etwa 90%, bei gleichbleibenden Kosten liegt. Dieses Ergebnis ist aber nur erreichbar bei einer optimalen Planung und dem Einsatz des übergeordneten Systemreglers. Kommt bei den gleichen geplanten Technologien lediglich eine Standard-Regelung zum Einsatz, welche nicht vorausschauend agiert und Synergien der unterschiedlichen Sektoren nicht berücksichtigt, sind die möglichen Einsparungen deutlich niedriger. Diese liegen im MFH Szenario bei etwa 22% Emissionseinsparung, allerdings bei 15% höheren Gesamtkosten. Im SFH Szenario ist die Kostensteigerung mit 34% noch deutlich höher und es sind nur Emissionseinsparungen von etwa 11% erzielbar.

Um die Ergebnisse auf nationaler Ebene zu betrachten, wurde die Anzahl potenzieller Energiegemeinschaften ermittelt. Studien legen zugrunde, dass rund 10% der österreichischen Bevölkerung im Jahr 2030 in Energiegemeinschaften beteiligt sein wird. Auf dieser Basis konnte in Bezug der zuvor betrachteten Anwendungsfälle die Anzahl von 25.076 Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften für das Jahr 2030 berechnet werden, dies entspricht 908.598 Personen.

Auf Grundlage der Österreich-weiten Betrachtung könnten durch die großflächige Etablierung von EEG somit 86,62% der jährlich verursachten Emissionen bei gleichbleibenden Kosten reduziert werden und entspricht der absoluten Einsparung von 1,2 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalenten pro Jahr.

Betreffend erneuerbarer Energietechnologien ergibt dies ein absolutes Potenzial von 7.813 Mio. € an Investitionsvolumen, sowie 1.050 Mio. € für übergeordnete Systemregler in Österreich.

Details über die Datengrundlage, Methodik sowie detaillierte Darstellung aller Ergebnisse sind dem Meilensteinbericht E4\_09\_2021\_K3-F-755001-2017 zu entnehmen.

#### 5.2.4 Potenziale von Energiegemeinschaften in Europa

Um internationale Potenziale zu betrachten, wurde der EU 27+1-Raum inkl. Großbritannien betrachtet und internationale Studien analysiert. Die Ergebnisse legen dar, dass die Anzahl von etwa 1 Mio. Energiegemeinschaften im Jahr 2030 erwartet wird, und dies entspricht einer Mitgliederzahl von rund 31,2 Millionen Personen und schafft 131 GW an erneuerbarer Energiebereitstellung mit dem Fokus auf Photovoltaik, Windkraft und Batteriespeichern. Dieser Zubau erneuerbarer Energieträger entspricht bei gegenwärtigen Technologiekosten etwa 170 Mrd. € an Marktvolumen inklusive Installation. Für den Einsatz übergeordneter Systemregler in Energiegemeinschaften bedeutet dies ein wirtschaftliches Potenzial von etwa 60-100 Mrd. € je nach Komplexitätsgrad der Anwendung. Diese Maßnahmen könnten somit auf europäischer Ebene etwa 2,2 Mrd. Tonnen CO<sub>2eq</sub>-Emissionen pro Jahr einsparen.

#### 5.2.5 Zusammenfassung der Potenzialanalysen

Um die Pariser Klimaziele zu erreichen, ist eine Umstrukturierung des Energiesystems unerlässlich und daher ein erheblicher Ausbau von erneuerbaren Energieerzeugungstechnologien sowie Energiespeicherungs- und Konversionstechnologien erforderlich. Daher können Microgrids und Energiegemeinschaften zur dezentralisierten und gemeinwohlorientierten Energieverteilung einen wesentlichen Beitrag leisten. Die technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Potenziale wurden in den vorhergehenden Unterkapiteln ausführlich dargelegt. So wird das Marktpotenzial für Microgrids im Jahr 2030 in Europa bei etwa 2,3 Mrd. € prognostiziert. Weiters zeigte die Potenzialstudie zum Einsatz übergeordneter Systemreglern auf, dass durch optimierte Auslegung und optimalem Betrieb von Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften bei gleichbleibenden Kosten bis zu 90% der Emissionen im Vergleich zum aktuellen Ist-Stand reduziert werden können. Ein weiteres Szenario betrachtete die Auslegung von Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften im Jahr 2030. Die höchsten Potenziale gehen aus der Kombination von optimierter Auslegung und optimierter Betriebsführung hervor, welche auf der gleichen Optimierungsmethodik beruhen.

## 6 Koordination mit COMET und Weiterentwicklung Richtung TRL 6-7

Die Entwicklungen im Grundlagenforschungsprojekt haben bereits zu einigen weiterführenden Kooperationen mit nationalen und internationalen Partnern sowie weiterführenden Projekten geführt. So fließen die Entwicklungen maßgebend in das laufende FFG COMET Programm ein und trägt dazu bei, die Forschung weiterzuführen und weiter zu vertiefen. Aufbauend auf den Entwicklungen im Projekt wird unter anderem die Zusammenarbeit mit einem kalifornischen Start Up intensiviert und es besteht großes Interesse an der weiteren Nutzung der entwickelten Algorithmen.

Darüber hinaus wurden bereits Konzepte für die Weiterentwicklung vor allem hinsichtlich der Einbindung von mehreren Standorten in Richtung Erneuerbare Energiegemeinschaften sowohl im Rahmen des COMET-Programms, als auch im Rahmen diverser weiterer FFG Projekte (z.B. „Stadt der Zukunft“ Ausschreibung) in Kooperation mit Niederösterreichischen KMUs und Gemeinden initiiert.

Bereits in der Endphase des Projekts kam es zu einer starken Einbindung der Entwicklungen aus dem Grundlagenforschungsprojekt in COMET Projekte. So wurden die übergeordneten Systemregelungsalgorithmen bereits im COMET Projekt C-52-077-0 „Zelluläre Energiesysteme“ und der Erweiterung in Richtung Erneuerbare Energiegemeinschaften mit dem Energieversorger KELAG unter Laborbedingungen eingesetzt und Erweiterungen vorgenommen.

Des Weiteren erfolgte die Ausweitung in Richtung Integration von E-Ladeinfrastruktur für Elektroautos im Zuge der beiden COMET Projekte C-52-076-0 und C-52-080-0 „OptInvest“ und OptControl“ welche noch bis März 2023 laufen. Durch die Erweiterung des Microgrid Forschungslabors am TFZ Wieselburg mit E-Ladeinfrastruktur erfolgt die Weiterentwicklung des übergeordneten Systemreglers in Richtung E-Mobilität. Das soll zukünftig die optimale Einbindung der E-Ladeinfrastruktur sowie den optimierten technischen und wirtschaftlichen Betrieb von Ladesäulen ermöglichen. Im ersten Schritt wurde die optimale Integration von E-Ladeinfrastruktur und E-Fahrzeugen in die bestehende Infrastruktur erforscht. Die Berücksichtigung von Elektro-Mobilitätsspezifischen Rahmenbedingungen erfolgte bereits in der Planung. Im Betrieb wurden unterschiedliche Use Cases betrachtet und getestet wie etwa die Integration von E-Ladeinfrastruktur aus Netzsicht (zur Vermeidung von Engpässen im Netz oder kostenintensiven Netzausbau), die Maximierung der Ladung durch eigen erzeugten PV-Strom und das Reagieren auf Marktsignale im Ladevorgang. Dabei wurde auf die im Grundlagenforschungsprojekt entwickelte Struktur aufgebaut und hier bereits ein großer Schritt in Richtung Prototyp in der Einsatzumgebung ( TRL 6) gemacht.

