

Gemeinsamer Schlussbericht zum Verbundvorhaben

Energiemanagement mit Hilfe der modellprädiktiven Regelung für Mischnutzungsgebäude in ländlichen Regionen

Förderkennzeichen: 03EGB0033 A-E

Zuwendungsempfänger: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau DaLi Solarpower GmbH Immobilien Kafitz GmbH & Co. KG Ingenieur- und Gutachtergesellschaft Christian Persohn mbH IS Predict GmbH	Förderkennzeichen: 03EGB0033 A 03EGB0033 B 03EGB0033 C 03EGB0033 D 03EGB0033 E
Vorhabenbezeichnung: Energiemanagement mit Hilfe der modellprädiktiven Regelung für Mischnutzungsgebäude in ländlichen Regionen (EnerReg)	
Laufzeit des Vorhabens: 01.07.2021 – 31.10.2024	
Projektkoordination: Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau (RPTU)	

Inhalt

I.	Abbildungsverzeichnis.....	3
II.	Tabellenverzeichnis.....	6
III.	Abkürzungsverzeichnis.....	7
1	Kurzdarstellung.....	1
1.1	Aufgabenstellung.....	1
1.2	Voraussetzungen zur Durchführung.....	2
1.2.1	Erfahrung und Vorarbeiten der Projektpartner.....	2
1.2.2	Allgemeine Rahmenbedingungen.....	4
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn.....	6
1.5	Zusammenarbeit der Partner.....	9
2	Eingehende Darstellung.....	10
2.1	AP 1: Modellierung, Prädiktion und Regelung.....	10
2.1.1	AP 1.1 Energetische Gebäudemodellierung.....	10
2.1.2	AP 1.2 Predictive Intelligence.....	21
2.1.3	AP 1.3 Modellprädiktive Regelung.....	33
2.2	AP 2: Betriebswirtschaftlich-projektplanerische Untersuchungen.....	39
2.2.1	AP 2.1 Betriebs- und Geschäftsmodelle.....	39
2.2.2	AP 2.2 Prozessanalyse für Planung und Projektierung.....	41
2.3	AP 3: IKT-Komponenten.....	47
2.3.1	AP 3.1 Bidirektionales Laden (E-Auto).....	47
2.3.2	AP 3.2 Lade- und Steuergerät Altbatterie.....	54
2.4	AP 4: Demonstration.....	60
2.4.1	AP 4.1 Gesamtplanung und Projektierung.....	61
2.4.2	AP 4.2 Energieerzeugung und Batteriespeicher.....	64
2.4.3	AP 4.3 Mess- und Kommunikationstechnik.....	66
2.4.4	AP 4.4 Inbetriebnahme und Validierung.....	69
2.5	Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises.....	85
2.6	Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	86
2.7	Nutzen und Verwertbarkeit.....	88
2.8	Fortschritt anderer Stellen während des Vorhabens.....	90
2.9	Veröffentlichungen der Ergebnisse.....	90

I. Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Arbeitsstruktur des Vorhabens	5
Abbildung 2: Arbeitsaufteilung und Zusammenarbeit im Projektkonsortium.....	10
Abbildung 3: Dreidimensionales Modell der Ferienwohnungen	11
Abbildung 4: Thermisches Modell der Ferienwohnung basierend auf den Architektenplänen	12
Abbildung 5: Energiebilanz des Simulationsmodells.....	14
Abbildung 6: Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Innentemperatur, thermischer und elektrischer Energie sowie der Effizienz der Wärmepumpe	15
Abbildung 7: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Validierung der Simulationsergebnisse anhand von Messdaten.....	16
Abbildung 8: Innentemperaturen der Ferienwohnungen A, B, C und D während des Betrachtungszeitraums	17
Abbildung 9: Messdaten der Außentemperatur und der Globalstrahlung aus der Wetterstation am Demonstrationsobjekt innerhalb des Betrachtungszeitraums	18
Abbildung 10: Vergleich der Messdaten und der Simulationsergebnisse für 12h-Intervalle	19
Abbildung 11: Überblick über Datenlage für KI-Prognosemodelle	22
Abbildung 12: Wetterdaten DWD und Solcast im Vergleich mit z.T. großer Abweichung	24
Abbildung 13: Softwarearchitektur für Datenoffline- und Datenonline-Betrieb	24
Abbildung 14: PV-Stromerzeugungsprognose mit Offline-Daten	26
Abbildung 15: Hohe Genauigkeit für PV-Prognose mit Long Short Term Memory-Verfahren.....	27
Abbildung 16: Prognose (blau) und tatsächlicher Stromverbrauch (rot) eines Restaurants	27
Abbildung 17: Wohnung A: Buchungszeitraum der Ferienwohnung entspricht nicht dem tatsächlichen Nutzungszeitraum.	28
Abbildung 18: Wohnung B+D: Buchungszeitraum der Ferienwohnungen entspricht nicht dem tatsächlichen Nutzungszeitraum.....	29
Abbildung 19: Ferienwohnung C hat während der Buchungsperiode einen maximalen Stromverbrauch von 300 W	29
Abbildung 20: Zusammenfassung der Ergebnisse für PV-Stromerzeugungs- und Stromverbrauchsprognose (AP 1.2 und AP 4.4).....	30
Abbildung 21: Leistungsmessungen am Demonstrationsgebäude	31
Abbildung 22: Verbrauchsmessdaten der Wärmepumpe vom Reiterhof auf dem Fröhnerhof.....	32
Abbildung 23: Fragebogen	32
Abbildung 24: Übersicht der Informationsflüsse zwischen Energiemanagementsystem und Gebäude.	33
Abbildung 25: Übersicht Energieflussmodell innerhalb des MPC-Energiemanagements	34
Abbildung 26: Simulationsergebnisse des Energiemanagementsystems für das elektrische Teilsystem inklusive E-Auto.....	35
Abbildung 27: Thermische Heizleistung der Wärmepumpe für verschiedene Betriebsbedingungen (links Diagramm aus Datenblatt, rechts Polynomfit & Stützstellen (x)).....	36
Abbildung 28: Simulationsergebnisse für den Pufferspeicher (TRNSYS-Ergebnisse oben & Vergleich mit Energiemodell unten)	37
Abbildung 29: Schematischer Aufbau des Hardware-in-the-Loop-Systems	38
Abbildung 30: HiL-Simulationsergebnisse für elektrisches Teilsystem	39

