

# Plug&Play Storage of Photovoltaic Power

P<sup>3</sup>Power

Y. Wittmann, H. Bieser,  
S. Weinberger, C. Grimmer,  
B. Thormann, B. Böckl,  
T. Kienberger, V. Hacker

Berichte aus Energie- und Umweltforschung

**42/2021**

Liste sowie Downloadmöglichkeit aller Berichte dieser Reihe  
unter <http://www.nachhaltigwirtschaften.at>

### **Impressum**

Medieninhaber, Verleger und Herausgeber:  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)  
Radetzkystraße 2, 1030 Wien

Verantwortung und Koordination:  
Abteilung für Energie- und Umwelttechnologien  
Interimistischer Leiter: DI Theodor Zillner

Auszugsweiser Abdruck ist nur mit Quellenangabe gestattet. Es wird darauf verwiesen, dass alle Angaben in  
dieser Publikation trotz sorgfältiger Bearbeitung ohne Gewähr erfolgen und eine Haftung der Republik  
Österreich und der Autorin/des Autors ausgeschlossen ist. Nutzungsbestimmungen:  
<https://nachhaltigwirtschaften.at/de/impressum/>

# Plug&Play Storage of Photovoltaic Power

P<sup>3</sup>Power

Yvonne Wittmann, MSc, Dipl.-Ing. Hemma Bieser, MSc  
avantsmart e.U.

Dipl.-Ing. Stephan Weinberger, Dipl.-Ing. Dr. Christoph Grimmer, MSc  
EET GmbH

Dipl.-Ing. Bernd Thormann, Dipl.-Ing. Benjamin Böckl,  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Thomas Kienberger  
Montanuniversität Leoben

Assoc.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Viktor Hacker  
Technische Universität Graz

Graz, Mai 2019

Ein Projektbericht im Rahmen des Programms



des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



## **Vorbemerkung**

Der vorliegende Bericht dokumentiert die Ergebnisse eines Projekts aus dem Forschungs- und Technologieprogramm Stadt der Zukunft des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). Dieses Programm baut auf dem langjährigen Programm Haus der Zukunft auf und hat die Intention Konzepte, Technologien und Lösungen für zukünftige Städte und Stadtquartiere zu entwickeln und bei der Umsetzung zu unterstützen. Damit soll eine Entwicklung in Richtung energieeffiziente und klimaverträgliche Stadt unterstützt werden, die auch dazu beiträgt, die Lebensqualität und die wirtschaftliche Standortattraktivität zu erhöhen. Eine integrierte Planung wie auch die Berücksichtigung von allen betroffenen Bereichen wie Energieerzeugung und -verteilung, gebaute Infrastruktur, Mobilität und Kommunikation sind dabei Voraussetzung.

Um die Wirkung des Programms zu erhöhen sind die Sichtbarkeit und leichte Verfügbarkeit der innovativen Ergebnisse ein wichtiges Anliegen. Daher werden nach dem Open Access Prinzip möglichst alle Projektergebnisse des Programms in der Schriftenreihe des BMK publiziert und elektronisch über die Plattform [www.NachhaltigWirtschaften.at](http://www.NachhaltigWirtschaften.at) zugänglich gemacht. In diesem Sinne wünschen wir allen Interessierten und AnwenderInnen eine interessante Lektüre.

DI Theodor Zillner

Interimistischer Leiter der Abt. Energie- und Umwelttechnologien  
Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)



# Inhaltsverzeichnis

1	Kurzfassung.....	8
2	Abstract.....	10
3	Ausgangslage .....	12
	3.1. Aufgabenstellung .....	12
	3.2. Stand der Technik .....	12
4	Projekthalt .....	15
	4.1. Verwendete Methoden .....	15
	4.1.1. Entwicklung der Energie-Services für Haushaltsaggregationen .....	16
	4.1.2. Erstellung von Anforderungsprofilen (Need Definition).....	16
	4.1.3. Hardwareentwicklung Messtechnik (NetD) – Kostenziel.....	17
	4.1.4. Integration der NetD-Technologie in das Gesamtsystem.....	18
	4.1.5. Entwicklung User Interface .....	19
	4.1.6. Entwicklung MPP-Tracker .....	21
	4.1.7. Entwicklung des Modells zur Gesamtsystemeinbindung.....	22
	4.1.8. Validierung des Gesamtsystems .....	27
5	Ergebnisse.....	31
	5.1. Entwicklung Energie-Services .....	31
	5.2. Hardwareentwicklung Messtechnik .....	32
	5.2.1. Ergebnisse Gesamtmodell.....	33
	5.2.2. Ergebnisse Feldtests.....	39
	5.3. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“ .....	41
6	Schlussfolgerungen.....	43
7	Ausblick und Empfehlungen .....	44
8	Verzeichnisse .....	45
	8.1. Abbildungsverzeichnis .....	45
	8.2. Literaturverzeichnis .....	46



# 1 Kurzfassung

## **Motivation und Forschungsfrage**

Im Projekt P<sup>3</sup>Power wird die Messtechnologie NetDetection (Abschätzung des Leistungsverbrauchs an einer Phase von einem beliebigen Messpunkt, z.B. einer Steckdose, in einem Haushalt) entwickelt. Auf Basis dieser Technologie werden plug&play Photovoltaik- und Speichersysteme realisiert, welche 100% Eigennutzung innerhalb beliebiger Aggregationsgrößen - vom Mehrfamilienhaus bis zur Gemeinde - ermöglichen, ohne bestehende Installationen adaptieren zu müssen. Die Technologie wird digitalisiert, im Laborumfeld und in Realhaushalten getestet und zu einem umfassenden Energie-Service-Angebot weiterentwickelt.

## **Ausgangssituation/Status Quo**

Der Antragsteller EET - Efficient Energy Technology GmbH ist ein Start-up im Bereich dezentraler Energieproduktion und -speicherung. Die Kerntechnologie ist eine patentierte Messtechnologie mit dem Arbeitstitel NetDetection System, welche in der Lage ist, den Leistungsverbrauch auf einer Phase (Lx) von einem beliebigen Messpunkt (z.B. einer Steckdose) aus abzuschätzen. Auf Basis dieser Messtechnologie werden plug&play einsetzbare Speichersysteme für die Steckdose ermöglicht.

Das System, welches durch dieses Projekt realisiert wird, ist in der Lage 100% Eigennutzung des dezentralen Photovoltaikstroms auf einfachste Art und Weise zu gewährleisten, unabhängig von der Aggregationsgröße: Vom Mehrfamilienhaus bis hin zu ganzen Gemeinden.

Dezentrale Energiespeicherung ist ein integraler Bestandteil der Energiewende. Diese Tatsache und der stark fallende Preistrend von Akkuzellen resultieren in einem äußerst großen und interessanten Marktpotential.

Systeme, die heute am Markt angeboten werden, müssen durch Fachpersonal in den Stromkreis (über den Netzanschlusskasten) integriert werden. Diese Installation ist mit Aufwand und Kosten verbunden und aus diesem Grund nur für Systeme ab einer gewissen Größe wirtschaftlich darstellbar.

## **Projekt-Inhalte und Zielsetzungen**

Durch die Messtechnologie „NetDetection“ wird diese Art der Installation völlig obsolet und die verbundenen Kosten eliminiert. Die Technologie ermöglicht Systeme der dezentralen Energieproduktion (mittels Photovoltaik) und Energiespeicherung in allen relevanten Größenskalierungen. Dadurch ist es erstmals auch bestehenden Haushalten und Wohnungsverbänden im urbanen Bereich möglich, an der Energiewende zu partizipieren.

## **Methodische Vorgehensweise**

Im Projekt wird die Messtechnologie aus dem Labormaßstab zur Marktreife entwickelt und im Feldversuch, eingebettet ins Energy Living Labs Austria, getestet. Wesentlich ist dabei die Digitalisierung der Messhardware sowie des Algorithmus zur Auswertung des Messsignals.

## **Ergebnisse und Schlussfolgerungen**

Das Projektziel war die Entwicklung von Energie-Service-Dienstleistungen auf Basis des Photovoltaik- und Speichersystem, welches einfach und in kurzer Zeit von einem technischen Laien installiert werden kann.

Dieses Ziel wurde mit dem System „SolMate“ erreicht. Die Kernkomponente des Systems ist die Messtechnologie „NetDetection“, welche im Rahmen des zweijährigen Projektes vom Labormaßstab zur Marktreife entwickelt wurde. Das Gesamtsystem wurde in einem breit ausgelegten Feldtest über drei Monate in realen Bedingungen getestet. Das gesteckte Kostenziel konnte erreicht werden.

Die Ergebnisse der Entwicklungsarbeit sowie des Feldtests sind in diesem Bericht dargestellt.

## **Ausblick**

Das entwickelte System befindet sich derzeit in der Industrialisierung und wird in absehbarer Zeit am Markt erhältlich sein.

Aus den Recherchen des Projektes sowie den zahlreichen Gesprächen mit Expert:innen aus der Energiebranche lässt sich schlussfolgern, dass Systeme, welche den Vorteil „Ease-of-Use“ für die Endkunden/den Endkunden aufweisen, sehr stark gefragt sind.

Außerdem stellte sich heraus, dass aufgrund anstehender Änderungen der regulativen Situation (Thema ElWOG-Novellierung mit Mieterstrom sowie Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz) neue Geschäftsmodelle möglich werden. So wird es in Zukunft möglich sein, Energie P2P zu handeln, über Schwarmlösungen netzdienlich zu agieren oder ganz generell durch leistungsbezogene Netzgebühren die Attraktivität von Speichern weiter zu erhöhen. Dies sind die großen Trends, welche bei Entwicklung von Energiesystemen berücksichtigt werden sollten.

## 2 Abstract

### **Motivation and research question**

The core of the project P<sup>3</sup>Power is the measurement technology “NetDetection”, which is able to detect the power consumption of a household from any point, e.g. a regular wall socket. Based on this technology a plug&play powerplant, consisting of photovoltaics and battery pack, is realized. The system is able to guarantee 100% self-consumption within flexible aggregates (from single households to whole communes) without any changes of existing infrastructure. The measurement technology will be implemented into digital hardware, evaluated comprehensively in lab and household environment and subsequently new energy service business models are developed.

### **Initial situation/status quo**

The project leader EET - Efficient Energy Technology GmbH is a start up in the area of decentralized electricity production and storage. The core technology is a patented measurement technology (working title NetDetection System) that is able to detect and quantify the power consumption within a household (of one phase Lx) from any measurement point, most likely a regular Schuko socket.

Based on this technology plug&play storage systems, that can be installed by simply plugging it in, can be realized. The system will be able to realize 100% electricity consumption within an aggregation of households in the simplest possible way, independent of the size of the aggregation.

Decentralized storage of electricity is a keystone of the energy transition. This circumstance in combination with the decreasing price trend of secondary battery cells, yields in a highly interesting market potential.

Today's systems are usually installed by specialized personnel through the power supply box. The installation is associated with certain costs, which are the reason why storage systems are only available in bigger scales.

### **Project contents and objectives**

The measurement technology “NetDetection” eliminates these costs completely. Decentralized electricity production (via photovoltaics) and electricity storage of any size will be economical viable. For the first time, existing households in urban areas will be able to participate actively in the energy transition.

### **Methodical procedure**

Within the project the measurement technology will be developed from lab scale to market readiness. It will be tested comprehensively within the cluster of the Energy Living Labs Austria. The critical keystone is the digitalization of the hardware components as well as the evaluation algorithm of the measurement signal.

## **Results and conclusions**

Project goal of P<sup>3</sup>Power was the development of energy services based on a smart photovoltaics and storage system, which can be installed by anybody by simply plugging it in into a regular wall socket.

This goal was achieved with the system called “SolMate”. The core component of the system is the measurement technology “NetDetection”, which was developed from lab scale to market readiness. The final system was tested in a broad field test over a period of three months under real-life test conditions. The cost goal of the hardware component was achieved.

The results of the R&D progress as well as results from the field test are presented in this project report.

## **Outlook**

Next steps of the system are its industrialization and commercialization. In the near future, the system will be available on the market.

Based on inquiries and interviews of numerous experts of the energy sector, the feature “ease-of-use” is of essential importance for future energy-related business cases.

Additionally, changes of regulations are expected within the next decade that will allow new business models. Most important are the examples of photovoltaic systems for apartment buildings, the interconnection of storage systems to act in a grid-stabilizing way and grid fees that are attributed to power rather than energy (in this case storage systems gain further interest due to the possibility of peak shaving). All future developments of energy systems should consider these trends.

# 3 Ausgangslage

## 3.1. Aufgabenstellung

Dezentrale Energieproduktion mittels Photovoltaik und deren Speicherung ist ein integraler Bestandteil der Energiewende. Diese Tatsache und der stark fallende Preistrend von Akkuzellen resultieren in einem äußerst großen und interessanten Marktpotential. Systeme, die heute am Markt angeboten werden, müssen durch Fachpersonal in den Stromkreis (über den Netzanschlusskasten) integriert werden. Diese Installation ist mit Aufwand und Kosten verbunden und aus diesem Grund nur für Systeme ab einer gewissen Größe wirtschaftlich darstellbar.

Durch die Messtechnologie „NetDetection“ wird diese Art der Installation völlig obsolet und die verbundenen Kosten eliminiert. Die Technologie ermöglicht Systeme der dezentralen Energieproduktion (mittels Photovoltaik) und Energiespeicherung in allen relevanten Größenskalierungen. Dadurch ist es erstmals auch bestehenden Haushalten und Wohnungsverbänden im urbanen Bereich möglich, an der Energiewende zu partizipieren.

Im Projekt wird die Messtechnologie aus dem Labormaßstab zur Marktreife entwickelt und im Feldversuch, eingebettet ins Energy Living Labs Austria, getestet. Wesentlich ist dabei die Digitalisierung der Messhardware sowie des Algorithmus zur Auswertung des Messsignals. Die gesamte Messung und Auswertung bis zu einem Ausgangssignal wird in Hardwarekomponenten mit Kosten in der Größenordnung von € 20 integriert. Dieses Kostenziel ist notwendig, um vernünftige Skalierungen des Systems darstellen zu können. Auf Basis der Technologie und der Vernetzung mehrerer Systeme werden Technologie-Service-Angebote entwickelt, welche den Mehrwert der Nutzer:innen maximiert.

## 3.2. Stand der Technik

Die vorhandenen Lösungen von netzgekoppelten PV-Systemen produzieren elektrischen Strom kontinuierlich und berücksichtigen den tatsächlichen Strombedarf im eigenen Haushalt nicht. Falls keine Stromabnehmer vorhanden sind, wird elektrischer Strom in das öffentliche Netz eingespeist. Für den Fall, dass kein bidirektionaler Zähler installiert ist, bleibt die eingespeiste Energie monetär unkompensiert (in der Regel bei Klein- und Kleinstanlagen). Eine Tatsache, die von vielen Anbietern vernachlässigt wird.

Am Markt sind plug&play Photovoltaikmodule erhältlich, welche die elektrische Leistung in dem Moment einspeisen, in dem sie anfällt. In der Regel sind die großen Lasten im privaten Bereich allerdings abends und morgens – zu den Zeiten an denen die Sonne wenig/keine Leistung bringt. Ein anderes Beispiel ist das Brennstoffzellensystem von elcore (<http://www.elcore.com>), welches kontinuierlich 300 W elektrische Leistung unabhängig vom Leistungsbedarf im Haushalt/Wohnungsverbund liefert.