In weiteren Schritten erfolgt sowohl die Weiterentwicklung von Vorhersagemodellen für die optimale Steuerung von Microgrids, als auch die Entwicklung von Cloud-basierten API's und GUIs für den SMG-Regler im Zuge der beiden oben erwähnten COMET Projekte.

Darüber hinaus wurde ein zusätzliches COMET Projekt „InterCom“ initiiert, welches die Erweiterung der Schnittstellen von Systemregelung und unterschiedlichen Technologien und Standorten behandelt. Dabei liegt der Fokus auf der Kommunikation der Systemregelung und Testanlagen, welche über die Tests im Labor hinausgehen. Vor allem die schnelle und effiziente Einbindung von unterschiedlichen Technologien und Infrastrukturen in die Systemregelungsumgebung wird zukünftig eine entscheidende Rolle spielen. Daher ist es essentiell eine Kommunikations- und Forschungsumgebung aufzubauen, welche sich so weit als möglich an unterschiedlichste Gegebenheiten anpasst.

Das Grundlagenforschungsprojekt hat auch für Projekte abseits des COMET-Programmes eine wichtige Grundlage gebildet und die Entwicklungen werden dort kontinuierlich vorangetrieben. So werden im NETSE Projekt (FFG Projekt Nummer 890977) vor allem die Aspekte der Darstellung von Energieströmen, sowie die Integration aller Messdaten in eine leicht verständliche Plattform für Teilnehmer von Energiegemeinschaften behandelt. Aufbauend auf diese Daten und Plattformen können durch den Einsatz der übergeordneten Systemregelung regional Erneuerbare Energieträger effizienter in lokale Lösungen integriert werden.

Im Projekt SmartControl (FFG Projekt Nummer FO999886976) ist das übergeordnete Ziel widerstandsfähige, standardisierte und einfache kommunale Energiekonzepte / Microgrids zu entwickeln, zu testen und zu implementieren. Das Projekt, welches im Zuge der Ausschreibung „Stadt der Zukunft“ eingereicht wurde, beschäftigt sich mit dem Aufbau und der Entwicklung einer standardisierten Schnittstelle zwischen einem Open-Source Gebäudemanagement, der Anbindung von unterschiedlichen Technologien mittels einfacher Hardware-Gateways und der Integration eines prädiktiven Energiemanagements. Das Konzept wird es erlauben, Elektromobilität, stationäre elektrische Speicher, Photovoltaik, Biomasse und andere dezentrale Energietechnologien für Strom, Wärme und Kälte einfach in das Energienetz einzubinden. Auf Basis der bereits geleisteten Forschungsarbeiten soll ein standardisiertes Implementierungsverfahren für Kommunen entwickelt werden, welches kostengünstig und zügig vom Energieversorger implementiert werden kann. Sowohl die standardisierte Implementierung als auch der standardisierte Betrieb werden anhand der KEM-Gemeinde Yspertal und der Stadtgemeinde Wieselburg getestet.

.

## 7 Publikationen

Folgende Publikationen (Peer Reviewed, Konferenzbeiträge), Dissertationen und Masterarbeiten wurde im Zuge des Projekts abgeschlossen:

Muhammad Mansoor, Michael Stadler, Hans Auer: “ *Planning and Operation Strategies of Microgrids in Decarbonized Multi-Energy Systems*”, Dissertation, TU Wien, Österreich, April 2022

Armin Cosic, Michael Stadler, Muhammad Mansoor, Michael Zellinger: “*Mixed-integer linear programming based optimization strategies for renewable energy communities*”, Energy, 23. July 2021, ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121559>

Muhammad Mansoor, Michael Stadler, Hans Auer, Michael Zellinger: “*Advanced optimal planning for microgrid technologies including hydrogen and mobility at a real microgrid testbed*”, International Journal of Hydrogen Energy, 8. April 2021, ISSN 0360-3199, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.03.110>.

Mansoor Muhammad, Michael Stadler, Michael Zellinger, Klaus Lichtenegger, Hans Auer, Armin Cosic: “*Optimal Planning of Thermal Energy Systems in a Microgrid with Seasonal Storage and Piecewise Affine Cost Functions*”, Energy Journal by Elsevier, Volume 215, 15 January 2021, ISSN: 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119095>.

Lichtenegger K, Leitner A, Märzinger T, Mair C, Moser A, Wöss D, Schmidl C, Pröll T. *Decentralized heating grid operation: A comparison of centralized and agent-based optimization*. Sustainable Energy, Grids and Networks. 2020;2020(21).

“*Alm Talk Pioneers Energy Communities*,” European Forum Alpbach 2020, Moderation Michael Losch, Panel Participants Michael Stadler, Raphaela Reinfeld, Andreas Schneemann, Thomas Nacht, Alpbach, Austria, 1 September 2020, <https://www.youtube.com/watch?v=dIP5x2c3u6Y> .

Lichtenegger K, Unterberger V, Stadler M, Zellinger M, Carreras F, Moser A. *Thermal Trouble: Challenges in Optimization and Evaluation of Thermal Energy Systems*. IAPE 2019 : International Conference on Innovative Applied Energy (oral presentation). March 2019

Liedtke Pascal, Franz Hengel, Michael Stadler: “*Simulation von Kosten und CO<sub>2eq</sub> reduzierenden Energieeinsparungen eines Microgrids anhand einer mathematischen Optimierung*”, Masterarbeit, Fachhochschule Pinkafeld, Österreich, 1. August 2020

Liedtke Pascal, Michael Stadler, Michael Zellinger, Franz Hengel: “*Ganzheitliche Planung dezentraler Energiekonzepte durch mathematische Optimierung*”, e-nova Konferenz, Pinkafeld, Österreich, 12 - 22. November 2019

Hermann Christoph, Josef Walch, Michael Zellinger: “*Gebäudeübergreifender Energieaustausch-Eine Methodeninnovation des Mieterstrommodells als Erweiterung des Microgridgedanken*”, Masterthesis, Fachhochschule Wiener Neustadt – Campus Wieselburg, 14. Juli 2019

Oberbauer Christian, Franz Theuretzbacher, Michael Zellinger: “*Optimization of Renewable Based Microgrids – Use Case Lower Austria*”, Masterthesis, Fachhochschule Wiener Neustadt – Campus Wieselburg, 4. September 2020

Stadler Michael: „*Optimization Based Design and Control of Distributed Energy Resources and Microgrids*,“ LetsCluster, Lighthouse Summit in the heart of Europe: Smart Energy Generation – Management – Optimization, Smart Home / Building, Interface to the Smart Grid, Microgrids, electric grid of the future, sector linking, Graz, Österreich

## 8 Ausblick und Empfehlungen

Im Grundlagen-Forschungsprojekt wurde eine breite Basis für den Ausbau der Führerschaft im Bereich der übergeordneten Systemregelung von dezentralen Energiesystemen geschaffen. Im Projekt konnte anhand unterschiedlicher Tests das Funktionsprinzip nachgewiesen werden und im Zuge von unterschiedlichen Use Cases das Potenzial sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene aufgezeigt werden. Es wurden bereits einige auf den Forschungsarbeiten aufbauende Nachfolgeprojekte initiiert und gestartet, um die laufenden Entwicklungen auf ein höheres TRL Level zu heben und mit Partnern in die Umsetzung zu bringen.

Eine zukünftig strategisch wichtige Erweiterung stellt die Integration der Wasserstofftechnologie dar. So könnte dies etwa die Herstellung und die Nutzung von grünem Wasserstoff umfassen. Dies sollte von der Entwicklung von Lösungen zur Einbindung aus Energiesystemsicht bis hin zur realen Testung in Forschungslaboren gehen. Dazu ist geplant, künftige Forschungsprojekte am Standort Wieselburg zum Thema Wasserstoff und netzunterstützenden Regelstrategien zu initiieren.