Abbildung 31: Summenstrommodell Demonstrationsobjekt Referenz.....	40
Abbildung 32: Summenstrommodell Forschungsobjekt.....	41
Abbildung 33: Grundmodell Mieterstrom.....	44
Abbildung 34: Wirtschaftlichkeitsberechnung.....	45
Abbildung 35: Bidirektionales Ladegerät (prinzipielle Darstellung).....	48
Abbildung 36: Dual-Active-Bridge-Topologie	48
Abbildung 37: Äquivalentes Schaltbild zur Darstellung des DAB-Funktionsprinzips	49
Abbildung 38: Konzeptionelle Auslegung des Ladegerätes (12 kW Nennleistung)	50
Abbildung 39: Simulationsergebnisse des DAB-Wandlers	51
Abbildung 40: 3D-Visualisierung des 500W-Prototyps des DAB-Wandlers	52
Abbildung 41: Hardware-Aufbau des DAB-Laborprototyps.....	52
Abbildung 42: Leistungsübertragung vom DC-Netz in die Batterie am Laborprototyp.....	53
Abbildung 43: Leistungsübertragung von der Batterie ins DC-Netz am Laborprototyp	54
Abbildung 44: DAB-Wandler für Second-Life-Batterie-Ladegerät mit Vorladungs- und Datenerfassungseinheit	55
Abbildung 45: Übersicht Lade- und Steuergerät für Second-Life-Batterien	55
Abbildung 46: Konzept des Blei-BMS	56
Abbildung 47: Entwurf Master-Hardware und Entwurf Slave-Hardware	57
Abbildung 48: Hardware-Platinen mit Mikrocontrollern von Master (links) und Slave (rechts)	57
Abbildung 49: Aufbau des kleinen BMS-Laborprüfstands	58
Abbildung 50: Grafische Benutzeroberfläche des kleinen BMS-Prüfstands	58
Abbildung 51: Labortestaufbau des BMS mit sechs Batterien.....	59
Abbildung 52: Blockschaltbild des BMS-Prüfstands.....	59
Abbildung 53: Graphical User Interface (GUI) des BMS.....	60
Abbildung 54: Finale Hardware des BMI für den Einsatz in der Demonstration AP 4	60
Abbildung 55: Kühlhaus und Elektroauto.....	63
Abbildung 56: Batteriecontainer	64
Abbildung 57: Ladegerät nach Transport zum Demo-Gebäude und nach Systemintegration	65
Abbildung 58: Installation des BMS im Demonstrationsgebäude.....	65
Abbildung 59: Installiertes DC-Netz mit Schutzfunktionen.....	66
Abbildung 60: Mess- und Kommunikationskonzept	67
Abbildung 61: Graphische Oberfläche zur Übersicht aller Energieflüsse im ioBroker.....	68
Abbildung 62: Verbindungsplan für Mess- und Kommunikationstechnik	69
Abbildung 63: Implementiertes EMS im Demonstrationsgebäude	70
Abbildung 64: Struktur der HiL-simulativen Demonstration.....	71
Abbildung 65: Sommertage (1.7. – 5.7.2023)	72
Abbildung 66: Herbsttage (30.9. – 4.10.2023)	72
Abbildung 67: Wintertage (12.1—16.1.2024).....	72
Abbildung 68: Simulation ganzjährigen Betriebs mit reduzierter Struktur.....	73
Abbildung 69: Struktur zur realen Demonstration der Energieerzeugung und -speicherung (links) und DC-Messbox (rechts)	75
Abbildung 70: Screenshot des webbasierten Datenbrokers ioBroker	75

Abbildung 71: Blockschaltbild des DAB-Wandlers für den Blei-Batteriespeicher. Mit Ausnahme der geänderten Werte gemäß Tabelle 10 ist der DAB-Wandler für den Lithium-Batteriespeicher identisch.	76
Abbildung 72: Vollständig montierter DAB-Demonstrator 1 a), Abmessungen: 90 x 71 x 51 cm, mit entwickelten und getesteten internen Komponenten b) – m).	77
Abbildung 73: Struktur des FSM des DAB in PLECS.	80
Abbildung 74: Struktur für die modifizierte CC/CV-Regelung von I_2	81
Abbildung 75: Leistungsfluss im Betriebsmodus 1 an einem normalen Wintertag (links) und Echtzeit-Leistungsfluss im Betriebsmodus 1 an einem sonnigen Wintertag (rechts).	82
Abbildung 76: Blei-Batteriebank mit BMS. Links: Master-Schaltung, rechts: Slave-Schaltung mit Spannungsbalancierung	83
Abbildung 77: Demonstrierte Betriebsmodi mit zugehörigen Energieflussrichtungen	84
Abbildung 78: Gemessene elektrische Leistungen während der Demonstration	84

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Arbeitsplanung.....	6
Tabelle 2: Aufbau und U-Wert der Umgebungsflächen der Ferienwohnungen	12
Tabelle 3: Simulationsergebnisse zum Vergleich des thermischen Modells mit dem vorliegenden Bedarfsausweis.....	13
Tabelle 4: Vergleich der Simulationsergebnisse und der vorliegenden Messdaten während des Betrachtungszeitraums	19
Tabelle 5: Markwert-Einschätzung des Immobilie - sachwertorientiert.....	42
Tabelle 6: Markwert-Einschätzung des Immobilie - ertragswertorientiert.....	43
Tabelle 7: Auslegungsparameter des Ladegerätes.....	50
Tabelle 8: Spezifikation des Laborprototyps für das bidirektionale Ladegerät.....	51
Tabelle 9: Projektumsetzung und Meilensteine.....	62
Tabelle 10: Parameter des DAB-Wandlers	77
Tabelle 11: Hauptzustände des FSM, die für den Benutzer verfügbar sind	79