Aus diesem Grund werden am Markt heute nur sehr kleine Systeme angeboten, weil die Leistungsaufnahme des durchschnittlichen Haushaltes kontinuierlich ca. 150 W bis 300 W beträgt. Das Problem ist, dass diese Daten in 15 Minuten-Intervallen mit intelligenten Stromzählern (sog. Smartmetern) ermittelt werden und der tatsächliche Leistungsbedarf wesentlich dynamischer ist. Diese Vereinfachung täuscht oft eine hohe Eigennutzung vor.

Weitere Lösungen, vor allem mit größeren Leistungen, umfassen die Installation über den Netzanschlusskasten des Haushaltes mit einem zweiten Messpunkt zur Einspeisevergütung. Professionelle Planungs-, Verkabelungs- und Installationsarbeiten müssen durchgeführt werden und verursachen entsprechende Kosten.

Der Ansatz dieses Projektes ist die Messung der tatsächlichen Leistungsaufnahme eines Haushaltes unter Anwendung der Messtechnologie NetDetection (NetD) direkt an der Steckdose des Anschlusses. Die Technologie ist in der Lage, die Lasten auf einer Phase in Echtzeit zu detektieren, ohne jegliche Änderung der elektrischen Installationen eines Haushalts vornehmen zu müssen. Dadurch wird mehr Bequemlichkeit (NetD ermöglicht Plug&Play-Fähigkeit) und auf einfachste Art und Weise 100% Eigennutzung der dezentral produzierten Energie ermöglicht. Der Mehrnutzen des Systems wird überproportional gesteigert, wenn mehr und mehr private Haushalte an einer Aggregation partizipieren.

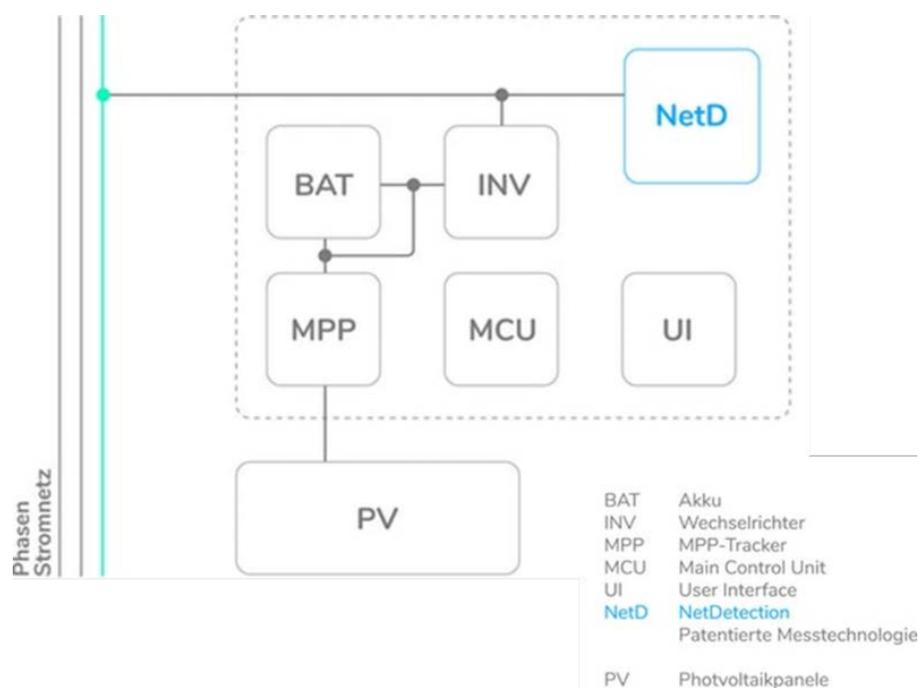


Abbildung 1: Funktionsblockdiagramm des 1-phasigen Systems.

Die Technologie des NetD-Systems wurde am Institut für Chemische Verfahrenstechnik und Umwelttechnik an der Technischen Universität Graz entwickelt und zum Patent am EPA angemeldet. Wie in Abbildung 1 dargestellt, wird das NetD in das Zielsystem dieses Projektes integriert (hier 1-phasige Darstellung). Das System kann über einen gewöhnlichen Schukostecker (1L + N + PE) an eine Phase oder über einen 3-phasigen Stecker (3L + N + PE) angeschlossen werden. Das NetD-System speist ein hochfrequentes Stromsignal in die Phase des Netzes und analysiert die Spannungsantwort. Auf Basis dieser Messung und einem Auswertalgorithmus wird in annähernd Echtzeit der Leistungsbedarf auf der vermessenen Phase des Haushaltes errechnet.

Am Markt werden solche Lösungen derzeit mit Zwischensteckern realisiert, die zwischen jeder Steckdose und dem Verbraucher anzubringen sind. Diese Konkurrenztechnologie ist in den Punkten Kosten und Nutzerfreundlichkeit eindeutig unterlegen. Diese Zwischenstecker kosten im Einzelhandel zwischen € 30-50 (Beispiel Elgato Apple HomeKit Eve Energy EU Funk-Schalter).

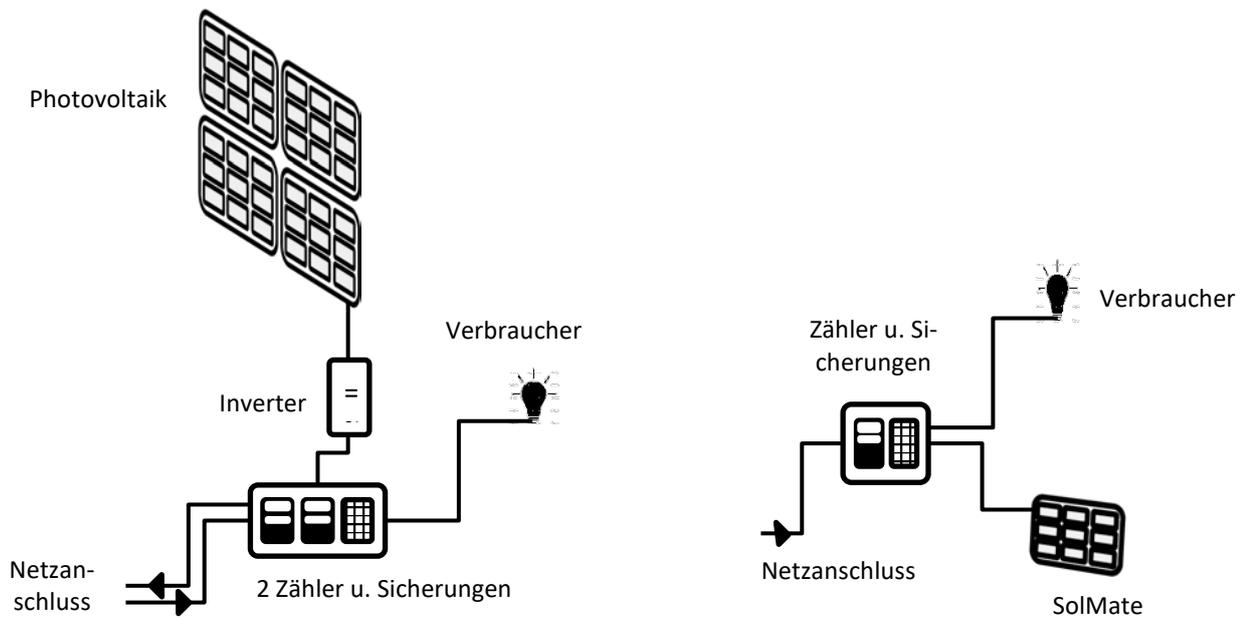


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Installationsunterschiedes: Stand der Technik (links) und SolMate (rechts).

Abbildung 2 zeigt die Gegenüberstellung des Standes der Technik und dem angestrebten System als einfache Illustration. Während Systeme nach dem Stand der Technik professionell installiert werden müssen, kann das System SolMate einfach über eine Schukosteckdose von der Nutzer:in „installiert“ werden. Außerdem kommt es zu keiner Einspeisung ins öffentliche Netz, weswegen ein zweiter Zählpunkt nicht notwendig ist.

# 4 Projektinhalt

## 4.1. Verwendete Methoden

Das Projekt war in fünf Arbeitspakete unterteilt, um den Projektverlauf unter den involvierten Partnern optimal koordinieren zu können. Die verwendeten Methoden unterscheiden sich in den Arbeitspaketen zum Teil stark, aus diesem Grund sind diese nach Arbeitspaketen nachfolgend beschrieben.

### AP1: Projektmanagement

- PM-Regeln und Dokumentation entsprechend der IPMA (International Project Management Association)
- Einrichten eines Servers (Datenmanagement)
- Regelmäßige Besprechungen und Berichtswesen
- Projektcontrolling
- Publikationstätigkeit in Fach- und Massenmedien

### AP2: Entwicklung Energie-Services für Haushaltsaggregationen

- **Interdisziplinäre Teams:** Über das Netzwerk der Projektpartner:innen und insbesondere des Living Labs werden die für die Fragestellung erforderlichen Mitarbeiter:innen und Stakeholder in Teams zusammengeführt.
- **Variabler Raum:** Das Living Lab verfügt über Kreativräume, in denen die Workshops stattfinden.
- **Iterativer Prozess:** Die Entwicklung von neuen Energiedienstleistungen und Geschäftsmodellen erfolgt in iterativen Schritten. Die Arbeit im Problemraum und im Lösungsraum wechselt sich ab. Die Schritte werden mehrere Male durchlaufen, immer wieder neue Erkenntnisse gewonnen, so lange, bis sich fundierte Aussagen abzeichnen.

### AP3: Embedded Hardware und Software Entwicklung - NetDetection System

- Leiterplattendesign in EDA Software
- Leiterplattenfertigung (Nutzung des FabLab der TU Graz)
- Programmierung und In-Circuit-Debugging
- Validierung im Labormaßstab

### AP4: Implementierung NetD in Gesamtsystem

- Rapid Prototyping im FabLab
- Algorithmen-Entwicklung auf Basis simulatorischer Optimierung des Eigennutzungsgrades und des PV-Nutzungsgrades anhand von Standardlastprofilen und PV Erzeugungsprofilen
- Programmierung der Regelalgorithmen

### AP5: Implementierung NetD in Gesamtsystem

- Labortests im HIL Labor der Montanuniversität (Speicherbewirtschaftung im Jahreslastgang, Komponentenabstimmung, Optimierung des Speicherbewirtschaftungsalgorithmus)
- Feldtests in realen Haushalten (aus Cluster des Energy Living Labs Austria)
- Kund:innen-Befragung

#### 4.1.1. Entwicklung der Energie-Services für Haushaltsaggregationen

Über die gesamte Projektdauer hinweg wurde im Sinne eines Open Innovation Prozesses gearbeitet und Co-Creation Möglichkeiten geschaffen, um sich in iterativen Schritten mit den auftretenden Problemen zu beschäftigen und entsprechende Lösungen abzuleiten und zu optimieren.

Zur Entwicklung von Geschäftsmodell-Prototypen wurde der Double-Loop-Prozess nach van der Pijl, Lokitz und Solomon (2016) aus ihrem Buch „Design a better business“ eingesetzt. Es geht primär darum, immer wieder die eigene Perspektive auf den Designprozess zu reflektieren und neue Erkenntnisse in den Prozess einfließen zu lassen. Die anfänglichen Ideen werden durch Erkenntnisse und Rahmenbedingungen beeinflusst und müssen daher immer wieder adaptiert werden. Um sich während des Entwicklungsprozesses nicht zu sehr auf die erste beste Idee zu versteifen, sondern offen für Feedback und Verbesserungen zu sein, empfiehlt die Double Loop immer wieder Annahmen aufzustellen, diese zu testen und die Ergebnisse zu reflektieren. Diese Double Loop wurde in dem Projekt mehrmals durchlaufen, und die Anforderungen und Services von dezentralen Energiespeichersystem mit der NetD-Technologie entsprechend immer wieder erweitert.

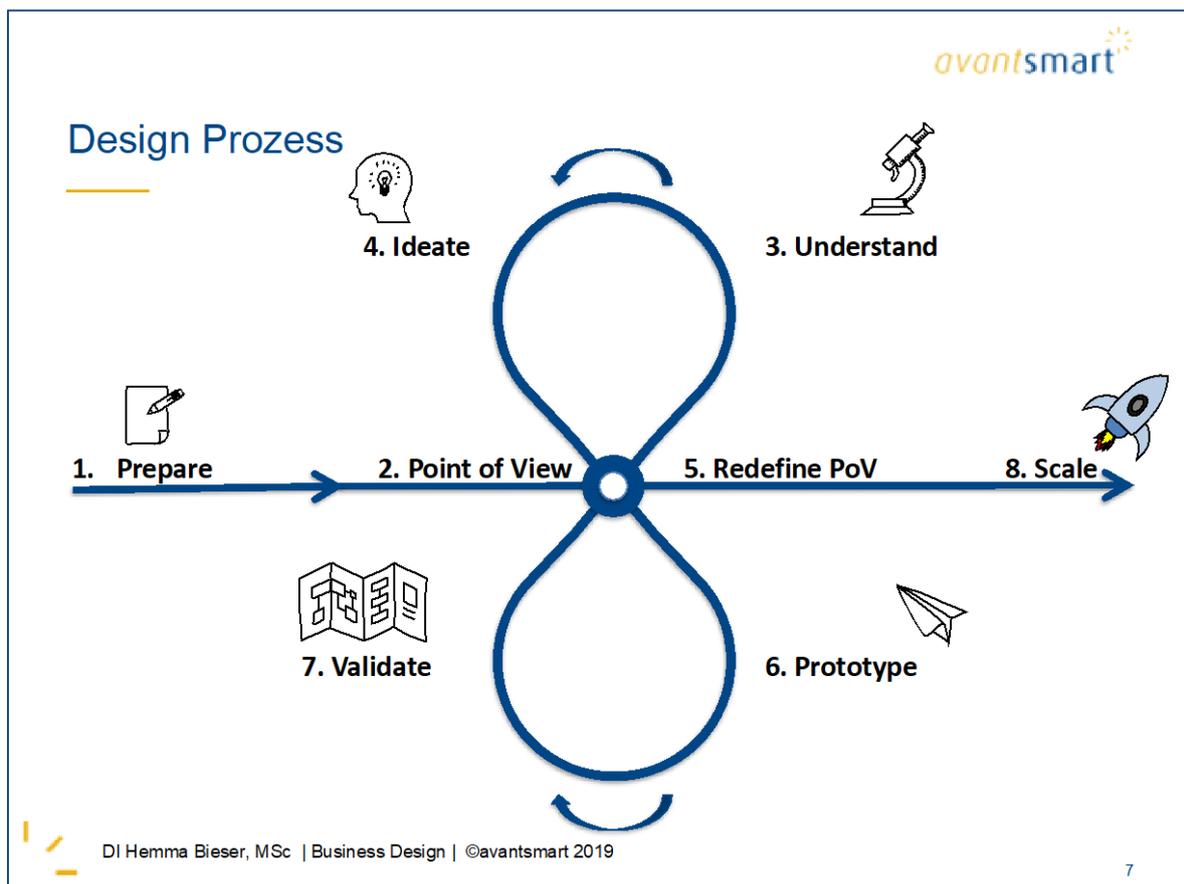


Abbildung 3: Double-Loop nach van der Pijl, Lokitz und Solomon (2016) als Grundlage für den iterativen Entwicklungsprozess

#### 4.1.2. Erstellung von Anforderungsprofilen (Need Definition)

Für eine Nutzer:innen-freundliche Entwicklung von Energie-Service-Angeboten wurde sehr früh im Projekt mit Design Thinking Methoden begonnen, die Sicht der Nutzer:innen und jeweiligen potenziellen Zielgruppensegmente im Forschungs- und Entwicklungsprozess zu berücksichtigen.