Des Weiteren werden die Prognosealgorithmen, ein Kernstück der Systemregelung, hinsichtlich Genauigkeit, Übertragbarkeit und Anpassungsfähigkeit weiter beforscht und entwickelt. Dabei spielt die Übertragbarkeit der Algorithmen auf sehr unterschiedliche Anwendungsfälle (private Haushalte, Bürogebäude, öffentliche Gebäude, Industrie) eine wesentliche Rolle. Auch neue Methoden der gemeinschaftlichen Prognosen über die Nutzung von Daten aus z.B. Nachbarschaften, um den PV Ertrag noch besser abschätzen zu können (Wolkenbewegungen), werden eine wichtige Rolle spielen. Ein wesentlicher Erfolgsfaktor wird in Zukunft die Frage der Schnittstellen und Kommunikation spielen. Hier ist es unumgänglich, Standards zu schaffen, um sicherzustellen, dass unterschiedliche Technologien und Plattformen miteinander kommunizieren können.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Integration von übergeordneten Systemreglern in dezentralen Energiesystemen wie Energiegemeinschaften, Microgrids oder Zellulären Energiesystemen von wesentlicher Bedeutung ist. Diese dezentralen Energiesysteme haben das Potenzial, das bestehende Energiesystem grundlegend zu verändern und nachhaltig zu verbessern. Um die derzeit bestehenden und zukünftig installierten Technologien innerhalb dieser dezentralen Energiesysteme möglichst effizient zu betreiben, benötigt es intelligente Lösungen wie den erforschten übergeordneten Systemregler, welcher die Energie- und Kostenflüsse optimiert sowie resultierende Emissionen reduziert.

Dabei ist es vor allem wichtig, bereits in der Planung von Energiesystemen und Energielösungen einen ganzheitlichen Ansatz zu verfolgen. Dieser sollte in der Lage sein, die unterschiedlichen Sektoren (Wohnen, Industrie, Gewerbe, Mobilität) und die Sektorkopplung (Strom, Wärme und Kälte) abzubilden, um Synergien zu berücksichtigen und die Effizienz zu steigern. Darüber hinaus sollte bereits in der Planung ein optimaler Betrieb, welcher später durch eine übergeordnete vorausschauende Regelung sichergestellt wird, mitberücksichtigt werden. Nur so kann

sichergestellt werden, dass zukünftig optimale Energieversorgungs-Lösungen implementiert und im Sinne der Klima- und Energieziele umgesetzt werden.

## 9 Verzeichnisse

Verzeichnisse automatisch aus z.B. Tabellen- und Abbildungsbeschriftungen erstellen

### 9.1 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammenfassung der Technologien Stand 2019	8
Tabelle 2: Stromimporte Österreichs und deren CO <sub>2</sub> -Belastungen	9
Tabelle 3: Stromspezifische CO <sub>2</sub> -Emissionen pro Monat [kg/kWh <sub>el</sub> ]	10
Tabelle 4: Vorhersageergebnisse nach Algorithmus	26
Tabelle 5: Vorhersageergebnisse nach Merkmalen	27
Tabelle 6: Ergebnisse der Optimierungsberechnung	39
Tabelle 7: Technische Potenziale von Microgrids am Wohnsektor in Niederösterreich (Oberbauer, 2020).	50
Tabelle 8: Ergebnisübersicht des Szenario 1 der Use Cases MFH und SFH.	51

### 9.2 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur der Aufbringung von elektrischem Strom in Österreich, gesamte Versorgung im Jahr 2016 (BMNT, 2017) .....	9
Abbildung 2: MPC Framework (BEST GmbH) .....	11
Abbildung 3: Schematische Darstellung des SMG-Regler-Frameworks auf MPC-Basis. ....	13
Abbildung 4: Systemarchitektur des übergeordneten Systemreglers .....	14
Abbildung 5: Eine typische Modbus-TCP-Kommunikation über Ethernet .....	16
Abbildung 6: Typisches Diagramm eines M-Bus-basierten Kommunikationsnetzwerks .....	17
Abbildung 7: Schematische Darstellung einer REST API Kommunikation .....	18
Abbildung 8: Schematische Funktionsweise der FTP-Kommunikation .....	18
Abbildung 8: FFT-Prozess .....	19
Abbildung 10: Im Retrain-Zyklus verwendete Metriken zur Vorhersagegenauigkeit .....	20
Abbildung 11: Vergleich Lastprognosemethoden .....	20
Abbildung 12: Prognosemodul: Datenflussdiagramm .....	22
Abbildung 13: Komponenten des Prognosemoduls .....	23
Abbildung 14: Prognosemethode .....	24
Abbildung 15: Walk-Forward Cross-Validation .....	25
Abbildung 16: Vergleich der Algorithmen .....	26
Abbildung 17: Optimaler Umschaltpunkt zwischen Modell 1 und 2 .....	27
Abbildung 18: 48h-Ahead-Prognose der elektrischen Last, Modell 1 gegenüber Modell 2 .....	28

Abbildung 19: Darstellung der erfassten, elektrischen Energiemonitoringdaten. Die blaue Linie entspricht der Lade-/Entladeleistung der Batterie, die gelbe Linie der PV Leistung, die grüne Linie entspricht dem Netzbezug bzw. der Netzeinspeisung und die rote Linie dem Stromverbrauch ..... 29

Abbildung 20: Darstellung der PV Leistung (gelb), der gemessenen Globalstrahlung (grün) und der PV Performance Ratio (rechte Abbildung oben). ..... 29

Abbildung 21: Darstellung der E-Ladeleistung und der zuletzt genutzten E-Fahrzeuge mittels RFID Tag. .... 30

Abbildung 22 Darstellung der gemessenen Pufferspeichertemperaturen: Farblich sind die verschiedenen Temperaturniveaus des thermischen Pufferspeichers dargestellt (insgesamt sechs verschiedene Niveaus). ..... 30

Abbildung 23: Darstellung der gemessenen Wetterdaten: Absoluter Luftdruck (hellgrün), Lufttemperatur (dunkelgrün), Globalstrahlung (gelb), Windgeschwindigkeit (rot), relative Feuchtigkeit (blau). ..... 31

Abbildung 24: Darstellung der prognostizierten Wetter-/Strahlungsdaten: Globalstrahlung (gelb), Direktstrahlung (rot), Diffusstrahlung (hellblau), Temperatur (grün), Bewölkungsgrad (dunkelblau). ..... 31

Abbildung 25: Darstellung einer Erneuerbaren-Energie-Gemeinschaft bestehend aus zehn Wohngebäuden und einem Community-Batteriespeicher..... 33

Abbildung 26: Potenzielle Standorte für Erneuerbare-Energie-Gemeinschaften in der Gemeinde Gresten (MFH=Mehrfamilienhaus, SFH=Einfamilienhaus). Eigene Darstellung, verändert nach (Basemap, 2021). ..... 35

Abbildung 27: Schema des Microgrid Forschungslabor in Wieselburg (Quelle: BEST GmbH).. 37

Abbildung 28: Luftaufnahme des TFZ-Wieselburg und des neuen Feuerwehrhauses mit PV-Anlage (Copyright BEST GmbH; Michael Stadler)..... 40

Abbildung 29: Technologie- und Forschungszentrum (TFZ) Wieselburg (Quelle: ecoplus) ..... 40