III. Abkürzungsverzeichnis

AP	Arbeitspaket
AW	Außenwand
BMS	Batteriemanagementsystem
CC	Controlled Current
CCS	Combined Charging System
COP	Coefficient of Performance
DAB	Dual-Active-Bridge-Topologie
DWD	Deutscher Wetterdienst
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EMI	Electromagnetic interference
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FBH	Fußbodenheizung
FSM	Finite state machine
GNDEW	Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende
GUI	Graphical User Interface
HiL	Hardware-in-the-Loop
HWB	Heizwärmebedarf
IBDC	isolierter bidirektionaler DC/DC-Wandler
IPC	Industrial Personal Computer
IT	Informationstechnik
JAZ	Jahresarbeitszahl
KI	Künstliche Intelligenz
LSTM	Long Short-Term Memory Models
MAPD	Mean Absolute Percentage Deviation
MAPE	Mean Absolute Percentage Error
MCU	Micro Controller Unit
MLPM	Multi Layer Perceptron Models
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field-Effect Transistor
MPC	Model Predictive Control
MPPT	Maximum Power Point Tracking
PV	Photovoltaik
RLM	Registrierende Leistungsmessung
SIC	Siliciumcarbid
SOC	State of Charge
SOH	State of Health
SPI	Serial Peripheral Interface
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
SWK	Stadtwerke Kaiserslautern
TRL	Temperatur des Heizungsrücklaufs
TVL	Temperatur des Heizungsvorlaufs
V2G	Vehicle-to-Grid

WMZ	Wärmemengenzähler
WP	Wärmepumpe
ZVS	Zero-Voltage-Switching

1 Kurzdarstellung

1.1 Aufgabenstellung

Gesamtziele des Projektes sind Entwicklung und Demonstration (in einem Modellgebäude) eines integrierenden und ökologisch-ökonomisch nachhaltigen Konzeptes für ein modell-prädiktiv geregeltes Energiemanagement in einem Mischnutzungsgebäude inkl. eines Gaststättenbetriebs mit regenerativer Erzeugung (Photovoltaik), aktiver Nutzung der Wärme-/Kühlquellen sowie des stationär-elektrischen Energiespeichers (vorzugsweise Second-Life-Batterien) und des mobil-elektrischen Energiespeichers (E-Fahrzeuge mit bidirektionalen Ladegeräten), aktiv steuerbaren Lasten (Heiz-, Kühl- und Gaststättenbetrieb) unter expliziter und prädiktiver Berücksichtigung der Umweltbedingungen (z. B. Wetterdaten) und des Nutzungsverhaltens (z. B. Charakteristik des Gaststättenbetriebs und Weinbaubetriebs).

Ländliche Gebiete haben aufgrund ihrer Bevölkerungsdichte das Potential, einen erheblichen Anteil erneuerbarer Energien zu erschließen, sich zum größten Teil selbst zu versorgen und darüber hinaus als Energielieferanten für Ballungsgebiete zu dienen. Dem entgegen steht eine schlecht entwickelte Infrastruktur im Bereich der Versorgungsnetze, oft mit deutlich unterdimensionierten Hausanschlussinstallationen von meist 30 kW. Vor allem gemischt genutzte Gebäude mit mehreren Wohneinheiten, integrierter Gastronomie und landwirtschaftlicher Produktion (z. B. Weinproduktion) haben einen erheblichen Bedarf an intelligenten Konzepten zur Nutzung von lokaler regenerativer Erzeugung und Speicherung sowie deren Steuerung. Besonders interessant sind solche Konzepte für Mischnutzungsgebäude. Sie sind im Hinblick auf die Nutzung erneuerbarer Energien bzw. eine möglichst autarke elektrische Energie-Eigenversorgung von besonderer Bedeutung, da oft ein erhöhter Energiebedarf mit diesen Gebäuden verbunden ist. Sie haben dank großer Dach- und Freiflächen ein sehr großes Potenzial zur regenerativen Stromerzeugung und bieten auch räumliche Möglichkeiten für verschiedene Speicher- und Flexibilitätsoptionen, die insbesondere dann optimal ausgenutzt werden können, wenn dort auch gleichzeitig wirtschaftliche Betriebe wie beispielsweise Gastronomie/Hotel etc. unterhalten werden und damit die Steuerung von Verbrauch und Erzeugung über ein intelligentes Lastmanagement gefragt ist. Dazu gehören neben der temporären Speicherung elektrischer Energie alle Power-To-Heat-Ansätze, wie z.B. der vermehrte Einsatz von Wärmepumpen in Kombination mit thermischen Speichern zur Gebäudebeheizung und -klimatisierung. Hier setzt das Vorhaben an, indem es ein technisches Konzept von intelligentem Energiemanagement für solche Mischnutzungsgebäude zur Flexibilisierung elektrischer Energieflüsse beispielhaft entwickelt und modellhaft umsetzt.

Ein zweiter Aspekt des Vorhabens betrifft die Beurteilung eines möglichen Realisierungskonzeptes des o. g. Energiemanagementsystems aus ökonomischer und ökologischer Sicht (Aufwand und Nutzen, Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit, Planungs- und Realisierungsprozess, mögliche Geschäftsmodelle etc.). Eine derartige Studie ist insbesondere deswegen sinnvoll, da der hier im Fokus stehende Typus von Mischnutzungsgebäuden mit einem (gast)wirtschaftlichen Betrieb eine zunehmende Bedeutung und Sichtbarkeit in vielen landwirtschaftlichen Regionen (z. B. Weinbau-

oder Obstbauregionen) hat und daher der Übertragbarkeit des Konzeptes für eine verbreitete wirtschaftliche Verwertung eine besondere Rolle zukommt.

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung

1.2.1 Erfahrung und Vorarbeiten der Projektpartner

Lehrstuhl für Regelungssysteme (LRS) der RPTU

Der Lehrstuhl für Regelungssysteme (LRS), angesiedelt im Fachbereich Elektro- und Informationstechnik der RPTU Kaiserslautern, betreibt Forschung unter anderem auf den Gebieten Regelung elektrischer Energiesysteme, optimale Regelung mechatronischer, hydraulischer und leistungselektronischer Systeme, modellbasierte Diagnose fluidtechnischer Systeme, Energiemanagement von infrastrukturellen Systemen, vernetzte eingebettete Regelungen sowie objektorientierte Modellierung dynamischer Systeme. Die Forschungsaktivitäten werden im Rahmen von Industriekooperationen und von öffentlich geförderten Projekten durchgeführt. Dabei wurden insbesondere auf dem Gebiet des modellprädiktiven Energiemanagements umfangreiche Forschungsarbeiten erfolgreich durchgeführt, neue Ansätze sowie Algorithmen entwickelt und in verschiedenen Anwendungen (u. a. in Gebäudetechnik) implementiert bzw. erprobt. Zu erwähnen sind hier im Zusammenhang mit modellprädiktiver Regelung das vom BMBF geförderte Projekt *ProOpt* (Förderprogramm IKT2020) sowie die vom BMWi geförderten Forschungsprojekte *Net-Control* (Förderprogramm „Zukunftsfähige Stromnetze“), *SOPHi* (Förderprogramm EnOB), *LiSA* (Förderprogramm EnOB) und *ORSYGET* (Förderprogramm EnOB). Darüber hinaus lagen umfangreiche theoretische und praktische Erfahrungen aus ebenfalls öffentlich geförderten Projekten zur leistungselektronischen Versorgung von mobilen Fahrzeugen (Elektromobilität) vor.