Die im ersten Co-Creation-Workshop getroffenen Annahmen wurden durch die Value Proposition Canvas (Osterwalder, 2014) visualisiert und in weiterer Folge durch Literaturrecherche analysiert. Dabei wurden die konkreten Bedürfnisse und Anforderungen an Produkte mit der NetD-Technologie für unterschiedliche Anwendungsfälle und Zielgruppensegmente definiert. Um diese Annahmen zu prüfen, wurde im Frühjahr 2018 ein Pop-Up-Innovation Lab (N=70) in der Grazer Innenstadt veranstaltet.

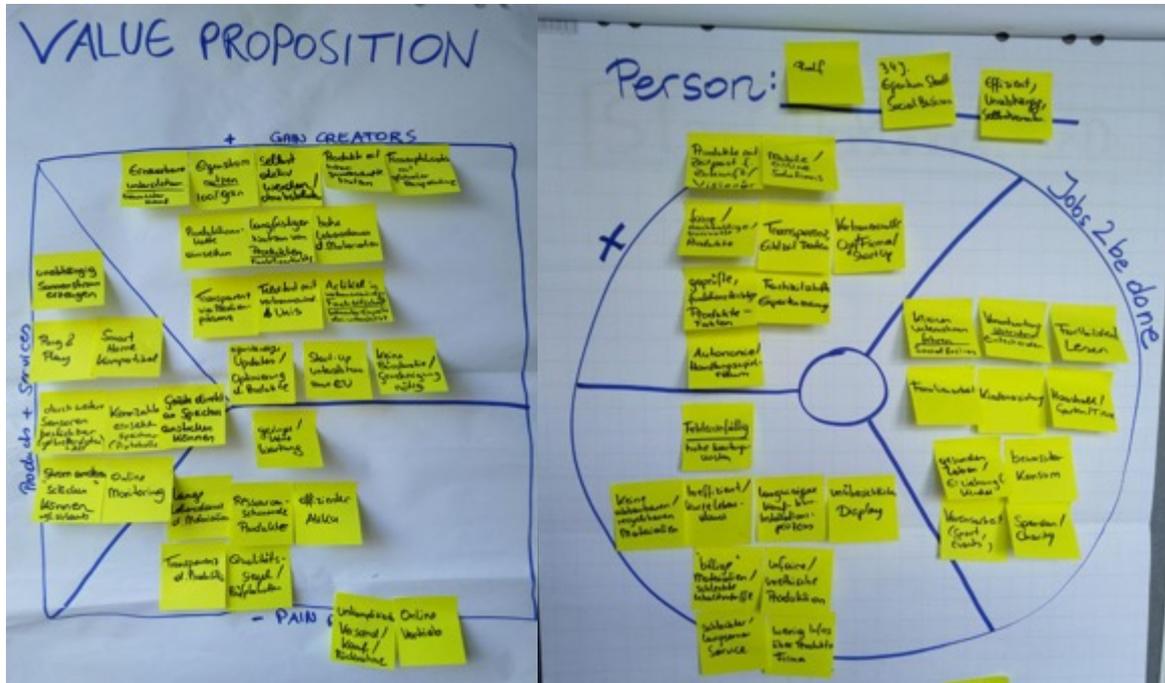


Abbildung 4: Darstellung der Value Proposition Canvas nach Osterwalder (2014) für ein relevantes Zielgruppensegment

#### 4.1.3. Hardwareentwicklung Messtechnik (NetD) – Kostenziel

Eines der wichtigsten Ziele des Projektes war die Überführung der NetDetection Messtechnik vom Laboraufbau zur fertigen Leiterplatte, welche das Kostenziel von € 25 für die Hardware und die Einhaltung der erforderlichen Grenzwerte erreicht.

Zunächst wurde die im Labormaßstab auf Steckboards entwickelte Technik auf gedruckte Leiterplatten übertragen. Dies geschah zur Steigerung der Reproduzierbarkeit. Die verwendeten Bauteile waren dabei in der Through Hole Technology basiert, wodurch die manuelle Bestückung sowie das Erfassen von Messwerten vereinfacht wurde.

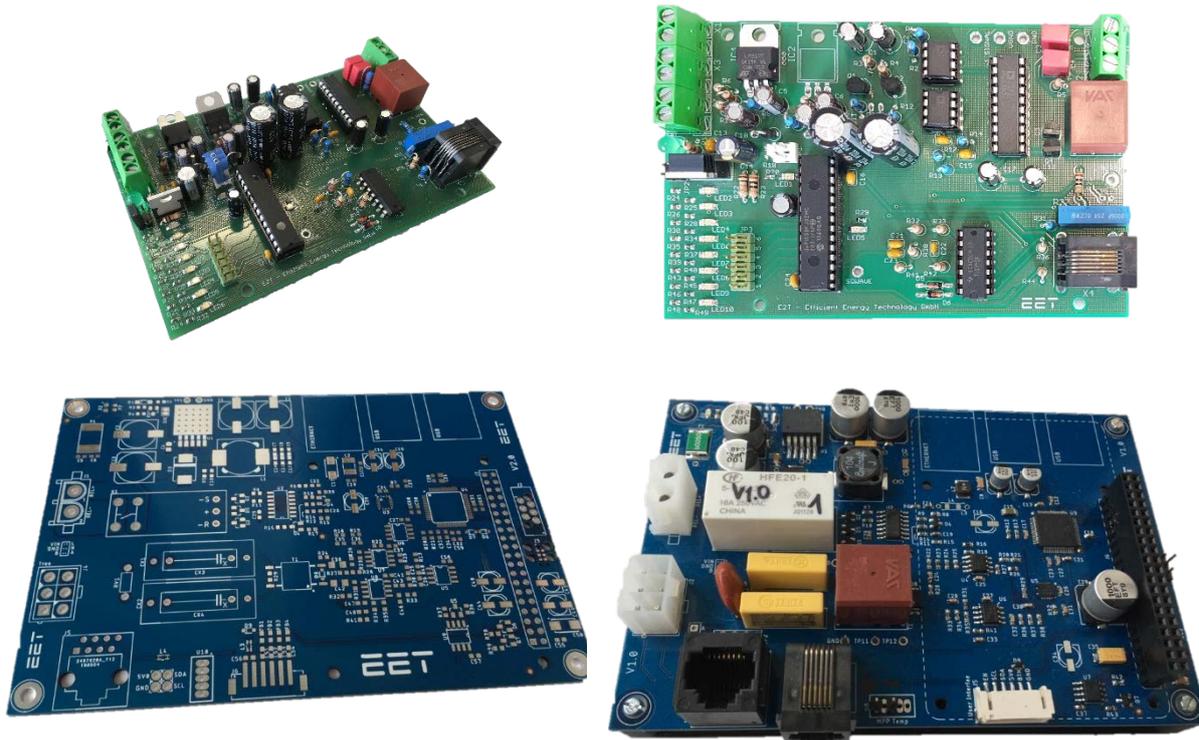


Abbildung 5: Oben NetD V0.1 und NetD V0.3 nach dem 1. Forschungsjahr, unten NetD v2.0 nach dem 2. Forschungsjahr

#### 4.1.4. Integration der NetD-Technologie in das Gesamtsystem

Parallel zur Optimierung der NetD-Technologie wurde an der Implementierung der Technik in das Gesamtsystem gearbeitet, wobei die NetD-Platine zu einer Hauptplatine erweitert wurde, welche neben der Leistungserfassung auch die

- Interface Schaltung für die RS485 Schnittstelle (welche zum Auslesen des OnGrid Inverters, als auch des Akkupacks verwendet wird),
- die Interface Schaltung zur Nutzung des I<sup>2</sup>C Buses auf 3.3V Sensoren und 5V Sensoren,
- die Ansteuerung eines bistabilen Relais zum Ein-/Ausalten von Netz- und Inselinverter zur Verringerung von „StandBy“-Verbräuchen sowie
- Buchsen zur steckerfertigen Montage von User-Interface-Platine, Akkupack, Inverter, und Einplatinencomputer inklusive WLAN-Schnittstelle enthält.

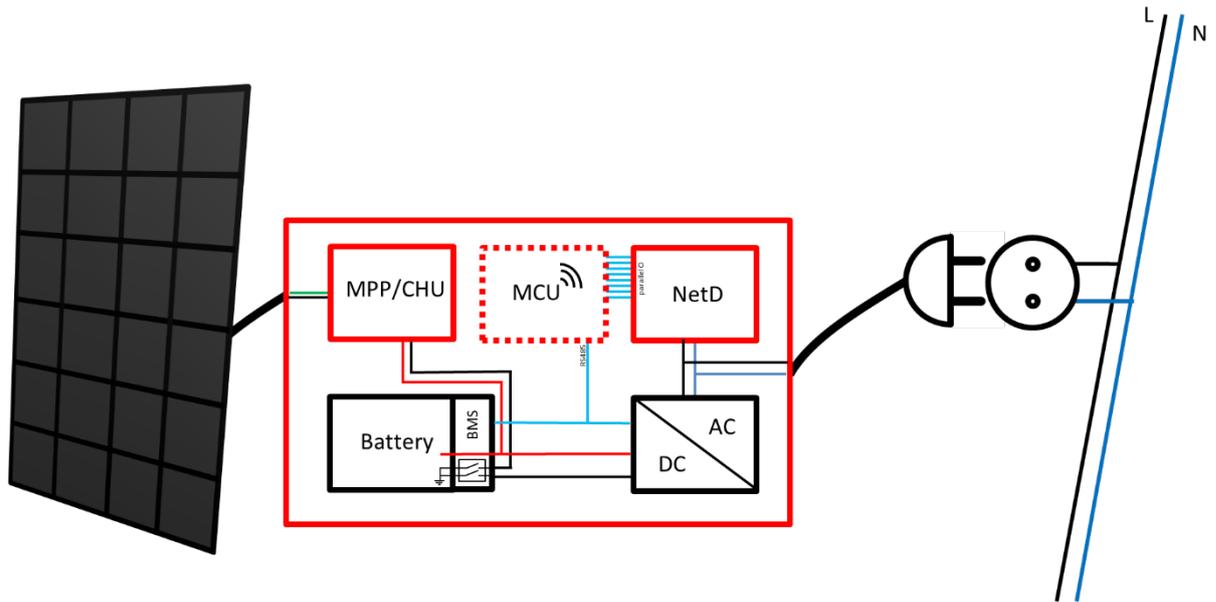


Abbildung 6: Systemüberblick - Die rot eingerahmten Komponenten stellen eigene Entwicklungen dar.

#### 4.1.5. Entwicklung User Interface

Aus technischer Sicht und in Hinblick auf die lange Lebensdauer wurde entschieden, dass das User Interface auf Displays verzichten wird (Alterung), und stattdessen ein webserverbasiertes Graphical User Interface (GUI) anbietet. Der erste Entwurf beinhaltet bereits alle nötigen responsive webdesign Bestandteile und stellt für zukünftige App Entwicklungen ein WebAPI zur Verfügung.

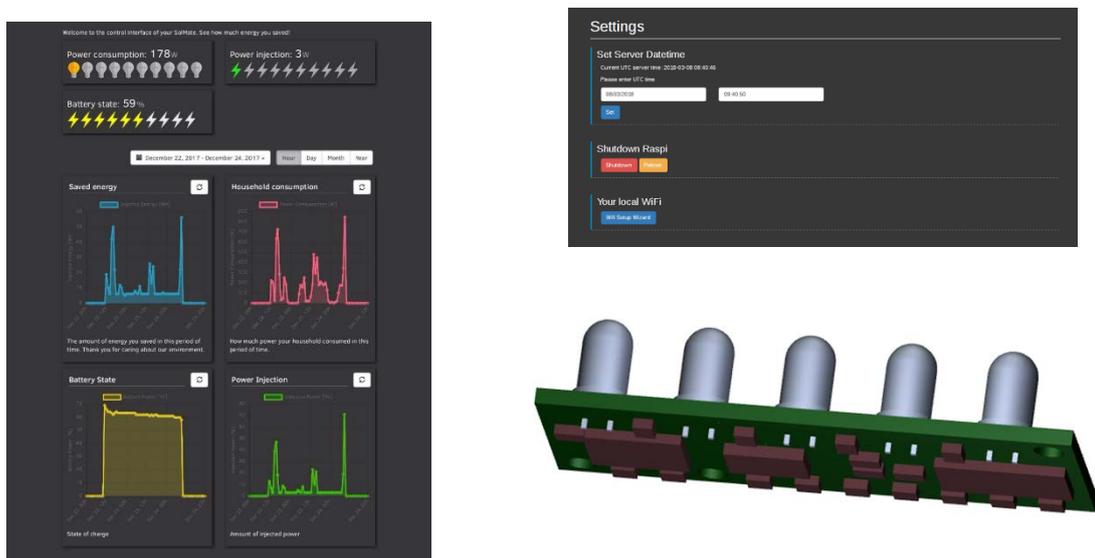


Abbildung 7: Entwurf des webbasierten Userinterface zeigt Datenbankwerte an (links) und erlaubt wichtigste Systemeinstellungen zu treffen (rechts)

Zusätzlich zum webbasierten Interface wurde ein einfaches LED basiertes Modul entwickelt, um Ladestrom, Ladestrom bzw. Entladestrom intuitiv anzuzeigen. Im weiteren Verlauf wurde aufgrund

von Kunden:innen-Feedback und dem Feedback externer Industriedesigner das Farbschema umgestellt.

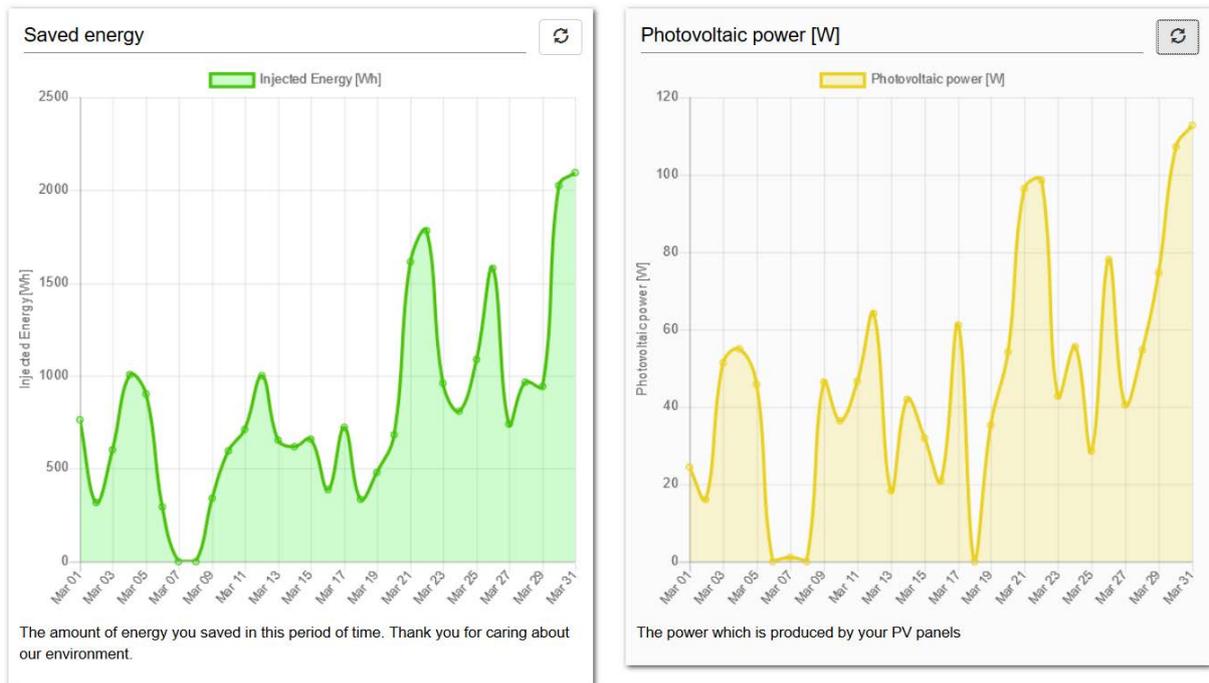


Abbildung 8: Tägliche Einspeiseenergie und Durchschnittliche PV Leistung eines SolMates via Webinterface.