Abbildung 30: Darstellung des übergeordneten Systemregler (SMG-Regler) Testsystems mit FEMS und der externen Hardware am Microgrid Lab, Wieselburg (Quelle: OpenEMS, angepasst durch BEST GmbH) ..... 41

Abbildung 31: Einbindung in das Microgrid Test Lab ..... 42

Abbildung 32: Standard-Regelung ..... 43

Abbildung 33: Übergeordnete Regelung reagiert auf Marktsignale und reduziert Lastspitze ..... 43

Abbildung 34: Die schematische MPC-Systemarchitektur für den Open-Loop-Test in EEG-Fallstudie. .... 45

Abbildung 35: Das schematische Energieflussdiagramm der entsprechenden EEG-Fallstudie mit den vorhandenen Energietechnologien bzw. Flexibilitäten. .... 46

Abbildung 36: Darstellung des optimalen Einsatzfahrplanes für alle Stromtechnologien unter Berücksichtigung von Marktpreissignalen ..... 47

Abbildung 37: Der prognostizierte EPEX Spot-Marktpreisverlauf auf Stundenbasis für die nächsten betrachteten 24 Stunden .....	47
Abbildung 38: Gliederung Niederösterreichs in drei Regionen sowie Standorte der Referenzgemeinden .....	49

## 10 Literaturverzeichnis

- Alig M., Tschümperlin L., Frischknecht R. (2017): Treibhausgasemissionen der Strom- und Fernwärmemixe Schweiz gemäss GHG Protocol
- Abart-Heriszt, L., Erkerand, S., & Reicheland, S. (2019). Energiemosaik Austria - österreichweite Visualisierung von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen auf Gemeindeebene. Von [www.energiemosaik.at](http://www.energiemosaik.at) abgerufen
- Acute Market Reports. (4 2020). Microgrid Control System Market. Von <https://www.acutemarketreports.com/report/microgrid-control-system-market> abgerufen
- Andreas Tuerk, C. N. (7 2021). DECIDE - Developing Energy Communities through informative and collective actions. Von [https://decide4energy.eu/fileadmin/user\\_upload/Resources/DECIDE\\_D3.1\\_final.pdf](https://decide4energy.eu/fileadmin/user_upload/Resources/DECIDE_D3.1_final.pdf) abgerufen
- APCS (2018): Synthetische Lastprofile; zuletzt abgerufen am 24.08.2018; <https://www.apcs.at/de/clearing/technisches-clearing/lastprofile>
- Austrian Energy Agency (2018): Entwicklung des Österreichischen Strompreisindex [online]; zuletzt abgerufen am 27.09.2018; <https://www.energyagency.at/fakten-service/energie-in-zahlen/strompreisindex/chart-strompreisindex.html>
- Austrian Standards. (2019). ÖNORM B 8110-5, 2019: Wärmeschutz im Hochbau, Teil 5: Klimamodell und Nutzungsprofile.
- Basemap. (2021). Von <https://basemap.at/> abgerufen
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (2017): Datenerhebung 2016 - Bundesmix 2016; zuletzt abgerufen am 26. März 2018; <https://www.bdew.de/media/documents/Bundesmix-2016-Stromkennzeichnung.pdf>.
- Biermayr Peter, Dißauer Christa, Eberl Manuela, Enigl Monika, Fechner Hubert, Leonhartsberger Kurt, Maringer Florian, Moidl Stefan, Schmidl Christoph, Strasser Christoph, Weiss Werner, Wonisch Patrik, Wopienka Elisabeth (2017): Innovative Energietechnologien in Österreich – Marktentwicklung 2016, Bundesministerium für Verkehr, Innovationen und Technologien BMVIT; Bericht aus Energie- und Umweltforschung
- BioMaxEff (2013): Cost efficient biomass boiler systems with maximum annual efficiency and lowest emissions; European Union Seventh Framework Programme; Grant agreement n° 268217
- Bischof Dieter (2018): Neue Förderung für Batteriespeicher und PV-Anlagen [online]; Energie-institut Vorarlberg; zuletzt abgerufen am 09.10.2018; <https://www.energieinstitut.at/neue-foerderung-fuer-batteriespeicher/>
- BMNT Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (2017): Entwicklung in Österreich – Datenbasis 2016
- Bogenstätter, U. (2007). Flächen- und Raumkennzahlen. Von [www.ifbor.eu](http://www.ifbor.eu) Institute for Building Operations Research at Nürtingen-Geislingen University; <http://www.ifbor.eu/resources/ifBOR+FRZ+2007-10+S1-10.pdf> abgerufen

- Boston Consulting Group (2017): Elektrofahrzeuge werden ab 2030 voraussichtlich die Hälfte des weltweiten Automobilmarktes ausmachen; Press Release, zuletzt abgerufen am 16.07.2018; [https://www.bcg.com/de-at/d/press/06Nov2017-PM\\_The-Electric-Car-Tipping-Point-175834](https://www.bcg.com/de-at/d/press/06Nov2017-PM_The-Electric-Car-Tipping-Point-175834)
- BUNDESMINISTERIUM für DIGITALISIERUNG und WIRTSCHAFTSSTANDORT (2018): Klimadatenrechner; zuletzt abgerufen am 09.10.2018; <https://www.bmwf.gv.at/EnergieUndBergbau/klimadatenrechner/Seiten/ZurBerechnung.aspx>
- CE Delft. (11 2016b). Excel-Workbook of the Study "The potential of energy citizens in the European Union". Von <https://ce.nl/wp-content/uploads/2016/11/CE-Delft-Energy-Citizens-Workbook-results-only-fixed-link.xlsx> abgerufen
- CE Delft. (2016a). The potential of energy citizens in the European Union. Delft. Von CE Delft: [https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/CE\\_Delft\\_3J00\\_Potential\\_energy\\_citizens\\_EU\\_final.pdf](https://cedelft.eu/wp-content/uploads/sites/2/2021/04/CE_Delft_3J00_Potential_energy_citizens_EU_final.pdf) abgerufen
- CEE. (2021). Community Energy England. Von Community Energy State of the Sector Report 2021: [https://communityenergyengland.org/files/document/523/1624438045\\_UKSOTSReport.pdf](https://communityenergyengland.org/files/document/523/1624438045_UKSOTSReport.pdf) abgerufen
- Czech Statistical Office. (2020). Population Prague. Von [https://www.czso.cz/documents/10180/143060163/33012321\\_06.xlsx/4ea7e729-822a-4863-b531-51fc9a066d03?version=1.5](https://www.czso.cz/documents/10180/143060163/33012321_06.xlsx/4ea7e729-822a-4863-b531-51fc9a066d03?version=1.5) abgerufen
- Data Bridge Market Research. (11 2020). Europe Microgrid Market – Industry Trends and Forecast to 2027. Von <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/europe-microgrid-market> abgerufen
- DECIDE. (2020a). Pilots - Belgium. Von <https://decide4energy.eu/the-pilots/belgium> abgerufen
- DECIDE. (2020b). Pilots - Austria. Von <https://decide4energy.eu/the-pilots/austria> abgerufen
- Dick Magnusson, J. P. (19. 12 2019). Come Together—The Development of Swedish Energy Communities. Sustainability(11(4)), S. 1056. doi:<https://doi.org/10.3390/su11041056>
- Digital Journal. (2020). Global Microgrid Market via Grand View Research. Von <http://www.digitaljournal.com/pr/5022977> abgerufen
- Dragan Djurdjanovic. (2017). Process and Operations Control in Modern Manufacturing. ASME 2017 12th International Manufacturing Science and Engineering Conference collocated with the JSME/ASME 2017 6th International Conference on Materials and Processing , Volume 3: Manufacturing Equipment and Systems, 22. Los Angeles, California, USA. doi:<https://doi.org/10.1115/MSEC2017-3104>
- e5 Landesprogramm für energieeffiziente Gemeinden (2017): Infoblatt CO2; zuletzt abgerufen am 24. Juli 2018; <https://e5-salzburg.at/e5-service/service-hf6.php>
- EAG. (16. 11 2021). Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz § 4, Fassung vom 16.11.2021. Von RIS - Rechtsinformationssystem des Bundes: <https://www.ris.bka.gv.at/NormDokument.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011619&FassungVom=2021-11-16&Artikel=&Paragraf=4&Anlage=&Uebergangsrecht=> abgerufen