Fachgebiet Gebäudesysteme und Gebäudetechnik (GST) der RPTU

Am Fachgebiet Gebäudesysteme und Gebäudetechnik finden diverse Forschungsarbeiten zur energetischen Optimierung von Gebäuden und Quartieren statt. Die methodische Kompetenz des Fachgebiets besteht neben der hard- und softwaretechnischen Umsetzung von Gebäudesystemtechnik und Gebäudeautomation vor allem in der Anwendung von bauphysikalischen Simulationsmethoden. Neben der Modellierung von Gebäudehülle und dynamischen Fassadensystemen ist hier insbesondere die Simulation von Anlagentechnik unter Nutzung erneuerbarer Energien zu nennen. Als beispielhaft seien hier zwei öffentlich geförderte Projekte erwähnt, *LiSA* (Förderprogramm EnOB) und *PtH4G2RID – Power-To-Heat* (Förderprogramm InterReg VA), in denen GST erfolgreich Co-Simulationen zur Unterstützung und zum Testen modellprädiktiver Regelung sowie zur Evaluierung der Gesamtenergieeffizienz durchgeführt und in zahlreichen wissenschaftlichen Publikationen und Konferenzen veröffentlicht hat.

Dali Solarpower

Die Fa. Dali Solarpower GmbH ist einer der größten Betreiber und Errichter von Photovoltaikanlagen im ländlichen Raum rund um Rheinland-Pfalz und darüber hinaus. Neben umfangreichen

Erfahrungen bei Planung und Projektierung von Photovoltaik-Systemen betreibt und betreut das Unternehmen, teilweise auch mit Partnerfirmen einer Unternehmensgruppe, zurzeit ca. 50 PV-Anlagen in Deutschland (vorwiegend im Südwesten) und Italien, sammelt und verwertet dabei umfangreiche Messdaten von den Anlagen. Die persönlichen Erfahrungen und verfügbaren Datenmengen wurden im vorliegenden Projekt äußerst vollteilhaft genutzt. Über die Photovoltaik hinaus ist die Firma auch im Import und Export von Komponenten zur Energiegewinnung involviert. Eine Nutzung von PV-Strom zur Gewinnung der Primärenergie für E-Mobilität, Heizung und Kühlung von Wohn- und Gewerbeimmobilien wird seit längerem intensiv verfolgt.

Immobilien Kafitz

Die Fa. Immobilien Kafitz ist seit ca. 25 Jahren Marktführer im Bereich der Immobilienvermittlung und Immobilienentwicklung im Raum Kaiserslautern. Die Aktivitäten belaufen sich auf Verkauf von ca. 150 Häusern pro Jahr - wesentlich im ländlichen/bäuerlichen Umland von Kaiserslautern. Über die reine Tätigkeit von Vermittlung und Verkauf hinaus beschäftigt sich Kafitz vor allem mit der Entwicklung von Neubauprojekten und Renovierung bzw. Sanierung von Altbestand. Damit konnten umfangreiche Investitions- und Planungskompetenzen auf- und ausgebaut werden. Durch ständige Marktbeobachtung ist eine klare Präferenz und ein deutlicher Nachfrageüberhang im Bereich der energetisch gebauten oder energetisch sanierten Wohn- und Gewerbeimmobilien erkennbar. Damit liegen eine Entwicklung von Geschäftsmodellen sowie eine Übertragbarkeit von energetischen Gewerbe- und Wohnimmobilienkonzepten im eindeutigen Interesse der Firma. Die speziellen Projektierungserfahrungen und immobilienwirtschaftlichen Kompetenzen wurden für das hier beantragte Vorhaben insbesondere bei der Gestaltung eines Altbaus im ländlichen Raum mit einer Mischnutzung von Wohnen und Gewerbe eingebracht.

IG-CP

Als zukunftsorientiertes Ingenieurbüro begleiten wir Unternehmen und Eigenbetriebe in allen Belangen der Energie- und Wärmewende, nutzen etablierte Methoden und modernste Technologien. Unser interdisziplinäres Team aus Ingenieur:innen und Techniker:innen vereint Maschinenbau-, Energie- und Bauingenieurwesen über Generationen hinweg. Unsere Kernkompetenzen in gewerblicher Energieeffizienz-Beratung, solarer Projektentwicklung sowie Forschung und Entwicklung haben wir stetig ausgebaut und um Schadensgutachten an PV-Anlagen, E-Mobilitäts-Konzepte, energetische Gebäudesanierung, integrierte Quartierskonzepte und kommunale Wärmeplanung erweitert.

In den letzten Jahren haben wir zahlreiche Energieeffizienzprojekte begleitet. Dabei wurden förderfähige Kosten von 37 Millionen Euro mit einer durchschnittlichen Förderquote von 20 % realisiert, was über 7,7 Millionen Euro Förderung für Unternehmen und Bauträger im Großraum Rheinland-Pfalz einbrachte. Die damit verbundene Emissionsminderung beträgt über 15.000 Tonnen CO₂ pro Jahr.

Seit 2017 haben wir über 400 Projekte zur Nutzung lokaler regenerativer Energien durch Photovoltaikanlagen auf Industriegebäuden, Zentrallagern, Bürogebäuden, Parkplätzen sowie Konversions- und Freiflächen umgesetzt. Unsere Anlagen produzieren jährlich über

45 Millionen Kilowattstunden elektrische Energie und reduzieren die Emissionen um rund 19.000 Tonnen CO₂ pro Jahr.

Von 2020 bis 2024 war Herr Persohn als Lehrbeauftragter für energetische Quartierslösungen an der Hochschule Kaiserslautern tätig. Seit diesem Jahr bilden wir zusammen mit der TÜV Akademie die nächste Generation von Gutachter:innen für Photovoltaikanlagen aus.