Die erstellte API wurde abseits des Projektes genutzt, um gemeinsam mit externen App-Entwicklern eine Smartphone-Anwendung zu entwickeln. Dabei wurde auch Kund:innen-Feedback umgesetzt, da Kund:innen oft nicht in der Lage waren, die IP-Adresse nach der Einbindung in das bestehende WLAN-Netz zu finden. Die App kann dieses Problem durch die Nutzung der API umgehen.



Abbildung 9: Abbildung der Smartphone-App (entwickelt außerhalb des Projektes)

#### 4.1.6. Entwicklung MPP-Tracker

Das gesamte System wurde im Hinblick auf die Selbstinstallation durch Laien entwickelt. Damit dieses Konzept durchgehend umgesetzt werden kann, müssen die PV-Paneele parallel verschalten werden, um im SELV-Bereich (Schutzkleinspannungsbereich) zu bleiben. Das Gros der angebotenen MPP-Tracker ist jedoch auf Stringanlagen ausgerichtet, welche für diesen Anwendungsfall nicht geeignet sind.

Für die ersten Prototypen wurden deshalb Hochsetzsteller und ein separater, eigens entwickelter MPP-Tracker verwendet. Am Markt wurden schließlich auch Komplettlösungen gefunden und getestet. Diese waren jedoch aus diversen Gründen nicht für ein Serienprodukt geeignet. Deshalb wurde im Zuge der Systemintegration auch ein Maximum Power Point Tracker entwickelt, der auf einem Hochsetzsteller (HSS) basiert. Dazu wurde eine HSS-Stufe und ein Zwischenkreis zur Stützung der Spannung sowie der eigentliche MPP-Tracker kombiniert. Im Zuge der Feldtests und ausgedehnten Labortests konnte dieses Konzept zu einem HSS vereinfacht werden, welcher die Ausgangsspannung dynamisch anpasst. Dadurch wurde die Effizienz gesteigert und die Limitierung durch den Innenwiderstand (bei tiefen Temperaturen) des Akkus eliminiert.

#### 4.1.7. Entwicklung des Modells zur Gesamtsystemeinbindung

Die Anlage der Firma EET besteht aus drei Hauptkomponenten: dem PV-Paneel, dem Wechselrichter und der Batterie. Einfluss auf diese Bauteile haben die Sonneneinstrahlung, die Temperatur und die Verbraucherlast. Die Anordnung der Bauteile, der Sonneneinstrahlung und der Verbrauchslast werden in der Abbildung 9 dargestellt. Eine Besonderheit des SolMates stellt die NetDetection dar. Diese dient zur Bestimmung des Leistungsverbrauchs an einer Phase und wird mittels Impedanzspektroskopie durchgeführt. Dadurch wird nur der Eigenverbrauch bedient und verhindert, dass Energie in das öffentliche Netz eingespeist wird.

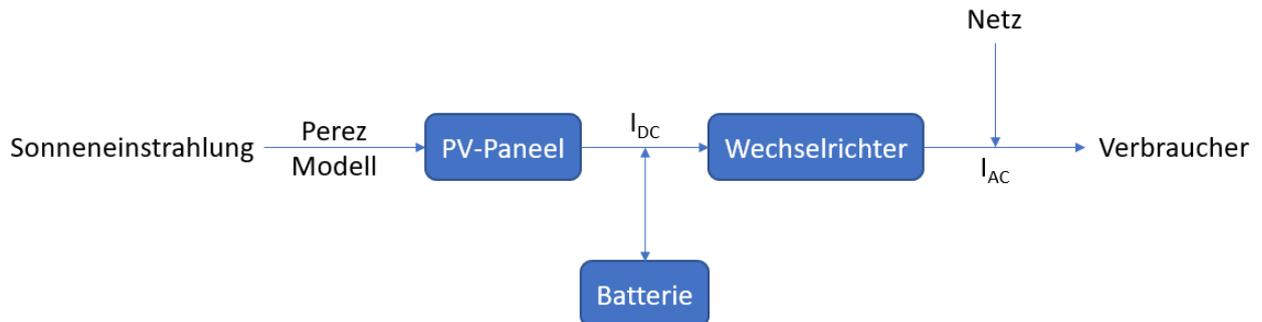


Abbildung 11: Darstellung der Energieflüsse SolMate

Abbildung 10 zeigt die Energieflüsse des Versuchsaufbaus. Die Größen der Pfeile sind exemplarisch zu verstehen und können abhängig vom Lastfall und anderen Einflussgrößen zeitlich variieren. Die ungenutzte Energie ( $E_{\text{Ungenutzte Energie}}$ ) beschreibt jene Menge an Energie, die am Photovoltaik-Paneel erzeugt wird, jedoch nicht genutzt werden kann, da zum Beispiel die Batterie vollgeladen ist und kein Verbrauch anliegt. Der gelbe Energiefluss zeigt jene Energiemenge an, die in der Batterie gespeichert wird und bei Bedarf wieder abgegeben werden kann. Dabei entstehen aufgrund des Wirkungsgrades des Speichermediums Verluste ( $E_{\text{Verluste Batterie}}$ ). Die tatsächlich genutzte Energie von der eigenen Erzeugung stellt der Energiefluss  $E_{\text{Verwendet}}$  dar. Da der Strom von Gleichstrom auf Wechselstrom umgewandelt werden muss, entstehen aufgrund des Wirkungsgrades des Wechselrichters zusätzliche Verluste ( $E_{\text{Verluste WR}}$ ). Der graue Energiefluss ( $E_{\text{Netz}}$ ) stellt jene Energie dar, die vom Netz benötigt wird, um die Verbrauchslast ( $E_{\text{Verbrauch}}$ ) zu decken. Die Verbrauchslast ( $E_{\text{Verbrauch}}$ ) wird vom grünen Pfeil dargestellt.

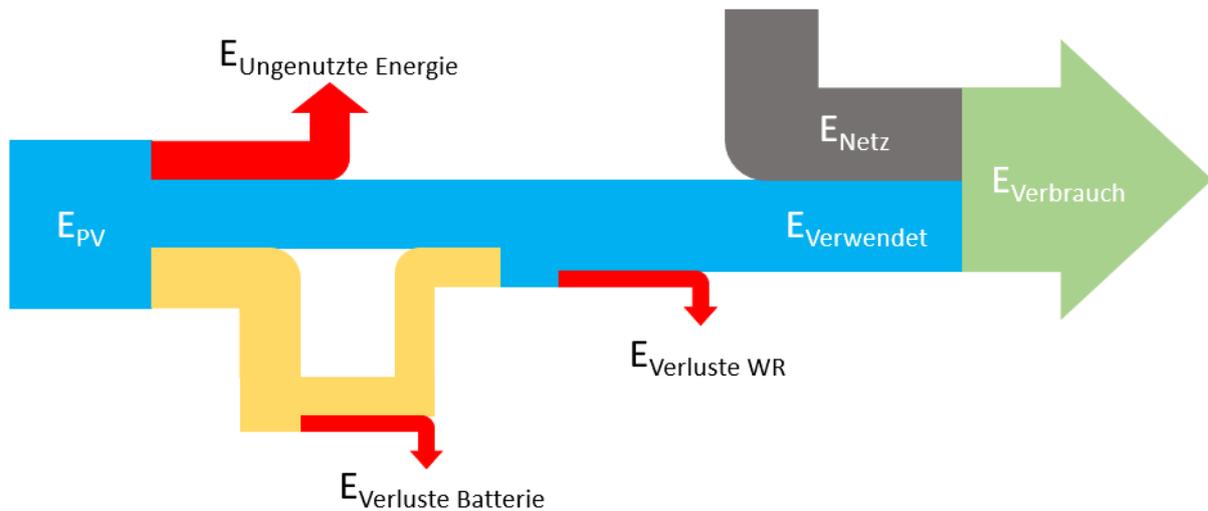


Abbildung 10: Energieflüsse SolMate

Um diese Energieflüsse zu optimieren, müssen unterschiedliche Betriebszustände implementiert werden. Diese sind nachfolgend dargestellt.

### Variante 1

Die erste Variante beschreibt eine Situation, bei der am PV-Panel so viel Leistung  $P_{PV}$  erzeugt wird, dass sowohl die Batterie geladen werden kann als auch die Verbrauchslast  $P_{Verbrauch}$  gedeckt wird. Wenn die Batterie geladen wird, ist die Leistung des Akkus  $P_{Batterie}$  negativ, wenn diese entladen wird ist die Batterieleistung positiv. Die Abkürzung  $P_{WR,max}$  beschreibt die maximal mögliche übertragbare Leistung am Wechselrichter. Der Wirkungsgrad des Wechselrichters wird durch folgende Abkürzung  $\eta_{WR}$  dargestellt. Damit die Variante 1 zum Einsatz kommt, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

$$P_{Verbrauch} < P_{PV} * \eta_{WR} < P_{WR,max} \quad (1)$$

$$P_{Netz} = 0 \quad (2)$$

$$P_{Batterie} \leq 0 \quad (3)$$

In Ausnahmefällen, bei denen die Verbraucherlast größer ist als die maximale übertragbare Leistung am Wechselrichter, kann auch folgende Situation eintreten:

$$P_{WR,max} < P_{Verbrauch} < P_{PV} * \eta_{WR} \quad (4)$$

$$P_{Netz} = P_{Verbrauch} - P_{Wechsel,max} \quad (5)$$

$$P_{Batterie} \leq 0 \quad (6)$$

Die Abbildung 11 zeigt die Variante 1 im Regelfall.

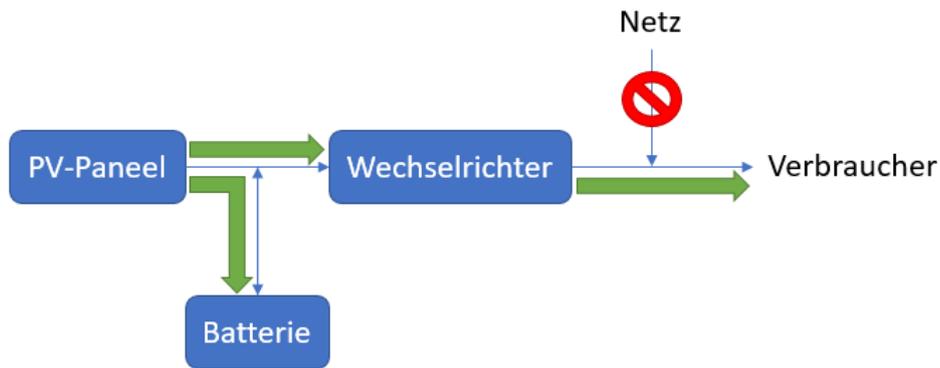


Abbildung 11: System: Variante 1

## Variante 2

In diesem Fall wird die Verbrauchslast durch die am PV-Paneel erzeugte Leistung  $P_{PV}$  und durch die in der Batterie gespeicherte Energie gedeckt. Es wird im Regelfall kein Strom vom Netz benötigt. Folgende Bedingungen müssen bei Eintreffen der Variante 2 erfüllt sein:

$$P_{PV} * \eta_{WR} < P_{Verbrauch} \leq (P_{PV} + P_{Batterie}) * \eta_{WR} \quad (7)$$

$$P_{PV} + P_{Batterie} \leq P_{WR,max} \quad (8)$$

$$|P_{Batterie}| \leq P_{Batt,max} \quad (9)$$

$$P_{Netz} = 0 \quad (10)$$

$$P_{Batterie} \geq 0 \quad (11)$$

Wie bei Variante 1 kann auch bei Variante 2 durch eine hohe Verbrauchslast, die größer als die maximal übertragbare Wechselrichterleistung ist, ein Sonderfall entstehen, bei dem zusätzliche Leistung vom Netz benötigt wird, um die Last zu decken:

$$P_{PV} * \eta_{WR} < P_{Verbrauch} < (P_{PV} + P_{Batterie}) * \eta_{WR} \quad (12)$$

$$P_{WR,max} < P_{PV} + P_{Batterie} \quad (13)$$

$$|P_{Batterie}| \leq P_{Batt,max} \quad (14)$$

$$P_{Netz} = P_{Verbrauch} - P_{WR,max} \quad (15)$$

(16)

$$0 \leq P_{\text{Batterie}}$$

Die folgende Abbildung 12 beschreibt Variante 2 im Regelfall.

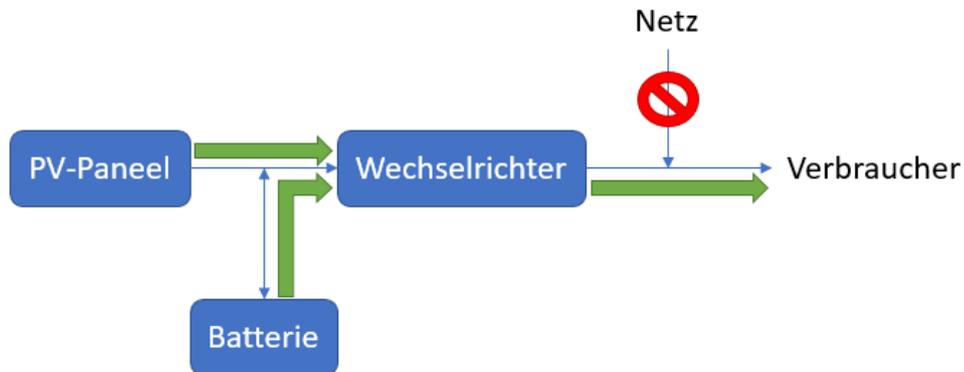


Abbildung 12: System: Variante 2

### Variante 3

Bei der Variante 3 ist die Batterie leer und es kann keine Energie am PV-Paneel erzeugt werden. Daher muss Strom aus dem Netz genutzt werden, um die Verbrauchslast zu decken. Folgende Bedingungen müssen erfüllt sein:

(17)

$$P_{PV} + P_{\text{Batterie}} = 0$$

(18)

$$P_{\text{Netz}} = P_{\text{Verbrauch}}$$

Wie in Abbildung 13 gezeigt, wird in diesem Fall die Energie zur Deckung der Verbrauchslast direkt aus dem Netz bezogen.