- ECB. (kein Datum). Euro foreign reference exchange rate. Von [https://www.ecb.europa.eu/stats/policy\\_and\\_exchange\\_rates/euro\\_reference\\_exchange\\_rates/html/eurofxref-graph-usd.de.html](https://www.ecb.europa.eu/stats/policy_and_exchange_rates/euro_reference_exchange_rates/html/eurofxref-graph-usd.de.html) abgerufen
- E-Control GmbH (2017): Verteilungs- und Erzeugungsanlagen in Österreich 2016, Daten verfügbar auf [www.e-control.at](http://www.e-control.at)
- E-Control GmbH\* (2017): Einspeisetarife und Marktpreise, zuletzt abgerufen am 25.09.2018; <https://www.e-control.at/konsumenten/oeko-energie/kosten-und-foerderungen/einspeisetarife-marktpreise>
- E-Control. (2020). Strom selbst erzeugen. Ein Modell der Zukunft? Von [https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/Prosumer\\_FINAL.pdf](https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/Prosumer_FINAL.pdf) abgerufen
- E-Control. (2021). Energiegemeinschaften. Abgerufen am 2021 von <https://www.e-control.at/energiegemeinschaften>
- E-Control. (2021). Leistungspreise 2020-2021. Von <https://www.e-control.at/documents/1785851/1811582/Entgelte-SNE-V-Novelle-21.xlsx/86f1c0d3-72a5-bb8d-8e68-aa77156a689e?t=1608300560685> abgerufen
- E-Control. (2021). Strompreisentwicklung 2019-2020. Von [https://www.e-control.at/documents/1785851/1811618/MStOeN-2020\\_Preise.xlsx/d2d73f26-621a-08c6-565a-d1b157584991?t=1601530634668](https://www.e-control.at/documents/1785851/1811618/MStOeN-2020_Preise.xlsx/d2d73f26-621a-08c6-565a-d1b157584991?t=1601530634668) abgerufen
- EcoPlus (2018): Förderungen für Elektromobilität in Niederösterreich, zuletzt abgerufen am 09.10.2018; <https://www.ecoplus.at/interessiert-an/cluster-kooperationen/elektromobilitaetsinitiative-e-mobil-in-niederoesterreich/foerderungen/>
- Edwards, Skai, Beausoleil-Morrison, Ian und Laperrière, André. (2015): Representative hot water draw profiles at high temporal resolution for simulating the performance of solar thermal systems. Solar Energy
- Eicker Ursula (2009): Low Energy Cooling for Sustainable Buildings, Verlag John Wiley & Sons, Seite 219
- Enamo Ökostrom (2013): Heizsysteme im Kostenvergleich; Energie AG Oberösterreich, zuletzt abgerufen am 23. Juli 2017; <http://www.enamo-oekostrom.at/Zusatz/>
- Energati. (2018). Europe Microgrid Market: A Boon In Renewable Energy Sources. Von <https://www.engerati.com/energy-retail/europe-microgrid-market-a-boon-in-renewable-energy-sources/> abgerufen
- Energie Partagee. (2021). Les chiffres clés de l'énergie citoyenne. Von <https://energie-partagee.org/decouvrir/energie-citoyenne/chiffres-cles/> abgerufen
- EPEX (2018): Auction Status [online]; zuletzt abgerufen am 27.09.2018; <https://www.epexspot.com/de/>
- Euractiv. (22. 7 2021). Analyst - EU carbon price on track to reach €90 by 2030. Von <https://www.euractiv.com/section/emissions-trading-scheme/interview/analyst-eu-carbon-price-on-track-to-reach-e90-by-2030/> abgerufen
- European Environment Agency (2017): Overview of electricity production and use in Europe; zuletzt abgerufen am 26.03.2018; <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/overview-of-the-electricity-production-2/assessment>
- Eurostat. (17. 8 2021b). Treibhausgasemissionen nach Quellsektor (Quelle: EUA). Von [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env\\_air\\_gge/default/table?lang=de](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_air_gge/default/table?lang=de) abgerufen

- Eurostat. (2019). Durchschnittliche Haushaltsgröße - EU-SILC Erhebung. Von [http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ilc\\_lvph01&lang=de](http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=ilc_lvph01&lang=de) abgerufen
- Eurostat. (2021a). Population on 1st January by age, sex and type of projection. Von [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/proj\\_19np/default/table?lang=en](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/proj_19np/default/table?lang=en) abgerufen
- Fischer, David, et al. (2016): A stochastic bottom-up model for space heating and domestic hot water load profiles for German households, *Energy and Buildings*, 124.
- FNR. (2013). Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Von [https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/handbuch\\_bioenergie-kleinanlagen-komplett.pdf](https://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/handbuch_bioenergie-kleinanlagen-komplett.pdf) abgerufen
- Forschungsstelle für Energiewirtschaft FfE (2016): Kostenanalyse Wärmespeicher bis 10.000 l Speichergröße – Stand Dezember 2016; Wärmespeicher, zuletzt abgerufen am 11.07.2018; <https://www.ffe.de/publikationen/veroeffentlichungen/659-kostenanalyse-waermespeicher-bis-10-000-l-speichergroesse>
- FTEE. (2020). Friends of the Earth Europe. Von *Stories from the frontlines of climate hope*: <https://friendsoftheearth.eu/news/la-corriente-in-spain-solar-panels-for-the-solidarity-economy/> abgerufen
- GEL. (2020). GreenEnergyLab. Von *Energiegemeinschaften - Neue Geschäftschancen für die grüne Energiezukunft*: [https://greenenergylab.at/wp-content/uploads/2020/04/gtc\\_energiegemeinschaften\\_radar\\_3\\_2020\\_web-002.pdf](https://greenenergylab.at/wp-content/uploads/2020/04/gtc_energiegemeinschaften_radar_3_2020_web-002.pdf) abgerufen
- GI. (Q3 2019). Guidehouse Insights - Microgrids Overview. Von <https://guidehouseinsights.com/reports/microgrids-overview> abgerufen
- GI. (Q4 2020). Guidehouse Insights - Market Data: Microgrid Controls. Von <https://guidehouseinsights.com/reports/market-data-microgrid-controls> abgerufen
- Global Market Insights. (2020). Microgrid Market. Von <https://www.gminsights.com/industry-analysis/microgrid-market> abgerufen
- Guidehouse Insights. (Q3 2019). Microgrids Overview. Von <https://guidehouseinsights.com/reports/microgrids-overview> abgerufen
- Guidehouse Insights. (Q4 2020). Market Data: Microgrid Controls. Von <https://guidehouseinsights.com/reports/market-data-microgrid-controls> abgerufen
- Haas R., Stieldorf K., Wilk H., López-Polo A., Faninger G. (2003): Photovoltaik in Gebäuden; IEA Task 7; Bundesministerium für Verkehr, Innovationen und Technologien BMVIT; Bericht aus Energie- und Umweltforschung
- Hartmann Hans, Reisinger Klaus, Turowski Peter, Roßmann Paul (2013): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen, Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V.
- Hier Opgewekt. (2019). Lokale Energie Monitor 2019. Von [https://www.hieropgewekt.nl/uploads/inline/Lokale%20Energienmonitor%202019\\_DEF\\_feb2020\\_2.pdf](https://www.hieropgewekt.nl/uploads/inline/Lokale%20Energienmonitor%202019_DEF_feb2020_2.pdf) abgerufen
- IEA ETSAP & IRENA. (2013). Thermal Energy Storage. Von [https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E17IR%20ThEnergy%20Stor\\_AH\\_Jan2013\\_final\\_GSOK.pdf](https://iea-etsap.org/E-TechDS/PDF/E17IR%20ThEnergy%20Stor_AH_Jan2013_final_GSOK.pdf) abgerufen