Die IG-CP mbH ist seit über sieben Jahren im Bereich der Energieeffizienzplanung tätig und hat zahlreiche Projekte in verschiedenen Branchen erfolgreich umgesetzt. Unsere Beteiligung an renommierten Forschungsprojekten, darunter EnStadt:Pfaff und EnStadt:Pfaff 2, trägt zur Entwicklung innovativer Lösungen im Bereich der erneuerbaren Energien bei. Unsere Erfahrung und die erzielten Ergebnisse gewährleisten fundierte und praxisnahe Handlungsempfehlungen.

IS Predict

IS Predict realisiert intelligente IT-Lösungen, welche u.a. die Energieeffizienz von Verbrauchern, Lieferanten und Produzenten erhöhen, Ressourcen schonen und einen signifikanten Beitrag zum Umweltschutz leisten.

Zu den Kernkompetenzen zählt ein selbstlernendes Künstliche Intelligenz-System, welches auf Analyse-, Prognose-, Anomalieerkennungs-, Simulations- und Steuerungsalgorithmen beruht und durch vorausschauende Steuerung u.a. die Energiekosten in den Bereichen Smart Building, Smart Grid und Smart Production senkt.

Die Software Predictive Intelligence von IS Predict wurde bereits mit vielen Innovationspreisen ausgezeichnet.

Vorarbeiten im Bereich F+E:

In Industrie- und Forschungsprojekten werden oft hochgenaue Prognosen gefordert, als Basis für weiterführende Berechnungen wie Simulationen und vorausschauende Steuerung. Energieprognosen wurden beispielsweise für die Stahlindustrie (Stoßofen), für die Zementindustrie (Zementmühle) und für die Energiewirtschaft realisiert. Geförderte Forschungsprojekte, in denen sich IS Predict mit der Energiethematik beschäftigte, waren bspw. das EU-Forschungsprojekt Stromsparland (2013 – 2015) im Rahmen der EFRE-Förderung und das vom BMWi, im Rahmen des Schaufensters SINTEG, geförderte Projekt Designetz (2017 - 2021).

1.2.2 Allgemeine Rahmenbedingungen

Das durchgeführte Vorhaben entwickelte Konzepte und Lösungen zu den oben dargestellten Zielen und zielte vor allem auf die optimale Auslegung sowie Integration der verschiedenen technischen Komponenten zur Erzielung maximaler Energieeffizienz auf der Basis eines modell-prädiktiven Ansatzes. Besonderes Augenmerk wurde dabei auf ein möglichst realistisches, nachhaltiges und übertragbares Nutzungskonzept für einen wirtschaftlichen Betrieb des Systems gelegt. Hierzu wurden hybride Modellierungsverfahren (analytisch-simulativ) für die Mischnutzungsgebäude sowie die darin befindlichen Energieerzeuger, -speicher sowie -verbraucher detailliert und mit Hilfe der Vorort-Validierung entwickelt, Prädiktionsalgorithmen inkl. Verhaltensmuster-Erkennung mit datenbasierten Lernverfahren (Predictive Intelligence) entworfen, leistungselektronische Ladegeräte

für bidirektionale Energieflüsse entwickelt, eingebettete Sensoren/Aktoren vernetzt und das gesamte Energiemanagementsystem mit einer modell-prädiktiven Regelung optimal entwickelt und prototypisch demonstriert. Als Energiespeicher wurden u.a. auch gebrauchte Blei-Batterien aus städtischen Omnibussen für ein Second-Life zu einem stationären Speicher geschaltet, gesteuert und in der Demonstration eingesetzt. Darüber hinaus wurde ein V2G-Szenario für Elektrofahrzeuge mittels bidirektionaler Ladeeinrichtung untersucht und in das geplante Energiemanagement einbezogen. Weiterhin wurde das technisch entwickelte Konzept auch betriebswirtschaftlich im Hinblick auf Nutzungs- und Geschäftsmodelle systematisch betrachtet und daraus wurden realistische Aussagen zu erreichbaren Energieeffizienz-Steigerungen sowie zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit abgeleitet.

Für die Demonstration wurde eine Modellanlage in einem städtischen Vorort von Kaiserslautern (Kaiserslautern-Erfenbach) verwendet.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die zuvor genannten Projektziele wurden durch koordinierte Forschungsarbeiten in zwei Parallelprozessen sowie durch eine Demonstration bzw. Validierung an einer realen Anlage erreicht (s. Abbildung 1):

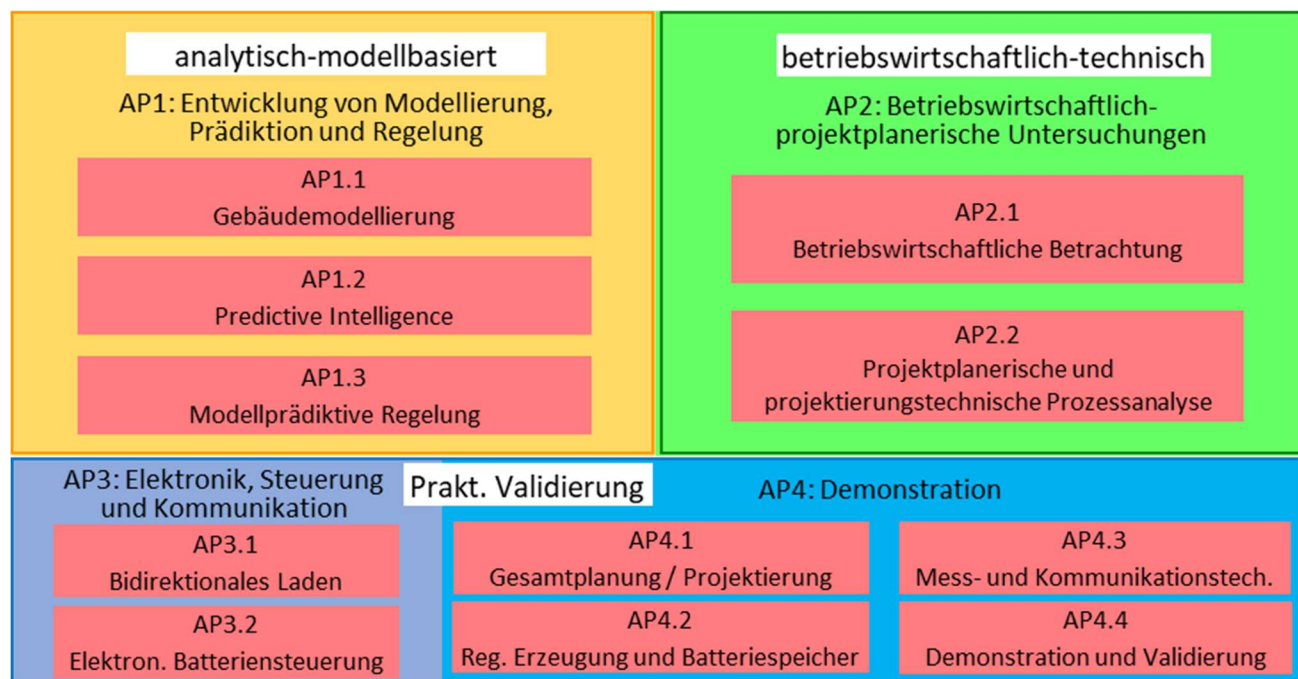


Abbildung 1: Arbeitsstruktur des Vorhabens

Die Planung der einzelnen Arbeitspakete sowie die Beteiligung der Projektpartner zeigt Tabelle 1.