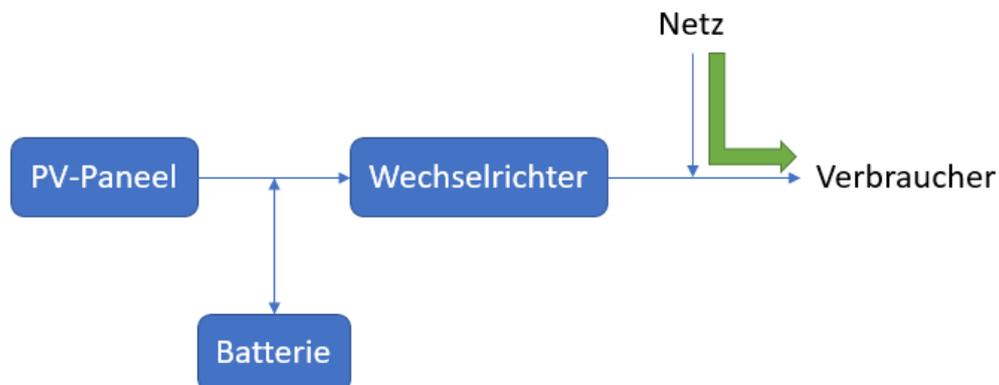


Abbildung 13: System: Variante 3

## Variante 4

Im Falle der Variante 4 ist die Verbrauchslast so groß, dass die Energie der Batterie und des PV-Panels nicht ausreicht. Daher wird auch Strom vom Netz benötigt, um die Last zu decken. In dieser Situation muss folgende Voraussetzung erfüllt sein:

(19)

$$0 < (P_{PV} + P_{Batterie}) * \eta_{WR} < P_{Verbrauch}$$

(20)

$$|P_{Batterie}| \leq P_{Batt,max}$$

(21)

$$P_{PV} + P_{Batterie} \leq P_{WR,max}$$

Die Abbildung 14 zeigt den Vorgang, bei dem die Variante 4 eintritt.

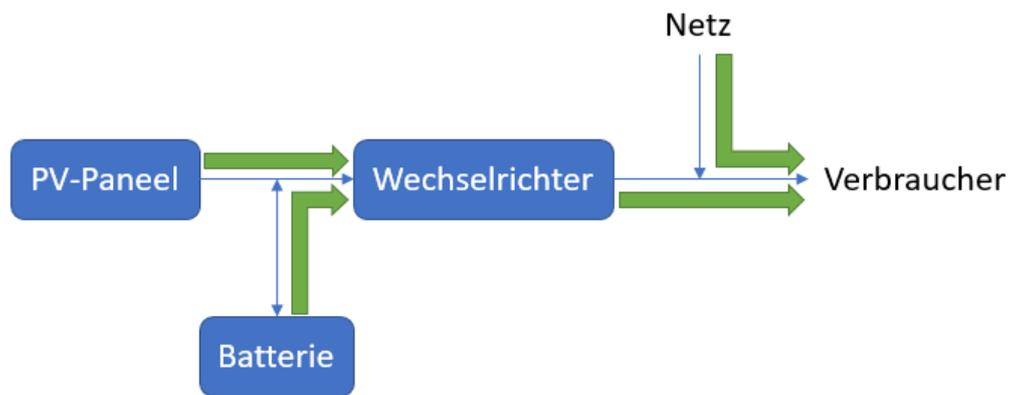


Abbildung 14: System: Variante 4

Mithilfe der Implementierung dieser Operationsvarianten in das erstellte Simulationsprogramm konnten unterschiedliche Simulationen durchgeführt werden, um die optimale Baugröße unterschiedlicher Bauteile zu bestimmen und diverse andere Auswertungen durchzuführen.

Ermittelt wurden folgende Themengebiete:

- Ermittlung der Batteriespeichergröße
- Ermittlung der Alterungseffekte der Batterie
- Betriebsschwelle für den Wechselrichter
- Urlaubsmodus
- Individuelle Verbrauchslastdaten

Die Ergebnisse zu den oben genannten und untersuchten Design- und Betriebsparametern finden sich in Kapitel 5 Ergebnisse.

#### **4.1.8. Validierung des Gesamtsystems**

Um das beschriebene Modell des Gesamtsystems und die daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen zu überprüfen, wurden im Labor der Montanuniversität Leoben Versuche zur Validierung durchgeführt. Das Ziel der Laborversuche war es, die Ergebnisse hinsichtlich der Systemauslegung (z.B. Größen Inverter, PV-Paneele, Batterie) und des Betriebsverhaltens (z.B. Verbrauchsbestimmung, Speicherbewirtschaftung), die mittels Gesamtmodell bestimmt wurden, zu überprüfen.

#### **Versuchsaufbau 1**

Beim ersten Versuchsaufbau zur Validierung des modellierten Gesamtsystems wurde versucht, das Konzept der Firma EET mittels den bereits im Labor vorhandenen Geräten und dem SolMate zu simulieren.

##### Verwendete Geräte

Zur Simulation des SolMates wurden folgende Geräte verwendet:

- DC Erzeuger 5 kW (PSI 9750-20 3U 19“ 3HE 5000W)
- Messgerät (Mavowatt 240 – Gossen Metrawatt)
- AC Verbrauchslastgenerator (Cinergia EL-7.5)

##### Aufbau

Die Abbildung 15 zeigt den Stromlaufplan des ersten Versuchsaufbaus. Um die PV-Anlage zu simulieren, führte die Leitung des DC-Gerätes zum SolMate. Die Verbrauchslast sollte vom AC-Gerät simuliert werden, daher war dieses mit dem SolMate verbunden. Da das AC-Gerät jedoch grundsätzlich für einen Dreiphasenbetrieb aufgebaut ist, musste es auf einen Einphasenbetrieb umgebaut werden. Zusätzlich war das SolMate System über die ganz oben eingezeichnete Leitung (FI-Schalter 2F) mit dem Netz verbunden. Ein FI-Schalter stellt für die NetDetection eine Barriere zum vorgelagerten Netz dar. Die Verbindung mit dem Netz musste über einen eigenen gesicherten FI-Kreislauf geführt werden, damit keine zusätzliche Verbrauchslast vom SolMate gemessen werden konnte und somit keine Verfälschungen an der Simulation auftreten konnten.

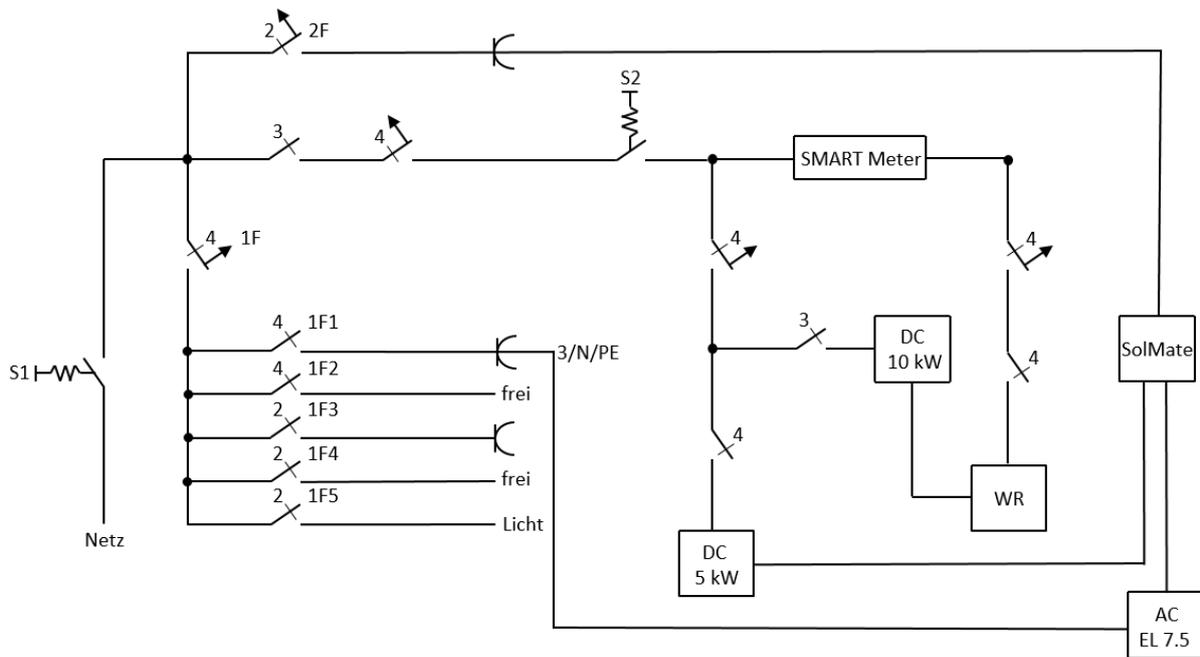


Abbildung 15: Stromlaufplan erster Versuchsaufbau

Die Validierung anhand dieses eigens konzipierten Versuchsaufbaus (Abbildung 16) konnte nicht erfolgreich abgeschlossen werden. Der Grund dafür war der interne Aufbau der programmierbaren AC-Last von Cinergia. Diese simuliert einen AC-Verbrauch über einen Zwischenkreis, der jedoch von einem Trenntransformator und zwei EMF-Filtern umgeben ist. Aufgrund dieses Aufbaus konnte die NetDetection über Impedanzspektroskopie die anliegende AC-Last nicht akkurat erkennen und das restliche Betriebsverhalten danach ausrichten. Daher wurde ein zweiter Versuchsaufbau mit einer reinen ohmschen Last konzipiert, der nachfolgend genauer beschrieben ist.



Abbildung 16: Ansicht des Versuchsaufbaus mit Verteiler- und Sicherungskasten, Gleichspannungsquellen, AC-Last und SolMate

## Versuchsaufbau 2

Beim zweiten Versuchsaufbau wurde versucht, das Konzept der Firma EET mittels zwei Stehlampen, einer Steckdosenleiste, zwei Zeitschaltuhren und dem SolMate zu simulieren.

### Verwendete Geräte

Zur Simulation des SolMates wurden folgende Geräte verwendet:

- DC Erzeuger 5 kW (PSI 9750-20 3U 19" 3HE 5000W)
- Zeitschaltuhren (TGE-2A)
- 2 Stehlampen (je Lampe 300W + 40W)
- Messgerät (Mavowatt 240 – Gossen Metrawatt)

### Aufbau

Beim zweiten Versuchsaufbau wurden zwei Stehlampen als ohmsche Verbraucher gewählt. Diese wurden direkt am SolMate angeschlossen. Zur Simulation der PV-Anlage wurde die DC-Quelle verwendet. Zusätzlich zu den internen Messungen im SolMate wurde auch ein externes Messgerät angeschlossen, um den Laststrom (3), den Netzstrom (1) und den Batteriestrom (2) und dessen jeweilige Spannung zu messen. Dieser Aufbau wird in der Abbildung 17 gezeigt, Bilder von Messaufbau sind in Abbildung 18 zu sehen. Über die programmierbaren Zeitschaltuhren konnten die ohmschen Verbraucher zeitlich gestaffelt ein- und ausgeschaltet und damit ein ohmscher Verbrauchslastgang nachgestellt werden.

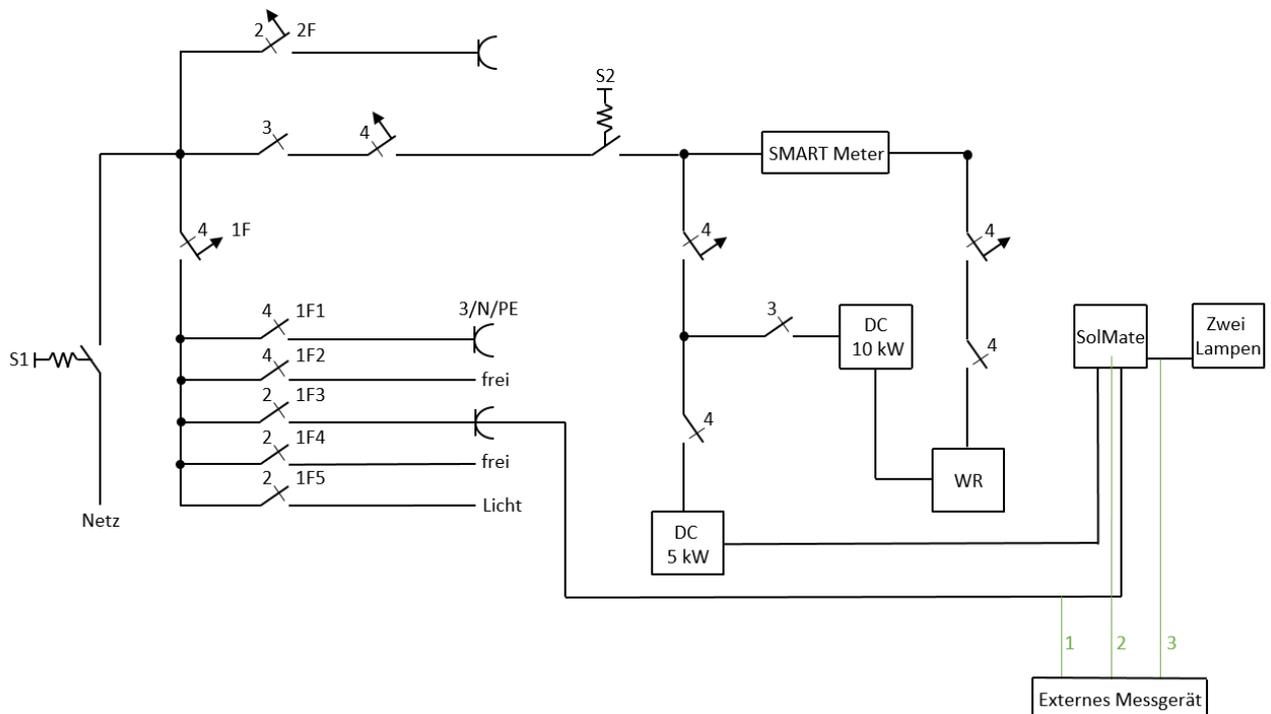


Abbildung 17: Stromlaufplan zweiter Versuchsaufbau



Abbildung 18: Einsatz von Gleichstrom-Messzange und Rogowsky-Spule im SolMate (links), Zeitschaltuhren (mittig) und Messgerät von Gossen (rechts)

Um zusätzlich den Einfluss des nachgelagerten Netzes zu untersuchen wurde ein Messaufbau analog zu Abbildung 17 auch außerhalb des Universitätsnetzes in einem Privathaushalt aufgebaut. Bei diesem Versuch wurde ein Heizlüfter als Last (1000 W) für den SolMate verwendet.

# 5 Ergebnisse

## 5.1. Entwicklung Energie-Services

Bei der gewählten Art der Feldforschung sollten durch Zufall anwesende Passant:innen in den Entwicklungsprozess eingebunden werden, indem sie mit dem Prototyp und dem „Minimum-Viable-Product“ konfrontiert und befragt wurden. Es wurde darauf geachtet, Ort und Zeit so zu wählen, dass die gewünschte Zielgruppe in möglichst hohem Ausmaß angetroffen werden konnte. Die aus Workshop und Literaturrecherche getroffenen Hypothesen wurden so geprüft, sowie Motive zu Bedürfnissen, Interesse an solchen Energie-Service-Produkten und Einflussfaktoren auf Kaufentscheidungen untersucht. Das Entwicklungsteam von EET war bei diesem Pop-Up-Innovation Lab ebenfalls anwesend, um das generierte Wissen direkt in den weiteren Entwicklungsprozess einfließen lassen zu können.