- IG Windkraft (2018): Windkraft in Niederösterreich – saubere Stromerzeugung mit kostenlosem Rohstoff, zuletzt abgerufen am 2.10.2018; [https://www.igwindkraft.at/fakten/?xmlval\\_ID\\_KEY%5B0%5D=1234](https://www.igwindkraft.at/fakten/?xmlval_ID_KEY%5B0%5D=1234)
- Imarc. (2020). Microgrid Market: Global Industry Trends, Share, Size, Growth, Opportunity and Forecast 2021-2026. Von <https://www.imarcgroup.com/microgrid-market> abgerufen
- IMF. (21. 6 2021). International Monetary Fund Blog - A Proposal to Scale Up Global Carbon Pricing. Von <https://blogs.imf.org/2021/06/18/a-proposal-to-scale-up-global-carbon-pricing/> abgerufen
- IndustryARC. (2020). Microgrid Market - Forecast(2021 - 2026). Von <https://www.industryarc.com/Report/16322/microgrid-market.html> abgerufen
- Inkwood Research. (2018). Europe Microgrid Market Forecast 2019-2027. Von <https://inkwoodresearch.com/reports/europe-microgrid-market/> abgerufen
- IRENA. (2021). Renewable Power Generation Costs in 2020. Von [https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA\\_Power\\_Generation\\_Costs\\_2020.pdf](https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2021/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2020.pdf) abgerufen
- Ivask, N. (27. 5 2021). Tartu Regiooni Energiaagentuur - Energy Communities Activities in Tartu. Von [https://www.trea.ee/wp-content/uploads/2021/05/6\\_Kogukonnaenergeetika-tegevused-Tartus.pdf](https://www.trea.ee/wp-content/uploads/2021/05/6_Kogukonnaenergeetika-tegevused-Tartus.pdf) abgerufen
- Jagnow K., Wolff D. (2003): Manuskript für “Der Energieberater”; Verlag Deutscher Wirtschafts-dienst, Köln, 2003; zuletzt abgerufen am 10.10.2018; <http://www.delta-q.de/export/sites/default/de/downloads/bhkw.pdf>
- Jursová, Simona (2018): Greenhouse Gas Emission Assessment from Environments. 5, 2018
- Karásek, J. (12. 7 2021). DECIDE - Developing Energy Communities through informative and collective actions. Von [https://decide4energy.eu/fileadmin/user\\_upload/News/2.\\_Initiation\\_of\\_Energy\\_Communities\\_in\\_the\\_Czech\\_Republic.pdf](https://decide4energy.eu/fileadmin/user_upload/News/2._Initiation_of_Energy_Communities_in_the_Czech_Republic.pdf) abgerufen
- Kleinwind-Markreport (2018): Die besten Kleinwindkraftanlagen in Deutschland; Ausgabe 2018; Version 5; zuletzt abgerufen am 24.07.2018; <https://www.kleinwindkraftanlagen.com/allgemein/preise-fuer-kleinwindkraftanlagen-fehlinvestitionen-vermeiden/>
- Klima- und Energiefonds KLIEN E-Mobilität (2018): E-Mobilität für Private; Förderprogramm Elektromobilität für E-PKW, E-Mopeds und E-Motorräder für Privatpersonen; zuletzt abgerufen am 09.10.2018; <https://www.klimafonds.gv.at/call/e-mobilitaet-fuer-private/>
- Klima- und Energiefonds KLIEN PV (2018): Photovoltaik-Anlagen; zuletzt abgerufen am 25.09.2018; <https://www.klimafonds.gv.at/call/photovoltaik-anlagen/>
- KlimaAktiv. (2020). Preisentwicklung der Holzsortimente. Von [https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:d8e333aa-8323-4ee0-a4ab-4c7635b497c9/Marktinformation\\_Preise\\_20042020\\_barrierefrei.pdf](https://www.klimaaktiv.at/dam/jcr:d8e333aa-8323-4ee0-a4ab-4c7635b497c9/Marktinformation_Preise_20042020_barrierefrei.pdf) abgerufen
- Klimaworld. (2021). Ochsner E-Heizstab 9kW. Von <https://www.klimaworld.com/ochsner-e-heizstab-extern-922509-6-0-kw.html> abgerufen
- Market Research Future. (2 2021a). Microgrid Controller Market Research Report. Von <https://www.marketresearchfuture.com/reports/microgrid-controller-market-7583> abgerufen

- Market Research Future. (2021b). Microgrid Control System Market Research Report. Von <https://www.marketresearchfuture.com/reports/microgrid-control-system-market-7992> abgerufen
- Markets And Markets. (2018). Microgrid Control System Market. Von <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/microgrid-control-system-market-242416568.html> abgerufen
- Markets And Markets. (2019). Microgrid Controller Market. Von <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/microgrid-controller-market-103650618.html> abgerufen
- Markets And Markets. (2020). Microgrid Market. Von <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/micro-grid-electronics-market-917.html> abgerufen
- Meteotest AG. (2021). Meteororm Software. <https://meteororm.com>.
- Mordor Intelligence. (2020). Microgrid Control Systems Market. Von <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/microgrid-control-system-market> abgerufen
- Naumann Maik, Truong Cong Nam, Karl Ralph, Jossen Andreas (2014): Betriebsabhängige Kosten-berechnung von Energiespeicher; Symposium Energieinnovationen TU Graz; zuletzt abgerufen am 20.08.2018; [https://www.tugraz.at/fileadmin/user\\_upload/Events/Eninnov2014/files/lf/LF\\_Naumann.pdf](https://www.tugraz.at/fileadmin/user_upload/Events/Eninnov2014/files/lf/LF_Naumann.pdf)
- NEWCOMERS - New Clean Energy Communities in a Changing European Energy System. (31.05.2020). Von [https://www.newcomersh2020.eu/upload/files/D3\\_1\\_Newcomers\\_Description\\_of\\_polycentric\\_settings\\_in\\_the\\_partner\\_countries.pdf](https://www.newcomersh2020.eu/upload/files/D3_1_Newcomers_Description_of_polycentric_settings_in_the_partner_countries.pdf) abgerufen
- NOE. (2019). Amt der Landesregierung Niederösterreich. Von NÖ Klima- und Energiefahrplan 2020 bis 2030: [https://www.noe.gv.at/noe/Energie/Klima-\\_und\\_Energiefahrplan\\_2020\\_2030.pdf](https://www.noe.gv.at/noe/Energie/Klima-_und_Energiefahrplan_2020_2030.pdf) abgerufen
- NREL. (2018). National Renewable Energy Laboratory - Phase I Microgrid Cost Study: Data Collection and Analysis of Microgrid Costs in the United States. Von <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/67821.pdf> abgerufen
- Oberbauer, C. (2020). Optimization of Renewable Based Microgrids - Use Case Lower Austria. Master's Thesis. Wieselburg.
- Ochsner (2015): Betriebsanleitung/Installationsanleitung; GMLW. s.l. : Ochsner, 2015
- OEE. (2021). Österreichs Energie. Von <https://oesterreichsenergie.at/aktuelles/neuigkeiten/detailseite/co2-bepreisung-die-weltweiten-modelle-im-vergleich> abgerufen
- OeMAG KWK (2018): Investitionsförderung für Kraft-Wärmekopplungsanlagen gemäß KWK-Gesetz; Förderrichtlinie 2018 (01.03.2018); zuletzt abgerufen am 09.10.2018; [https://www.oem-ag.at/fileadmin/user\\_upload/Dokumente/investitionsfoerderung/Informationsblatt\\_Investitionszuschuss\\_KWK-Anlagen\\_FRL2018.pdf](https://www.oem-ag.at/fileadmin/user_upload/Dokumente/investitionsfoerderung/Informationsblatt_Investitionszuschuss_KWK-Anlagen_FRL2018.pdf)
- OeMAG PV (2018): Investitionsförderung Photovoltaik; zuletzt abgerufen am 09.10.2018; <https://www.oem-ag.at/de/foerderung/photovoltaik/investitionsfoerderung/>