Tabelle 1: Arbeitsplanung

AP	AP-Inhalt	Q1	Q2	Q3	Q4	Q5	Q6	Q7	Q8	Q9	Q10	Q11	Q12	Q13	Q14	Beteiligte Partner
AP1	Modellierung, Prädiktion und Regelung															
AP1.1	Energetische Gebäudemodellierung															RPTU, IS Predict, IG-CP
AP1.2	Predictive Intelligence															IS Predict, Dali Kafitz, IG-CP
AP1.3	Modellprädiktive Regelung															RPTU
AP2	Betriebswirtschaftlich-projektplanerische Untersuchungen															
AP2.1	Betriebswirtschaftliche Betrachtung															Kafitz, IG-CP
AP2.2	Prozessanalyse für Planung und Projektierung															IG-CP
AP3	Elektronik, IKT-Komponenten															
AP3.1	Bidirektionales Laden E-Auto															RPTU
AP3.2	Lade- und Steuergerät Altbatterie															RPTU
AP4	Demonstration															
AP4.1	Gesamtplanung und Projektierung															IG-CP, Dali
AP4.2	Energieerzeugung und Batteriespeicher															IG-CP, Dali, RPTU
AP4.3	Mess- und Kommunikationstechnik															IG-CP, Dali, RPTU
AP4.4	Inbetriebnahme und Validierung															alle

Die ursprüngliche Projektplanung umfasste eine Gesamtprojektdauer von 36 Monaten (12 Quartalen). Aufgrund des erheblichen Lieferverzugs von fast einem Jahr für die unbedingt benötigten Mittelfrequenz-Transformatoren durch einen kommerziellen Anbieter waren zwischenzeitlich die Arbeitspakete 3 und 4 in Zeitverzug geraten. Um dennoch die vorgesehenen Ergebnisse zu erreichen, wurde das Projekt kostenneutral um 4 Monate verlängert, so dass es nach 40 Monaten abgeschlossen wurde.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand vor Projektbeginn

- Energiemanagement in Gebäuden steht seit Jahren im Fokus der wissenschaftlichen, technischen und auch betriebswirtschaftlichen Untersuchungen, da es ein wichtiges Element zur erfolgreichen Energiewende darstellt. Viele Einzelaspekte, Methoden und Maßnahmen sind studiert und teilweise auch erfolgreich erprobt worden. Dabei ist zu beobachten, dass seit einiger Zeit verstärkt die modellbasierten Methoden eingesetzt werden, da diese bauphysikalisches Wissen mit

messtechnischen Daten in Einklang bringen und damit eine fundierte Basis für skalierbare, effiziente Steuerungs- und Regelungsalgorithmen liefern können. In diesem Zusammenhang erfolgt auch eine zunehmende Anwendung moderner, optimierungsbasierter Regelungsalgorithmen wie z. B. modellprädiktiver Regelung, nicht nur in der theoretisch-simulativen Untersuchung, sondern in realen Implementierungen. Entsprechende Projekte in Deutschland wurden auch umfangreich durch die öffentliche Hand gefördert.

Wenn sich auch der Stand der Wissenschaft und Technik in Bezug auf Gebäudeenergiemanagement durch vielseitige Untersuchungen widerspiegelt, so wurden bislang die modellbasierten Methoden zur sektorenübergreifenden Energienutzung dennoch nur relativ selten untersucht. Dabei kann eine intelligente, systemweite modellprädiktive Regelung den bislang eher getrennt betrachteten Versorgungssystemen für Strom, Wärme und Mobilität große Vorteile bringen, insbesondere dann, wenn auch Energiespeicher zur Flexibilisierung der Energieflüsse eingesetzt werden. Bislang fehlende domänenübergreifende Modelle und zuverlässige Prädiktion der verschiedenen Energieflüsse waren die Hauptgründe für die Situation. Auch geeignete Demonstrationsobjekte, wo verschiedene Energiesysteme vernetzt über eine gemeinsame Steuereinrichtung flexibel reguliert werden können, sind nicht oft anzutreffen. Auch der spezifische Gebäudetypus mit einer Mischnutzung (Wohnen, Gastronomie, Wirtschaften) wurde bislang im Zusammenhang mit Energiemanagement kaum untersucht, obwohl hier über die normalen Modellierungsmethoden hinaus durch datenbasierte Erkennung spezifischer Nutzungsmuster eine weitere Steigerung der Modell- und Prädiktionsqualität erwartet werden kann. Die in diesem Projekt durchgeführten theoretischen und praktischen Untersuchungen leisten daher einen wertvollen Beitrag zur Entwicklung des Standes der Technik.

- Die Abbildung einzelner Gebäude inklusive ihrer Anlagentechnik in transienten numerischen Simulationsmodellen zur Vorhersage von voraussichtlichen Energieverbräuchen entspricht dem Stand der Technik. Hierfür sind verschiedene Simulationsprogramme wie z.B. TRNSYS, esp-r, EnergyPlus, IDA Ice etc. verfügbar.