Abbildung 19: Pop-Up-Innovation Lab zur Einbindung von Endkund:innen-Meinungen in den Entwicklungsprozess im Frühjahr 2018 in Graz

Anhand des generierten Wissens über Bedürfnisse der Need Owner und den entsprechenden Anforderungen an Energieservices wurden in Folge Geschäftsmodell-Prototypen entwickelt. Dabei wurde zum einen darauf geachtet, dass die NetD-Technologie für unterschiedliche Anwendungsfälle in Frage kommt, sowohl international aber auch für B2C- als auch B2B-Kund:innen. Diese möglichen Geschäftsmodelle wurden erneut in einem interdisziplinären Projektworkshop behandelt und weiterentwickelt. Parallel dazu waren die einzelnen Stakeholder des Projektteams immer wieder im Austausch mit unterschiedlichen Expert:innen aus der Energiebranche und Forschungsinstitutionen, um die Anwendungsfälle für die NetD-Technologie weiter zu evaluieren und verbessern.

Während des Feldtests zur technologischen Finalisierung wurden die Eindrücke und Meinungen der teilnehmenden Testkund:innen ebenso erneut untersucht. Hierfür wurden halb-strukturierte Telefoninterviews, Beobachtungen bei der Inbetriebnahme des SolMate-Prototypen in Kooperation mit dem Living Lab sowie Forschungstagebücher genutzt.



Abbildung 20: Forschungstagebuch und Informationsmaterialien begleitend zum Feldtest. Installation von SolMate in den Testhaushalten (rechts unten: Dr. Christoph Grimmer bei Inbetriebnahme)

## 5.2. Hardwareentwicklung Messtechnik

Der zunächst verwendete AD630 (Modulator/Demodulator) IC mit einem Preis von ca. 20€ wurde durch einen diskret aufgebauten Lock-In Verstärker ersetzt (in Summe ca. 2€ für Analogschalter, Operationsverstärker, Filterelemente). Dadurch und durch den Ersatz des THT dsPICs durch ein SMD Pendant konnten auch die drei verschiedenen Betriebsspannungen von 18V, 5V und 3.3V auf eine 5V Spannungsversorgung reduziert werden, wodurch weitere kostensenkende Synergien entstanden. Grundsätzlich wurden die meisten Trough Hole Komponenten durch SMD Komponenten ersetzt, wodurch Platzeinsparung erreicht wurde, sowie die industrielle Fertigbarkeit und EMV Verhalten verbessert wurden. Die Kosten für die NetD Komponenten Technik kommen bereits bei geringen Stückzahlen (100 Stück) auf 14€.

## 5.2.1. Ergebnisse Gesamtmodell

### Standardparameter

Als Verbrauchslastgang in der Simulation wurde ein Beispielhaushalt mit einem Beobachtungszeitraum von einem Jahr gewählt. Diese Last bestimmt den von der Anlage, beziehungsweise je nach benötigter Menge an Energie, den vom Netz benötigten Strom. Bei diesem Haushalt wurden alle drei Phasen gemessen. Da das System des SolMates nur zur Deckung von Verbrauchslasten auf einer Phase ausgelegt ist, wurden die Beispieldaten durch drei dividiert, was deshalb nicht der Realität entspricht. Um zu belegen, dass die Ergebnisse aus dem gewählten Beispielhaushalt repräsentativ sind, wurden diese mit Ergebnissen aus anderen Verbraucherlastdaten verglichen.

Um vergleichbare Ergebnisse bei den unterschiedlichen Simulationen zu erhalten, mussten gewisse Parameter immer als gleich angenommen werden. Diese Grundeinstellungen lauteten wie folgt:

- Größe des Paneels = 2,5 m<sup>2</sup>
- Orientierung nach Süden = 0 °
- Paneel Neigung = 30 °
- Effizienz der Batterie = 95 %
- Maximale übertragbare Inverter-Leistung = 500 W
- Größe der Batterie = 1000 Wh
- Maximale Ausgabeleistung der Batterie = 1000 Wh
- DoD (Depth of Discharge) = 80 %

Die Größe des Paneels, die Invertergröße, sowie die Größe der Batterie wurden am Beginn der Auswertung mittels einer Sensitivitätsanalyse bestimmt. Diese Analyse stellt unterschiedliche Varianten der einzelnen Komponenten gegenüber, wodurch die optimalen Bauteilgrößen ermittelt werden konnten. Folgende Bereiche wurden zur Auswertung der Sensitivitätsanalyse gewählt:

- Größe des Paneels = 1,5 m<sup>2</sup> - 6 m<sup>2</sup>
- Maximale übertragbare Inverter-Leistung = 100 W - 1000 W
- Größe der Batterie = 0 Wh - 4000 Wh

Außerdem wurden die Auswirkungen der Orientierung nach Süden und des Winkels zur Horizontalen des PV-Paneels auf die Energieerzeugung ermittelt. Es ergab sich, dass eine Orientierung mit 0 Grad, was einer exakten Ausrichtung nach Süden entspricht, die größtmögliche Leistungserzeugung ermöglicht. Wird das Paneel um 30 Grad zur Horizontalen geneigt angebracht, ist in diesem Fall ebenfalls ein Optimum erreicht.

### Photovoltaikgröße

In der Abbildung 21 wird die PV-Fläche der gesicherten Energie gegenübergestellt. Die gesicherte Energie ist jene Energie in kWh, die aufgrund des SolMates nicht vom Netz zur Deckung der Verbrauchslast benötigt wird. Die x-Achse zeigt die Größe der PV-Fläche und die y-Achse die Menge an gesicherter Energie. In weiterer Folge wurde eine Größe der PV-Fläche von 2,5 m<sup>2</sup> gewählt, um das System auch zum Beispiel in kleinen Wohnungen mit kleinen Balkonen verwenden zu können.

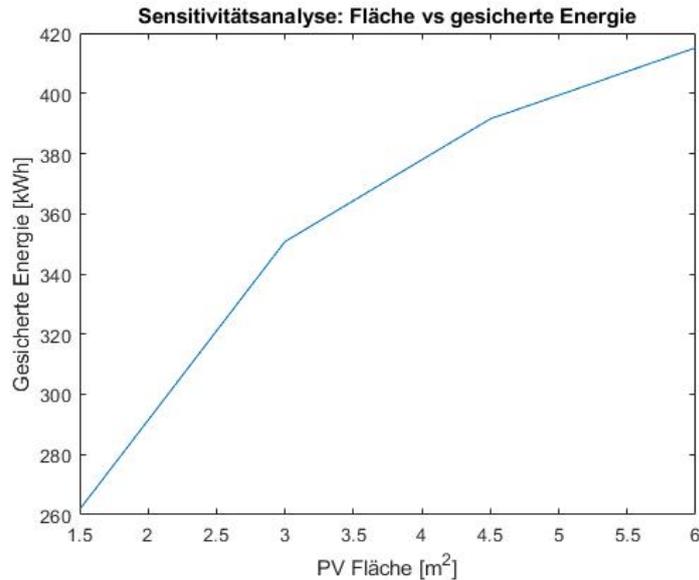


Abbildung 21: Gegenüberstellung PV-Fläche und gesicherte Energie

### Invertergröße

In Abbildung 22 wird die maximale übertragbare Inverter-Leistung der gesicherten Energie gegenübergestellt. Die x-Achse gibt die maximale übertragbare Inverter-Leistung und die y-Achse die Menge an gesicherter Energie an. In weiterer Folge wurde aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und aufgrund der Ergebnisse der Analyse eine Invertergröße von 500 W gewählt. Der Rückgang der gesicherten Energie nach 500 W ergibt sich dadurch, dass durch das individuelle Lastprofil beziehungsweise durch die fluktuierende Energieerzeugung am PV-Modul, im Zusammenspiel mit der eingebauten Batterie, bei größeren Übertragungsleistungen ein neues Deckungsprofil der Last entsteht. Dieses ermöglicht kurzzeitig die Deckung von höheren Lastspitzen. Es führt jedoch auch dazu, dass die Batterie auf Grund der zuvor genannten Erzeugungs- und Lastprofile gesamt weniger Energie speichern kann und somit die Systemeffizienz geringfügig verschlechtert wird.

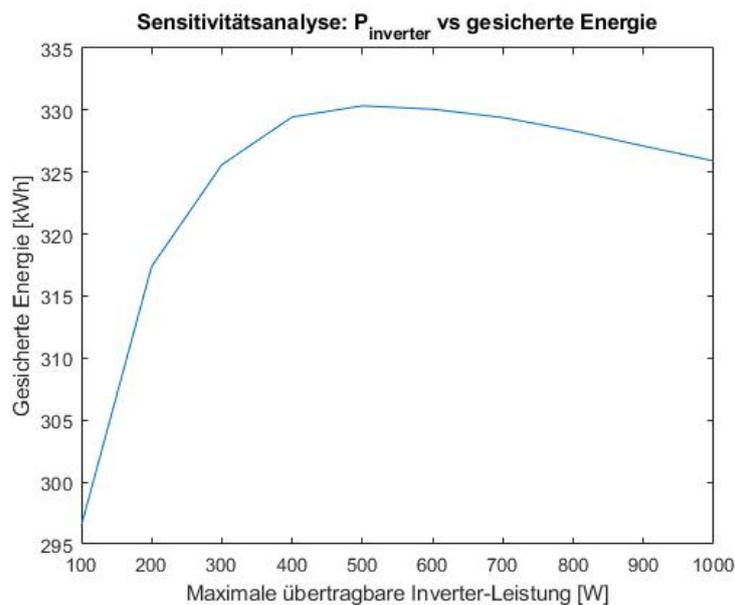


Abbildung 22: Gegenüberstellung maximale übertragbare Inverter-Leistung und gesicherte Energie

## BatteriespeichergroÙe

In der folgenden Abbildung 23 wird auf der y-Achse die gesicherte Energie pro Jahr dargestellt. Die x-Achse gibt die größtmögliche Speicherkapazität in Wh an. Bei der genaueren Betrachtung der blauen Linie ist zu erkennen, dass die Menge der gesicherten Energie mit der SpeichergroÙe des Speichermediums steigt. Da bei der Wahl der AkkugroÙe auch ökonomische Gesichtspunkte betrachtet werden müssen, sehen wir ein Optimum in der GröÙenordnung zwischen 1 und 2 kWh.

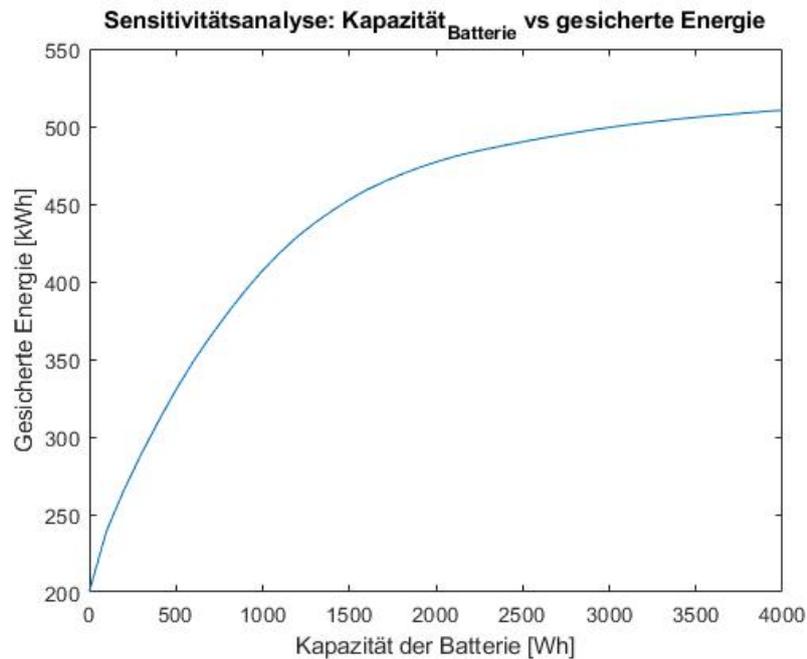


Abbildung 23: Gegenüberstellung BatteriegröÙe und gesicherte Energie

## Alterungseffekte der Batterie

Die Alterung der Batterie nimmt mit erhöhtem DoD (Depth of discharge) des Akkus zu. Um ein Gleichgewicht zwischen Alterung und Effizienz der Anlage zu erhalten, empfiehlt sich eine Entladetiefe von 80 %. Es ist zu erwähnen, dass die Simulation der Alterung auf Literaturdaten basiert und daher nur als Richtwert dient und somit kein Anspruch auf eine exakte Beschreibung des zellspezifischen Alterungsverhalten gegeben ist. Die Alterung der Batterie (SoH - State of Health) in Abhängigkeit des gewählten DoDs wird in der nachfolgenden Abbildung 24 gezeigt.

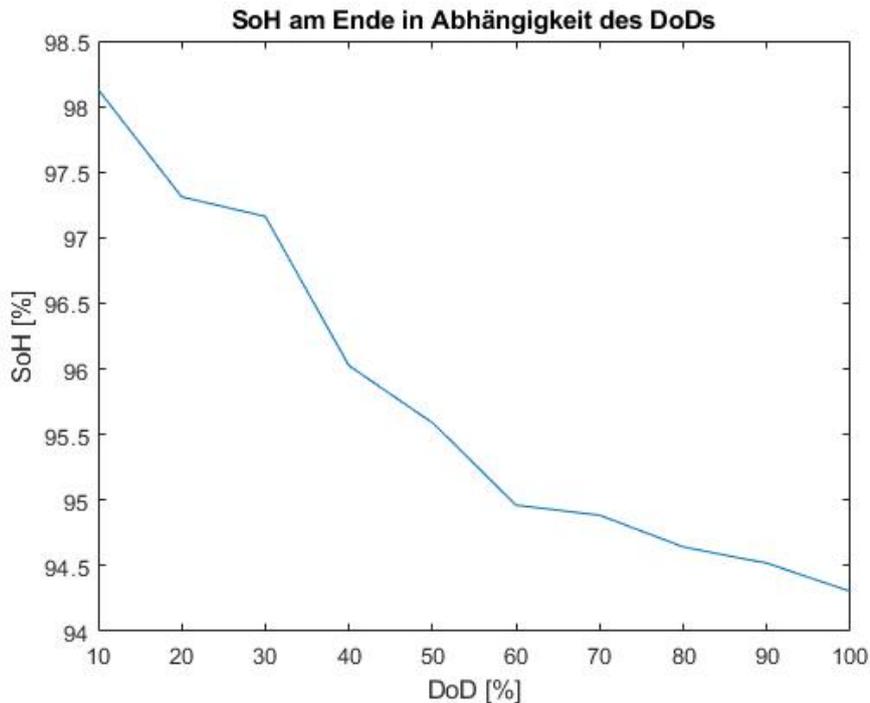


Abbildung 24: State of Health (SoH) in Abhängigkeit der Depth of Discharge (DoD)

### Betriebsschwelle für den Wechselrichter

Auf Basis der Versuchsdaten der Firma EET konnte der Wirkungsgrad des Wechselrichters in Abhängigkeit der übertragenen Leistung bestimmt werden. Dies ergab, dass bei einer Übertragungsleistung von unter 15 % ein Wirkungsgrad von teils deutlich unter 90 % erzielt wird, was im Vergleich zu höheren Übertragungsleistungen einen geringen Wirkungsgrad darstellt. Daher stellt sich die Frage, ob Energieverluste durch eine Betriebsschwelle reduziert werden könnten.

Die Auswertungen haben gezeigt, dass dies nicht der Fall ist, denn durch eine Betriebsschwelle würden erhöhte Energieverluste in anderen Bereichen entstehen, wie in Abbildung 25 gezeigt. Bei dem erwähnten Diagramm wurden der DoD und die Batterieausnahme mit 80 % gewählt. Die Batterieausnahme soll jene Grenze darstellen, bei der keine Betriebsschwelle zustande kommt, auch wenn die zu übertragende Leistung unter die Betriebsschwelle fällt. Die Ausnahme gilt für Ladezustände von 80 % und darüber. Die y-Achse in der Abbildung zeigt die Verlustenergie in kWh. Diese umfasst den gesamten Energieverlust (blau): den Energieverlust am Inverter (rot), die Verluste an der Batterie (gelb) und die ungenutzte Energie (violett). Die x-Achse stellt die Betriebsschwelle des Wechselrichters dar.