- OIB. (4 2019). Richtlinie 6 - Erläuternde bemerkungen. Von [https://www.oib.or.at/sites/default/files/erlaeuternde\\_bemerkungen\\_richtlinie\\_6\\_12.04.19\\_0.pdf](https://www.oib.or.at/sites/default/files/erlaeuternde_bemerkungen_richtlinie_6_12.04.19_0.pdf) abgerufen
- Ökoenergie (2018): Zeitschrift „Die Ökoenergie“ – Zeit(ung) zur Energiewende; Ausgabe 110; Energie- und Rohstoffpreise; Stand 28.06.2018
- ÖSET-VO 2018 (2017): Bundesgesetzblatt zu Ökostrom-Einspeisetarifverordnung 2018, Verordnung 408., Teil II; zuletzt abgerufen am 25.09.2018; [https://www.e-control.at/documents/20903/388512/BGBLA\\_2017\\_II\\_408.pdf/](https://www.e-control.at/documents/20903/388512/BGBLA_2017_II_408.pdf/)
- Österreichischer Biomasse Verband (2018): Energieträger-Vergleich, Juni 2018, zuletzt abgerufen am 09.07.2018; <http://www.biomasseverband.at/service/energietraegervergleich>
- Österreichischer Wirtschaftsverlag GmbH (2017): Marktübersicht Wärmepumpen; Gebäude Installation 2017
- Österreichisches Forschungs- und Prüfzentrum Arsenal GmbH (2007): SolareS Kühlen für Büro- und Dienstleistungsgebäude, MA 27, Stand Dezember 2007
- OurPower. (2021). Von <https://www.ourpower.coop/> abgerufen
- OW. (2021a). Ochsner AIR 41 C12A Datenblatt. Von Ochsner Wärmepumpen GmbH: [https://www.ochsner.com/fileadmin/downloads/OP/287060-AIR%2041%20C12A\\_DE.pdf](https://www.ochsner.com/fileadmin/downloads/OP/287060-AIR%2041%20C12A_DE.pdf) abgerufen
- OW. (2021b). AIR EAGLE 414 C11B G1-1. Von Ochsner Wärmepumpen GmbH: [https://www.ochsner.com/fileadmin/downloads/OP/285630-AIR%20EAGLE%20414%20C11B%20G1-1\\_DE.pdf](https://www.ochsner.com/fileadmin/downloads/OP/285630-AIR%20EAGLE%20414%20C11B%20G1-1_DE.pdf) abgerufen
- Pape Carsten (2014): Endbericht zu „Roadmap Speicher“; Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik; Seite 54; zuletzt abgerufen am 18.07.2018; [http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische\\_Papiere\\_FVEE/14.IWES\\_Roadmap-Speicher/14\\_IWES-etal\\_Roadmap\\_Speicher\\_Langfassung.pdf](http://www.fvee.de/fileadmin/publikationen/Politische_Papiere_FVEE/14.IWES_Roadmap-Speicher/14_IWES-etal_Roadmap_Speicher_Langfassung.pdf)
- Pflugradt, N. (2020). LoadProfileGenerator. Von <http://www.loadprofilegenerator.de> abgerufen
- Politecnico Milano. (2014). Smart Grid report. [energystrategy.it](http://energystrategy.it): Politecnico Milano, Dipartimento Di Ingegneria Gestionale.
- PV-Austria. (2016). Leitfaden zu PV-Eigenverbrauchsmodellen. Von [https://www.pvaustria.at/wp-content/uploads/2016-11-04-PV-Leitfaden-Eigenverbrauch-Auflage\\_2.pdf](https://www.pvaustria.at/wp-content/uploads/2016-11-04-PV-Leitfaden-Eigenverbrauch-Auflage_2.pdf) abgerufen
- Quaschnig Volker (2012): Erneuerbare Energien und Klimaschutz; Hanser Verlag; Seite 237, 258
- Rechtsinformationssystem RIS (2018): Gesamte Rechtsvorschrift für Ökostromgesetz 2012; §41 Berechnung des Strommarktpreises; zuletzt abgerufen am 21.09.2018; <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20007386>
- Rennergy Systems AG. (8 2018). Rennergy RPM12. Von <https://pelletpower-rennergy.de/RennergyHeizungen/tnc-attachments/16901-prospektrennergypelletminirpm632.pdf> abgerufen

- Research And Markets. (3 2021a). Microgrid Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 - 2026). Von <https://www.researchandmarkets.com/reports/4536296/microgrid-market-growth-trends-covid-19#relb2-4911774> abgerufen
- Research And Markets. (4 2021). Micro Grids - Global Market Trajectory & Analytics. Von <https://www.researchandmarkets.com/reports/4805182/micro-grids-global-market-trajectory-and> abgerufen
- Research And Markets. (5 2021b). Microgrid Control Systems - Global Market Trajectory & Analytics. Von [https://www.researchandmarkets.com/reports/4911774/microgrid-control-systems-global-market?utm\\_source=GNOM&utm\\_medium=PressRelease&utm\\_code=dn68q3&utm\\_campaign=1451196+-+Global+Microgrid+Control+Systems+Industry+\(2020+to+2025\)+-+Market+Trajectory+%26+Anal](https://www.researchandmarkets.com/reports/4911774/microgrid-control-systems-global-market?utm_source=GNOM&utm_medium=PressRelease&utm_code=dn68q3&utm_campaign=1451196+-+Global+Microgrid+Control+Systems+Industry+(2020+to+2025)+-+Market+Trajectory+%26+Anal) abgerufen
- Research And Markets. (6 2019). Microgrid Control Systems Market - Forecasts from 2019 to 2024. Von <https://www.researchandmarkets.com/reports/4801707/microgrid-control-systems-market-forecasts-from#rela1-5239466> abgerufen
- Research And Markets. (7 2021). Microgrid Controller Market Research Report. Von <https://www.researchandmarkets.com/reports/4829881/microgrid-controller-market-research-report-by> abgerufen
- Schubert Susanne, Härdtlein Marlies, Graf Antonia (2014): Mini-/Mikro-KWK im Kontext der deutschen Energiewende; Litres Discussion Paper 2014-02; zuletzt abgerufen am 4.10.2018; [http://www.uni-stuttgart.de/litres/Publikationen/LITRES\\_Discussion\\_Paper\\_2014-02.pdf](http://www.uni-stuttgart.de/litres/Publikationen/LITRES_Discussion_Paper_2014-02.pdf)
- Selectra (2018): Preisanstieg oder Ersparnis – Lohnen sich indexgebundene Tarife? [online]; zuletzt abgerufen am 27.09.2018; <https://selectra.at/energie/tipps/tarife/indexgebunden>
- Smartgridsinfo. (07. 04 2021). Smartgridsinfo - Energy communities in all municipalities, objective of the Generalitat Valenciana for 2030. Von <https://www.smartgridsinfo.es/2021/04/07/comunidades-energeticas-todos-municipios-objetivo-generalitat-valenciana-2030> abgerufen
- Solarthermie.net (2018) Wie hoch liegen die Solarthermie Kosten pro m<sup>2</sup> [online]; zuletzt abgerufen am 10.10.2018; <https://www.solarthermie.net/faq/wie-hoch-liegen-die-solarthermie-kosten-pro-m2>
- Som Energia. (2021). Von <https://www.somenergia.coop/es/welcome-to-som-energia/> abgerufen
- Spoladore, Alessandro, et al. (2016): Model for forecasting residential heat demand based on natural gas consumption and energy performance indicators, Applied Energy, 182.
- Statistics Estonia. (2021). Tartu city. Von <https://www.stat.ee/en/find-statistics/statistics-region/tartu-county/tartu-city> abgerufen
- Statistik Austria (2018): Energiebilanzen Österreich 1970 – 2016; zuletzt abgerufen am 26.09.2018
- Statistik Austria (2018): Jahresdurchschnittspreise und -steuern für die wichtigsten Energieträger 2016; zuletzt abgerufen am 25. Juli 2018; [http://statistik.at/web\\_de/statistiken/index.html](http://statistik.at/web_de/statistiken/index.html)