Die hier untersuchten Mischnutzungskomplexe in einer Simulationsumgebung darzustellen, erfordert jedoch neue Ansätze, da insbesondere das Lastmanagement thermischer und insbesondere elektrischer Energie nur unzureichend in den herkömmlichen Softwarewerkzeugen abgebildet werden kann. Der Ansatz der Co-Simulation, bei der Modelle in unterschiedlichen Entwicklungs- und Softwareumgebungen erstellt und über eine geregelte Input/Output-Schnittstelle zu gewünschten Zeitintervallen gekoppelt werden können, ist relativ neu. Als Plattform für diese Art der Co-Simulation wurde in den letzten Jahren die so genannte Building Controls Virtual Test Bed Plattform (BCVTB) entwickelt und eingesetzt. Der besondere neue Ansatz hierbei ist, dass die oben erwähnten bewährten Gebäudesimulationsprogramme mit Modellen aus anderen Domänen (z.B. Modelica/Dymola) oder eigenem Code gekoppelt werden können. Dies ermöglicht die Integration neuer Regelungsmodelle und aufgrund des modularen Aufbaus die Erweiterung und Anpassung des Modells auf ähnliche Mischnutzungskomplexe.

- Derzeit finden viele Forschungsaktivitäten im Bereich der Prognose statt. Datengetriebene Algorithmen erzielen gute Ergebnisse mit bspw. mehrschichtigen Analysen (z.B. Deep Learning).

Jedoch verschlechtert sich die Prognosegenauigkeit deutlich, wenn die Situationen sich gegenüber den eingeübten und gut erkannten Umgebungen ändern. Dies bedeutet, dass Änderungen am eintrainierten Verhalten stetiges Nachtrainieren und Nachjustieren verlangen. Hierfür sind Data Scientists (also mit Big Data arbeitende Mathematiker oder Physiker) notwendig. Im Kontext energetische Gebäudeoptimierung geht es jedoch auch darum, Privathaushalte und kleinere Gewerbegebäude anzubinden. Hier ist es wirtschaftlich nicht sinnvoll, die Verhaltensänderungen mit Hilfe von Data Scientists herauszukristallisieren und danach in der Modellalgorithmik anzupassen. Gerade wenn man sich überlegt, dass solche Lösungen für den Massenmarkt tauglich sein müssen, wären die Kosten für stetige Data Science-Anpassungen viel zu hoch; und außerdem würde man diese „Heerschar“ von Data Scientists auch nicht auf dem Arbeitsmarkt bekommen. Für eine wirtschaftlich skalierbare Prognoselösung ist es daher notwendig, Veränderungen im Nutzungsverhalten, in den äußeren Einflüssen, an den Anlagen durch Verschleiß etc. automatisiert zu erkennen und auch automatisiert in die Prognosemodelle einfließen zu lassen. Diese Selbstlernalgorithmik wird vereinzelt bereits in der Industrie in prototypischen Lösungen eingesetzt. Jedoch sind hier Forschungsaktivitäten notwendig, um diese auch für verlässliche Prognosen des energetischen Gebäudeverhaltens zu realisieren.

- Auch im Hinblick auf technische Entwicklungen geht das Projekt deutlich über den momentanen allgemeinen Stand hinaus. Die effektive Nutzung der stationär-elektrischen Speicher (Second-Life-Batterien) und der mobil-elektrischen Speicher (E-Fahrzeuge) setzt ein flexibel regelbares, bidirektionales leistungselektronisches Ladegerät mit dazugehörigen Sensoren, Kommunikationskomponenten und Batteriemanagement voraus, welches heute auf dem Markt kaum verfügbar ist und im Projekt extra entwickelt wurde.
- Aus betriebswirtschaftlicher Sicht war bislang die Betrachtung der Einführung eines Energiemanagementsystems für Gebäude, insbesondere für solche mit Mischnutzung, unzureichend. Eine Investitionsplanung basierend auf einer spezifischen, prototypischen Prozessanalyse fehlt genauso wie eine Aufwand-Nutzen-Analyse und Prognose für derartige Investitionsmaßnahmen. Eventuelle Geschäftsmodelle hierzu sind ebenfalls nicht allgemein bekannt. Auch eine systematische bauseitige Planung, Auslegung und Projektierung solcher sektorenübergreifenden Energiemanagementsysteme für allgemeine Mischnutzungsgebäude bietet Möglichkeiten zur technischen sowie wirtschaftlichen Systemoptimierung und wurde bislang kaum untersucht.
- Akkumulatoren verlieren aufgrund der natürlichen Alterung sowie durch Lade- und Entladevorgänge an Leistungen. Sie werden daher nach einer bestimmten Zeit der Verwendung ausgetauscht. Neben dem Weg des Recyclings können diese gebrauchten Batterien als zentraler Bestandteil über flexible Energiemanagementsysteme in eine sinnvolle Nachnutzung, als Second-Life-Speicher, gebracht werden. Bestätigt werden derlei Projekte von der vom Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik (VDE) durchgeführten Studie "Second-Life-Konzepte für Lithium-Ionen-Batterien aus Elektrofahrzeugen", die zu dem Schluss kommt, dass ein wirtschaftliches und ökologisches Potenzial für Second-Life-Konzepte besteht. Zwei besonders vielversprechende Möglichkeiten der Weiterverwendung sehen die Studienautoren in der Bereitstellung von Primärregelenergie und in der Verwendung als Hausspeicher in Verbindung mit

Photovoltaikanlagen. Neben den Li-Batterien kommen aber auch die konventionellen Bleibatterien für eine Second-Life-Nutzung in Frage, insbesondere wenn keine einschränkenden Bedingungen hinsichtlich Abstellräumlichkeiten existieren wie in ländlichen Gebieten. Dabei können grundsätzlich, anders als bei Li-Batterien, auch Batterien unterschiedlichen Alters, unterschiedlicher Modelle, unterschiedlicher Spannungen und unterschiedlicher Restkapazitäten zusammen zu einem Energiespeicher geschaltet werden, wenn ein problemloses gemeinsames Laden und Entladen ermöglicht wird. Aus technischer Sicht ist daher besonders wertvoll zu untersuchen, wie Second-Life-Batterien unterschiedlicher Typen und Nutzungsgrade durch eine elektronische Steuerung für ein gemeinsames Batteriemanagementsystem individuell und möglichst optimal genutzt werden können. Erfahrungen zur Entwicklung und praktischen Erprobung solcher Speichersysteme mit einem neuen Batteriemanagement unter realen Bedingungen liegen jedoch bislang kaum vor.