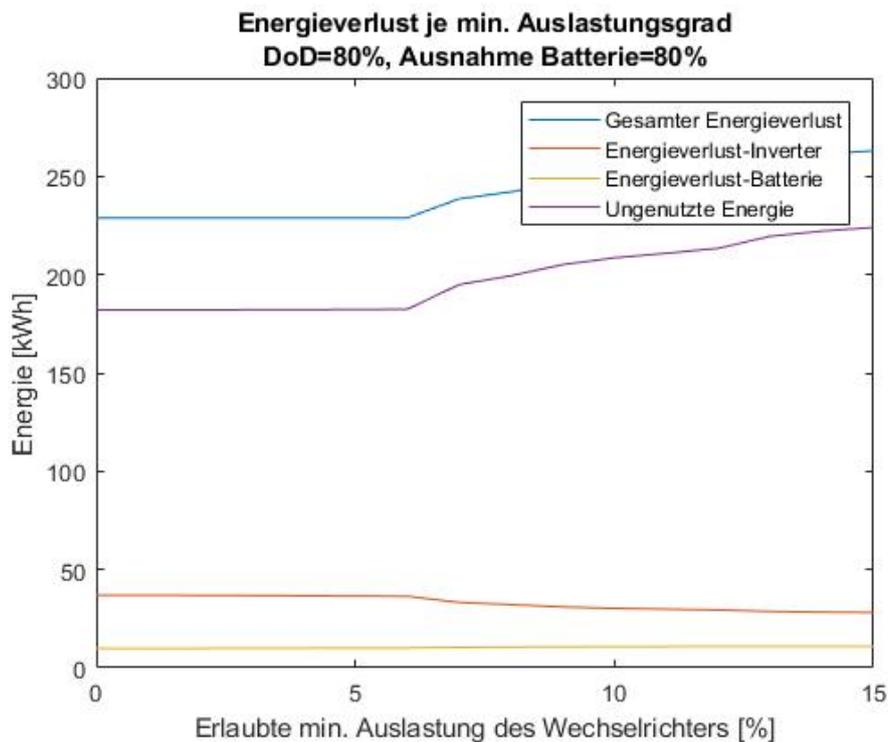


Abbildung 25: Energieverlust je min. Auslastungsgrad (DoD=80 %, Batterie Ausnahme=80 %)

### Urlaubsmodus

Im Urlaub wird nur circa 40 % der Energie des Regelbetriebes benötigt. Wenn der DoD im normalen Betrieb bereits hohe Entladetiefen aufweist, ist eine Änderung der Anlage im Urlaub nicht zu empfehlen, da bereits hohe Autarkiegrade erzielt werden und sich die Alterung nur minimal zu einem anderen DoD (z.B. 20 %) unterscheidet.

### Individuelle Verbrauchslastdaten

In diesem Abschnitt wurden unterschiedliche Verbrauchslastgänge verglichen. Hierbei handelte es sich um Daten, die in verschiedenen Haushalten gemessen wurden. Dabei wurde jeweils immer jede Phase im Minutentakt über ein Jahr einzeln gemessen. Es wurden Lastgängen ausgewählt, die sehr geringe, durchschnittliche und sehr hohe Verbrauchslastdaten aufweisen, um ein breites Spektrum von Haushalten abdecken zu können.

Abbildung 26 stellt den Autarkiegrad und den Eigenverbrauchsanteil in Abhängigkeit der Verbrauchslast dar. Die Last ist in diesem Diagramm, ausgehend von links mit der kleinsten (451,0 kWh/a) bis nach rechts mit der größten Verbrauchslast (3045,1 kWh/a) gestaffelt angegeben. Der Autarkiegrad und der Eigenverbrauchsanteil weisen eine klare Tendenz in Abhängigkeit der Größe der Last auf. Je größer die Verbrauchslast, desto größer ist der Eigenverbrauchsanteil und desto geringer ist der Autarkiegrad. Die leichten Schwankungen stammen davon, dass jede Messung ein individuelles Lastprofil aufweist.

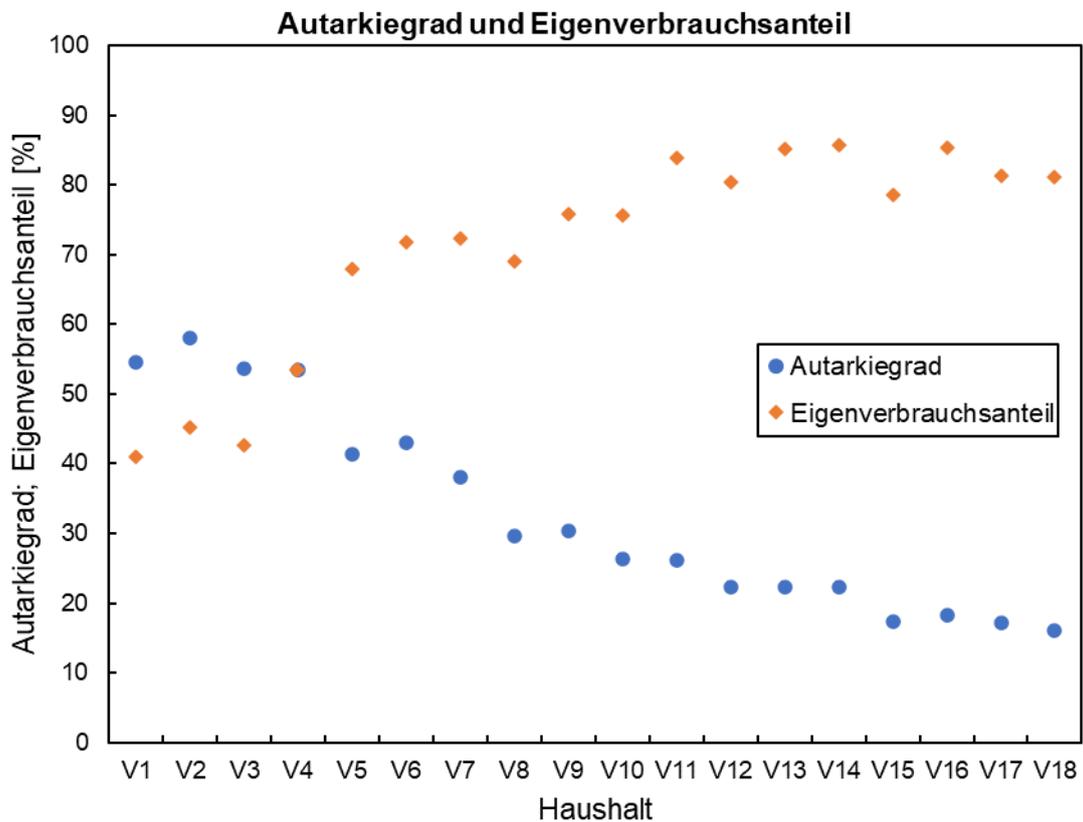


Abbildung 26: Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil bei unterschiedlichen Verbrauchslastdaten

### Autarkiegrad

Der Autarkiegrad beschreibt die von einer Anlage lokal bereitgestellte Energie bezogen auf die lokal, direkt verbrauchte Energie.

$$\zeta_{Eigen} = \frac{E_{Verwendet}}{E_{PV}} \quad (22)$$

### Eigenverbrauchsanteil

Wenn der lokal erzeugte Photovoltaikstrom direkt verbraucht wird, nennt man dies Eigenverbrauch ( $\zeta_{Eigen}$ ). Der Anteil des Stroms, der direkt verbraucht und nicht ins Netz eingespeist wird, ist daher der Eigenverbrauchsanteil. Da bei dieser Anlage keine Netzeinspeisung geplant ist, würde dieser Anteil immer 100% ergeben. Um aussagekräftige Vergleichswerte zu erhalten, wurde daher die Berechnung der Kennziffer etwas verändert. Die veränderte Variable berechnet sich wie folgt:

$$\zeta_{Eigen} = \frac{E_{Verwendet}}{E_{PV}} \quad (23)$$

Bei dieser Formel wird die Energie, die von der Photovoltaik-Anlage produziert und zur Deckung der Last verwendet wird ( $E_{Verwendet}$ ), auf die gesamte von der PV-Anlage erzeugte Energie ( $E_{PV}$ ) bezogen.

## Fazit Gesamtmodell

Die Validierung des Gesamtmodells stellte sich herausfordernd dar, da der reale, mittels NetDetection ermittelte Stromverbrauch stark schwankt und von mehreren, zum Teil noch nicht ausreichend untersuchten Faktoren beeinflusst wird. Daher wurde besonders viel Wert darauf gelegt, auftretende Abweichungen des realen Testsystems vom modellierten Gesamtsystem zu erörtern. Im Rahmen der Validierung konnten mehrere Ursachen dafür ergründet werden. Daher werden im Kapitel 6 Einflussfaktoren, Erklärungen für die auftretenden Abweichungen und erarbeitete Lösungsvorschläge dargestellt. Die Validierung soll nach Modifikationen (siehe beschriebene Punkte) außerhalb des Projektrahmens fortgesetzt werden.

Im Zuge der Testung haben sich Optimierungspotentiale gezeigt, welche bereits in Umsetzung sind. Zunächst wurde mit dem Inverter-Hersteller geklärt, diese nur mehr im Maximum Power Point (MPP) Modus auszuliefern. Der zwischenzeitlich verwendete Spannungsregelmodus wurde irrtümlich auf einigen Invertern aktiviert, wodurch die Akkus nicht unter 48 V entladen werden konnten. Im MPP Modus besteht diese Limitierung nicht.

Sind im verwendeten Netz Geräte mit Netzfiltern verbaut, tritt bei der Signaleinspeisung ein Sättigungseffekt ein, wodurch Leistungsänderungen im Endverbraucherkreis nur mehr mit geringer Auflösung detektiert werden. Die neueste Variante beinhaltet deshalb neben dem Lock In-Verstärker, der über ein Referenz-Signal in verschiedenen Modis messen kann, noch eine zusätzliche Messmethode. Diese reagiert im Gegensatz zur bisherigen rein phasensensitiven Messung nun auch phasenunabhängig auf Admittanz-Änderung, es wird dabei der absolute Betrag der Amplituden-Änderung detektiert. Die beiden gleichgerichteten Signale werden deshalb mittels eines hochauflösenden Analog-Digital Konverters umgewandelt, sodass auch sehr kleine Laständerungen sichtbar sind und Änderungen auch bei mehreren Netzfiltern (z.B.: Geräte mit X2-Kondensatoren am Eingang) an derselben Phase detektiert werden.

### 5.2.2. Ergebnisse Feldtests

Im Zuge des Projektes wurden 15 Haushalte mit SolMate Prototypen ausgestattet und getestet. Drei Haushalte haben bereits über Smartmeter verfügt. Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen zwei Tagesverläufe der wichtigsten Größen. Während am ersten Tag (6. November) keine große PV-Leistung zu verzeichnen war, wurden dennoch Lasten in den Abendstunden erkannt und entsprechend Leistung in den Haushalt eingespeist. Nachdem die Leistungen aber nicht vollständig vom 500 W Inverter gedeckt werden konnten, ist die Leistungslimitierung erkennbar. Am Folgetag wurden keine großen Verbräuche auf der angeschlossenen Phase detektiert; es konnte jedoch zumindest der Akku geladen werden. Wichtig dabei ist, dass die vom Smartmeter verzeichnete Leistung niemals 0 war. Einspeisungen ins öffentliche Netz haben also nicht stattgefunden. Dabei ist zu beachten, dass das Smartmeter die Wirkleistungsenergie aller drei Phasen ermittelt, während SolMate nur einphasig angeschlossen wird.

Eine Herausforderung dabei war die zeitliche Synchronisation der Daten, da mitunter die Geräte nicht ständig oder gar nicht mit dem Internet verbunden waren (aufgrund fehlender Echtzeitmodule) und teilweiser Sicherheitsabschaltungen (zum Schutz vor Tiefentladung der Akkus) zu einer nahe liegenden Systemzeit.

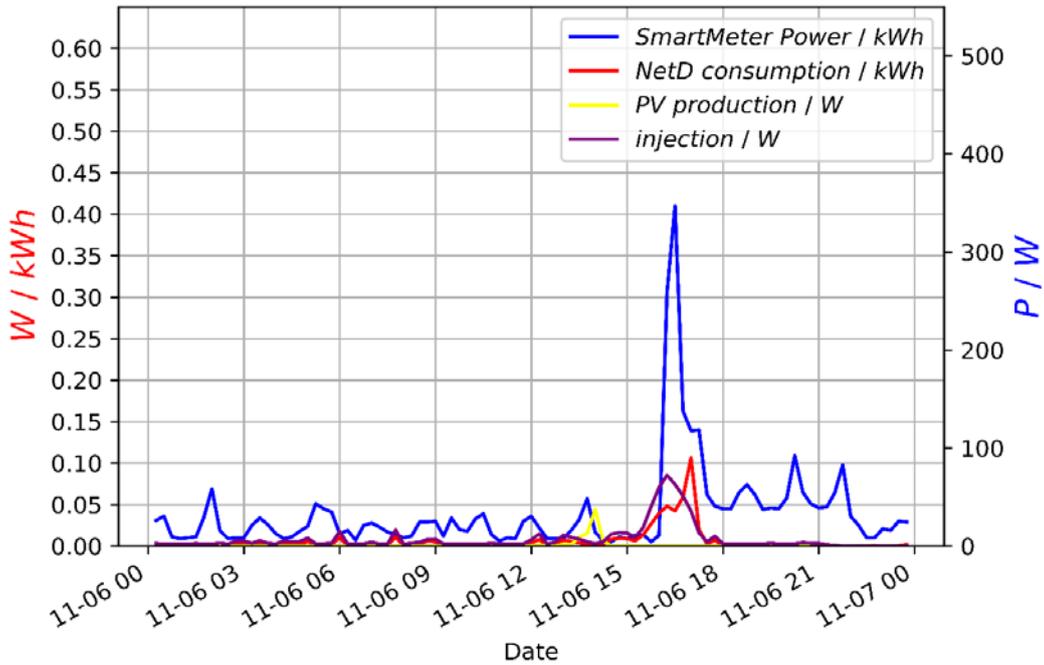


Abbildung 27: Tagesverlauf (6. November) eines Testsystems bei Testkunden zeigt die einphasigen NetD-Werte (rot) im Vergleich zu den 3-phasigen Smartmeter Daten (blau)

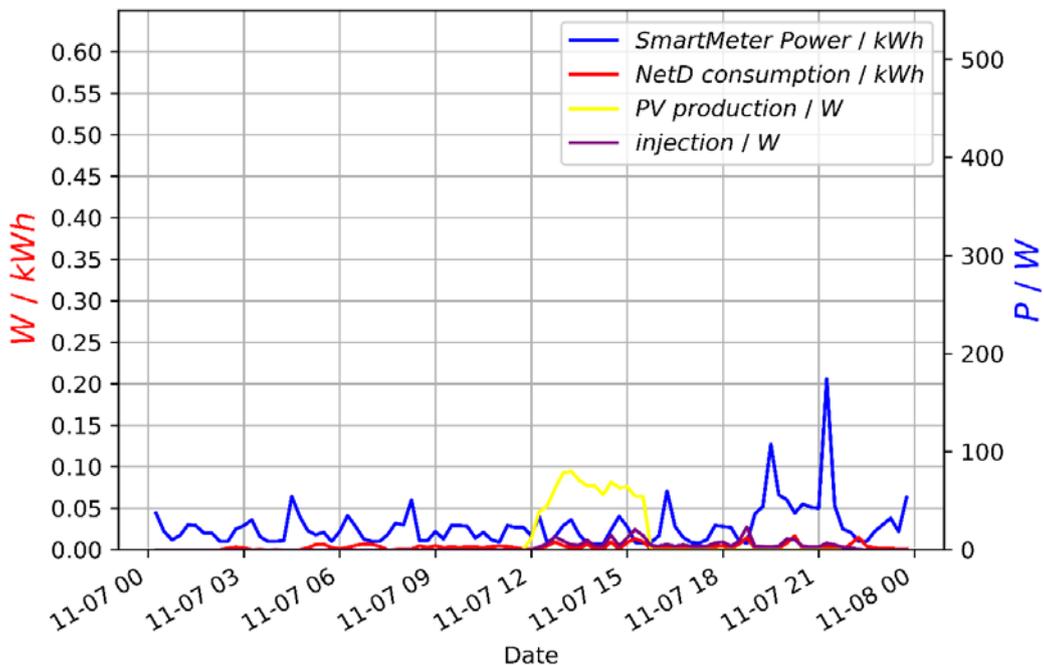


Abbildung 28: Tagesverlauf (7. November) eines Testsystems bei Testkunden zeigt die einphasigen NetD-Werte (rot) im Vergleich zu den 3-phasigen Smartmeter Daten (blau)

Im Verlauf der Feldtests konnte vor allem die Effizienz des verbauten MPP Trackers verbessert werden (Abbildung 29). Dies war vor allem den bei tiefen Temperaturen dem steigenden Innenwiderstand des Akkus geschuldet. Die Zwischenkreisspannung wurde in der ursprünglichen Schaltung so hoch gewählt, dass der Akku auch bis zum Erreichen der Ladeschlussspannung noch mit voller Leistung geladen werden konnte.