- Statistik Austria. (2011). Gebäude 2011 nach überwiegender Gebäudeeigenschaft, Errichtungsjahr und Bundesland. Von [http://statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_NATIVE\\_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=074180](http://statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_NATIVE_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=074180) abgerufen
- Statistik Austria. (2011). Hauptwohnsitzwohnungen 2011 nach Nutzfläche, Art des (Wohn-)Gebäudes und Bundesland. Von [http://www.statistik.at/web\\_de/statistiken/menschen\\_und\\_gesellschaft/wohnen/wohnungs\\_und\\_gebaeudebestand/wohnungen/074225.html](http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/wohnen/wohnungs_und_gebaeudebestand/wohnungen/074225.html) abgerufen
- Statistik Austria. (2019). 2005 bis 2019 fertiggestellte Wohnungen und Gebäude. Von [http://statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_PDF\\_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=079517](http://statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_PDF_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=079517) abgerufen
- Statistik Austria. (2019). Wohnen 2019: Kapitel 1 - Mikrozensus. Von [http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_PDF\\_FILE&dDocName=123361](http://www.statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_PDF_FILE&dDocName=123361) abgerufen
- Statistik Austria. (2020). Paket Gebäude- und Wohnungsregister ab 2014 - Gemeinden, Politische Bezirke und Bundesländer. Von [http://statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET\\_NATIVE\\_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=121274](http://statistik.at/wcm/idc/idcplg?IdcService=GET_NATIVE_FILE&RevisionSelectionMethod=LatestReleased&dDocName=121274) abgerufen
- Statistik Austria. (2021). Persönlicher Inflationsrechner. Von [https://www.statistik.at/persoenerlicher\\_inflationsrechner/](https://www.statistik.at/persoenerlicher_inflationsrechner/) abgerufen
- StrategyMRC. (2017a). Microgrid Controller - Global Market Outlook (2017-2026). Von <https://www.strategymrc.com/report/microgrid-controller-market> abgerufen
- StrategyMRC. (2017b). Microgrid Control System - Global Market Outlook (2017-2026). Von <https://www.strategymrc.com/report/microgrid-control-system-market> abgerufen
- Stromliste (a) (2018): „Welcher Stromtarif und welcher Stromanbieter passt zu mir?“ [online]; Kapitel 2; zuletzt abgerufen am 27.09.2018; <https://stromliste.at/strompreis/tarifarten>
- Stromliste (b) (2018): „Tarife für Wärmepumpenstrom in Österreich“ [online]; zuletzt abgerufen am 27.09.2018; <https://stromliste.at/strompreis/tarifarten/unterbrechbar/waermepumpe>
- Stromliste (c) (2018): „Stromtarife von Linz Strom“ [online]; zuletzt abgerufen am 27.09.2018; <https://stromliste.at/versorger/linz-strom/tarife>
- Sustainability, I. –L. (29. 07 2021). Local governments lead the way towards a people-centred energy system. Von <https://iclei-europe.org/news/?c=search&uid=Y0M3XIkS> abgerufen
- TechNavio. (5 2020). Microgrid Market by Application and Geography - Forecast and Analysis 2020-2024. Von [https://www.technavio.com/report/microgrid-market-industry-analysis%20&utm\\_source=pressrelease&utm\\_medium=bw&utm\\_campaign=t40IDC\\_rfs\\_week45\\_2020&utm\\_content=IRTNTR43731](https://www.technavio.com/report/microgrid-market-industry-analysis%20&utm_source=pressrelease&utm_medium=bw&utm_campaign=t40IDC_rfs_week45_2020&utm_content=IRTNTR43731) abgerufen
- Töglhofer, C., Gobiet, A., Habsburg-Lothringen, C., Schranzhofer, H., Gratzl-Michlmair, M., & Heimrath, R. (2009). Heat.AT - Die Auswirkungen des Klimawandels auf Heiz- und Kühlenergiebedarf in Österreich II.
- Topmotors (2017): Kälteanlagen in der Industrie – wichtigste Fakten zu energieeffiziente Kälteverdichter; Merkblatt 27; im Auftrag von Energie Schweiz; zuletzt abgerufen am 18.07.2018; [https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2017-07/27\\_MB\\_Kaelteanlagen.pdf](https://www.topmotors.ch/sites/default/files/2017-07/27_MB_Kaelteanlagen.pdf)

- Umweltbundesamt. (2019). Treibhausgasemissionen verschiedener Energieträger. Von <https://secure.umweltbundesamt.at/co2mon/co2mon.html> abgerufen
- Umweltbundesamt Österreich (2018): Berechnung von Treibhausgas (THG)-Emissionen verschiedener Energieträger zuletzt abgerufen am 18.09.2018; <http://www5.umweltbundesamt.at/emas/co2mon/co2mon.html>
- Urbaneck Thorsten (2012): Kältespeicher – Grundlagen, Technik, Anwendung; Oldenbourg Verlag München
- Valuates Reports. (5 2019). Global Microgrid Market Size, Status and Forecast 2019-2025. Von <https://reports.valuates.com/market-reports/QYRE-Auto-19135/global-microgrid> abgerufen
- Verified Market Researcch. (8 2021). Global Microgrid Control System Market. Von <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/microgrid-control-system-market/> abgerufen
- WE. (2020). Wien Energie: Viertel Zwei - Die erste Energiegemeinschaft Österreichs. Von <https://positionen.wienenergie.at/projekte/strom/viertel-zwei/> abgerufen
- WPI Economics. (2020). The future of community energy. Von <http://wpieconomics.com/site/wp-content/uploads/2020/01/Future-of-Community-Energy-20200129-Web-Spreads.pdf> abgerufen
- Yao, Runming und Steermers, Koen. (2005): A method of formulating energy load profile for domestic buildings in the UK, Energie and Buildings; 37.
- Zapf Martin (2017): Stromspeicher und Power-to-Gas im deutschen Energiesystem – Rahmenbedingungen, Bedarf und Einsatzmöglichkeiten; Springer Vieweg, Seite 109 – 110