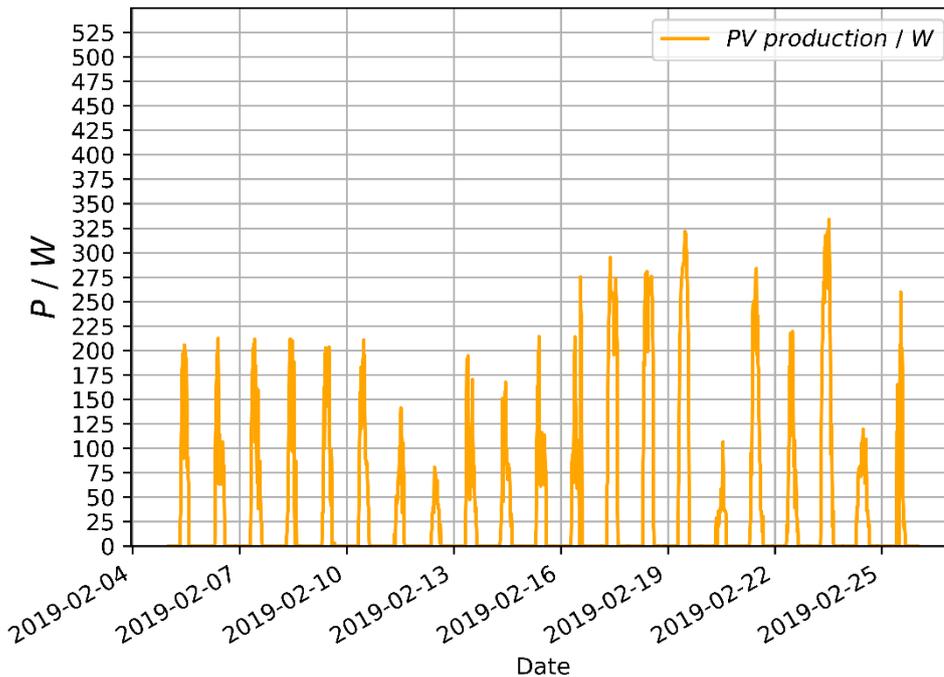


Abbildung 29: Wechsel des MPP 0.5 => MPP 1.1 am 16. Februar zeigt auch im Feldtest deutliche Leistungssteigerungen.

In diesem Zuge konnte die Schaltung vereinfacht werden, wodurch die Hochsetzsteller-Einheit mit der MPP-Einheit kombiniert wurde. Der Zwischenkreis konnte dadurch ebenfalls entfernt werden.

### 5.3. Einpassung in das Programm „Stadt der Zukunft“

Die in diesem Projekt entwickelte Technologie soll dabei helfen, bestehende Infrastruktur in Städten mit Speichertechnologien nachrüsten zu können. Nach dem Stand-der-Technik ist das relativ schwierig, speziell für Haushalte in Wohnungen.

Ziel dieses Projektes war die Entwicklung eines Photovoltaik- und Stromspeichersystems für Haushalte im urbanen Raum und Bestandsgebäude. Es trägt damit unmittelbar zu dem Programmziel „Ressourcen- und Energieeffizienz und verstärkter Nutzung erneuerbarer Energieträger“ bei.

Außerdem werden die weiteren Programmziele direkt unterstützt:

**Ziel 2:** „Beitrag zur Optimierung und Anpassung der städtischen Infrastruktur und zur Erweiterung des städtischen Dienstleistungsangebots vor dem Hintergrund fortschreitender Urbanisierung und erforderlicher Ressourcen- und Energieeffizienz.“

SolMate stellt eine Technologie für urbane Räume und eine Nachrüstlösung für bestehende Gebäude dar.

**Ziel 3:** „Aufbau und Absicherung der Technologieführerschaft bzw. Stärkung der internationalen Wettbewerbsfähigkeit österreichischer Unternehmen und Forschungsinstitute auf dem Gebiet intelligenter Energielösungen für Gebäude und Städte.“

Das Konsortium besteht aus einem österreichischen Start-up sowie zwei österreichischen Hochschulen, welche beide die Technologieführerschaft im Bereich Energietechnik stärken konnten.

## 6 Schlussfolgerungen

Das Projekt P3Power hat alle technischen Ziele erreicht. Hier ist vor allem die Entwicklung und Überarbeitung der Hauptplatine zu nennen. In diese konnten die NetD-Technologie, Spannungsversorgung, Relais zum Schalten der Inverter und Schnittstellen integriert werden. Durch den diskreten Aufbau der Kernoperation der NetD-Technologie mithilfe von Analogschaltern konnten zum einen die Kosten gesenkt und zum anderen die Abhängigkeit von einem einzigen Hersteller des geeigneten Modulator ICs vermieden werden. Neben der Kostensenkung konnte im Zuge der Systemintegration der mangels geeigneter Alternative entwickelte Maximum Power Point Tracker entworfen, getestet und optimiert werden. Der ursprünglich entwickelte MPP bestand aus einem Hochsetzsteller-Modul, einem Zwischenkreis und einem MPP-Modul. Der verbesserte Ansatz verfügt lediglich über ein Hochsetzsteller-Modul, welches die Ausgangsspannung an die Eingangsleistung, die Akkuspannung und den Innenwiderstand des Akkus anpasst. Dadurch konnte die Effizienz wesentlich gesteigert werden.

Das Feedback der Testkund:innen konnte in die Entwicklung aufgenommen werden und wurde bereits umgesetzt bzw. befindet sich in Umsetzung. Teilweise ergaben sich unterschiedliche Vorgaben von Kund:innenseite – welche sich einen Urlaubsmodus, in welchem der Akkumulator besonders schonend betrieben wird, vorstellen können – während hingegen das entwickelte Modell vom Urlaubsmodus abrät, da der Gewinn an Lebensdauer vernachlässigbar gegenüber der nicht eingespeisten Menge an Energie für Stand-By-Verbraucher ist. Hinsichtlich der Optimierung der Speicherbewirtschaftung hat sich gezeigt, dass die einzige Stellgröße des Systems das Verhältnis von Speichergröße/Kapazität zu PV-Leistung ist. Untergrenzen bei der Einspeisung in Form einer Betriebsschwelle, damit der Inverter vermehrt im effizientesten Bereich betrieben wird, werden nicht umgesetzt, da diese in erhöhten Verlusten durch ungenutzte Energie resultieren. Die Verluste im Inverter sind dagegen vernachlässigbar.

Als weitere Optimierungsmöglichkeit wurde im Rahmen der durchgeführten Sensitivitätsanalyse gezeigt, dass bereits ein vergleichbar geringer Anstellwinkel gegenüber der senkrechten Montage an Brüstungen und Geländern deutliche Zuwächse im jahresbezogenen Energieertrag ermöglicht. An einer geeigneten kostengünstigen Aufständigung wird gearbeitet.

Durch die enge Zusammenarbeit zwischen Kund:innen und Entwickler:innen konnten einige Verbesserungen aufgezeigt werden. Die Rückmeldungen gingen zum Beispiel von im Wind klackernden Steckern bis zu einer Fixierungsmöglichkeit des Speichermoduls am Standfuß, wodurch ein nachträgliches Umstellen des Speichers erleichtert wird: Maßnahmen, die in der Regel mit wenig Aufwand kostengünstig umsetzbar waren.

## 7 Ausblick und Empfehlungen

Das entwickelte System befindet sich derzeit in der Industrialisierung und wird in absehbarer Zeit am Markt erhältlich sein.

Aus den Recherchen des Projektes sowie den zahlreichen Gesprächen mit Expert:innen aus der Energiebranche lässt sich schlussfolgern, dass Systeme, welche den Vorteil „Ease-of-Use“ für die Endkundin/den Endkunden aufweisen, sehr stark gefragt sind.

Außerdem stellte sich heraus, dass aufgrund anstehender Änderungen der regulativen Situation (Thema ElWOG-Novellierung mit Mieterstrom sowie Erneuerbaren-Ausbau-Gesetz) neue Geschäftsmodelle möglich werden. So wird es in Zukunft möglich sein, Energie P2P zu handeln, über Schwarmlösungen netzdienlich zu agieren oder ganz generell durch leistungsbezogene Netzgebühren die Attraktivität von Speichern weiter zu erhöhen. Dies sind die großen Trends, welche bei der Entwicklung von Energiesystemen berücksichtigt werden sollten.

Die Entwicklungsarbeiten einem zentralen Innovationslabor wie act4energy<sup>1</sup> im Südburgenland zuzuführen und zu bündeln, ist jedenfalls begrüßenswert. Um tatsächlichen Impact zu generieren (was unser aller Ziel sein muss), kann gute Koordinierung ein großer Hebel sein.

Weiterführende Arbeiten sollten sich vertieft mit den Themen Vernetzung von Energieproduktion und -speicherung befassen. Durch intelligente Steuerung von flexiblen Verbrauchern können viele Potentiale im urbanen Bereich gehoben werden. Weiters sollte das Thema Sektorenkopplung Strom-Wärme verstärkt in den Programmen abgebildet werden.

---

<sup>1</sup> <https://nachhaltigwirtschaften.at/de/sdz/projekte/enics.php>

# 8 Verzeichnisse

## 8.1. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Funktionsblockdiagramm des 1-phasigen Systems. ....	13
Abbildung 2: Schematische Darstellung des Installationsunterschiedes: Stand der Technik (links) und SolMate (rechts). ....	14
Abbildung 3: Double-Loop nach van der Pijl, Lokitz und Solomon (2016) als Grundlage für den iterativen Entwicklungsprozess.....	16
Abbildung 4: Darstellung der Value Proposition Canvas nach Osterwalder (2014) für ein relevantes Zielgruppensegment.....	17
Abbildung 7: Oben NetD V0.1 und NetD V0.3 nach dem 1. Forschungsjahr, unten NetD v2.0 nach dem 2. Forschungsjahr .....	18
Abbildung 8: Systemüberblick - Die rot eingerahmten Komponenten stellen eigene Entwicklungen dar. ....	19
Abbildung 9: Entwurf des webbasierten Userinterface zeigt Datenbankwerte an (links) und erlaubt wichtigste Systemeinstellungen zu treffen (rechts).....	19
Abbildung 10: Tägliche Einspeiseenergie und Durchschnittliche PV Leistung eines SolMates via Webinterface.....	20
Abbildung 11: Abbildung der Smartphone-App (entwickelt außerhalb des Projektes).....	21
Abbildung 12: Energieflüsse SolMate.....	23
Abbildung 13: System: Variante 1 .....	24
Abbildung 14: System: Variante 2 .....	25
Abbildung 15: System: Variante 3 .....	25
Abbildung 16: System: Variante 4 .....	26
Abbildung 17: Stromlaufplan erster Versuchsaufbau .....	28
Abbildung 18: Ansicht des Versuchsaufbaus mit Verteiler- und Sicherungskasten, Gleichspannungsquellen, AC-Last und SolMate.....	28
Abbildung 19: Stromlaufplan zweiter Versuchsaufbau.....	29
Abbildung 20: Einsatz von Gleichstrom-Messzange und Rogowsky-Spule im SolMate (links), Zeitschaltuhren (mittig) und Messgerät von Gossen (rechts).....	30
Abbildung 5: Pop-Up-Innovation Lab zur Einbindung von Endkund:innen-Meinungen in den Entwicklungsprozess im Frühjahr 2018 in Graz.....	31
Abbildung 6: Forschungstagebuch und Informationsmaterialien begleitend zum Feldtest. Installation von SolMate in den Testhaushalten (rechts unten: Dr. Christoph Grimmer bei Inbetriebnahme) .....	32
Abbildung 21: Gegenüberstellung PV-Fläche und gesicherte Energie.....	34
Abbildung 22: Gegenüberstellung maximale übertragbare Inverter-Leistung und gesicherte Energie.....	34
Abbildung 23: Gegenüberstellung Batteriegröße und gesicherte Energie .....	35
Abbildung 24: State of Health (SoH) in Abhängigkeit der Depth of Discharge (DoD).....	36

Abbildung 25: Energieverlust je min. Auslastungsgrad (DoD=80 %, Batterie Ausnahme=80 %).....	37
Abbildung 26: Autarkiegrad und Eigenverbrauchsanteil bei unterschiedlichen Verbrauchslastdaten	38
Abbildung 27: Tagesverlauf (6. November) eines Testsystems bei Testkunden zeigt die einphasigen NetD-Werte (rot) im Vergleich zu den 3-phasigen Smartmeter Daten (blau) .....	40
Abbildung 28: Tagesverlauf (7. November) eines Testsystems bei Testkunden zeigt die einphasigen NetD-Werte (rot) im Vergleich zu den 3-phasigen Smartmeter Daten (blau) .....	40
Abbildung 29: Wechsel des MPP 0.5 => MPP 1.1 am 16. Februar zeigt auch im Feldtest deutliche Leistungssteigerungen.....	41

## 8.2. Literaturverzeichnis

- Van Der Pijl P., Lokitz J., Solomon L. K.: Design a Better Business: New Tools, Skills, and Mindset for Strategy and Innovation. Wiley, 2016
- Osterwalder A.: Value Proposition Design: How to Create Products and Services Customers Want. Wiley, 2014

**Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie,  
Mobilität, Innovation und Technologie (BMK)**

Radetzkystraße 2, 1030 Wien

[bmk.gv.at](https://www.bmk.gv.at)