1.5 Zusammenarbeit der Partner

Das Projektkonsortium besteht aus fünf Projektpartnern, wobei von der RPTU Kaiserslautern zwei Arbeitsgruppen mitwirkten. Die RPTU übernahm auch die Projektkoordination. In Abbildung 2 ist nochmals eine Übersicht der erfolgten Arbeitsaufteilung und der Zusammenarbeit im Projektkonsortium dargestellt. Darin deuten die Pfeile die notwendigen Zuarbeiten der Partner untereinander an. Beispielsweise haben sich IS Predict und RPTU in der Datenbeschaffung abgestimmt und haben die Architektur für den Demonstrator gemeinsam erarbeitet, während die Prognoseservices von ISP in die Regelungsalgorithmen von RPTU eingegangen sind. Außerdem haben ISP, IG-CP und Dali in der Datenbeschaffung sowohl für das Demonstrationsgebäude als auch für weitere Referenzanlagen zusammengearbeitet, wobei IS Predict auf die von IG-CP und Dali bereitgestellten Daten zugreifen konnte. Diese Zusammenarbeit ist durch die Verbindungslinien dargestellt.

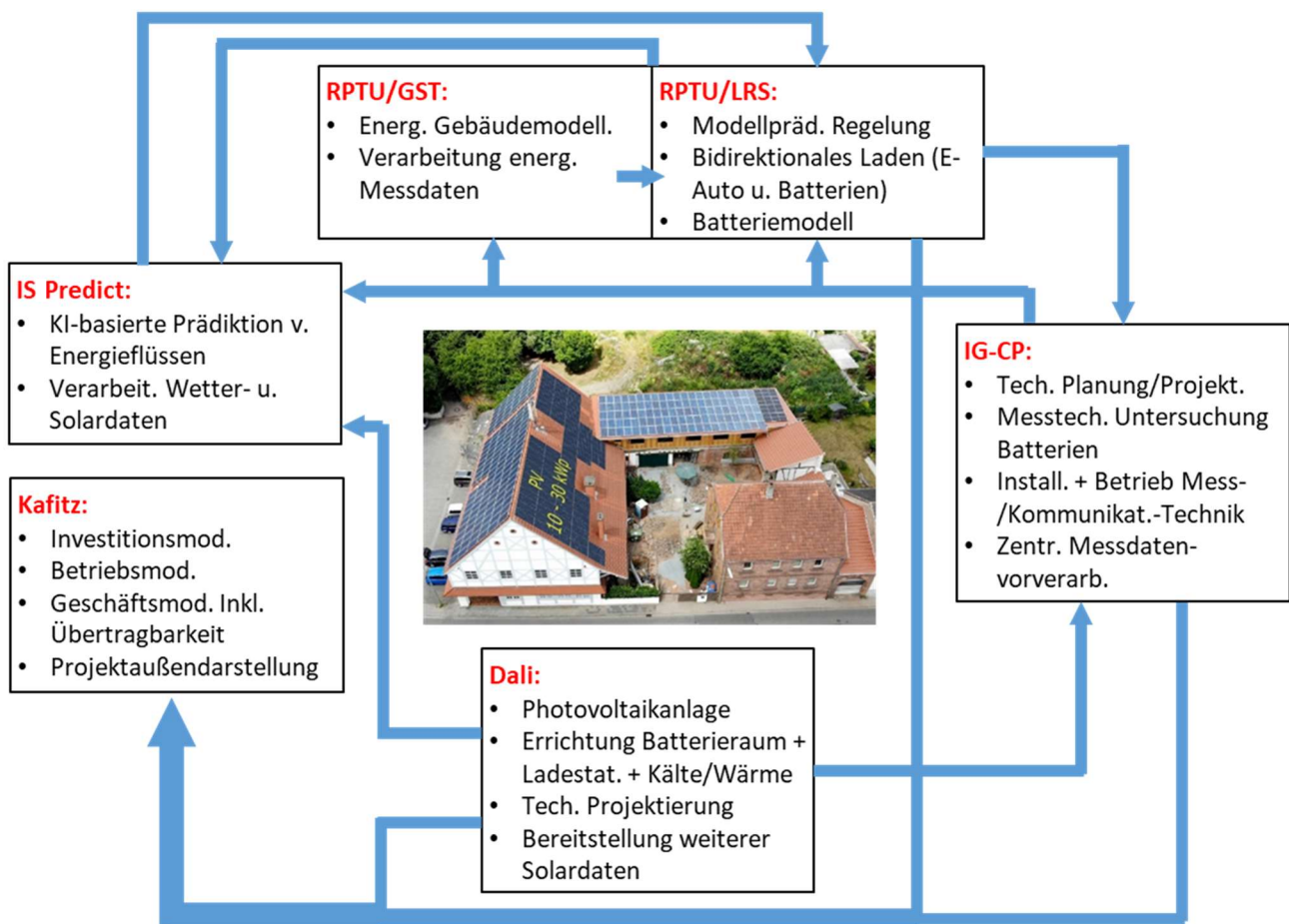


Abbildung 2: Arbeitsaufteilung und Zusammenarbeit im Projektkonsortium

2 Eingehende Darstellung

2.1 AP 1: Modellierung, Prädiktion und Regelung

Zielsetzung AP 1:

AP 1 beinhaltet mathematisch-analytische, algorithmische sowie simulationsbasierte Forschungsarbeiten. Es dient vor allem der Charakterisierung und der technisch-methodischen Beschreibung des im Fokus stehenden Gebäudetyps und liefert übertragbare Forschungsmethodik für das Gebäudeenergiemanagement. Darüber hinaus werden die konkreten Algorithmen zur Modellierung, Prädiktion und modellprädiktiven Regelung entwickelt, die in AP 4 für die Demonstration implementiert und eingesetzt werden.

2.1.1 AP 1.1 Energetische Gebäudemodellierung

Beitrag von RPTU/GST

In Arbeitspaket 1.1 stand vor allem die energetische Gebäudemodellierung im Mittelpunkt. Dafür mussten die thermischen Bestandteile des Gebäudekomplexes simulativ abgebildet werden. Die

Simulationsumgebung sollte dabei so dargestellt werden, dass sich die modellprädiktive Regelung aus AP 1.3 daran ankoppeln lässt und somit eine Simulation des Gesamtsystem durchgeführt werden kann. Weiterhin sollten die thermischen Modelle und hierbei v.a. das Gebäudemodell anhand von Messdaten validiert und somit sichergestellt werden, dass die Ergebnisse ein realistisches Verhalten des Gebäudes darstellen können.

Zusammengefasst sollten in AP 1.1 folgende Ziele erreicht werden:

- Modellierung des Demonstrationsobjekts mit allen Anlagen der Wärmeerzeugung, -speicherung und -verteilung
- Simulation des Demonstrationsobjekts
- Validierung anhand von Messdaten aus den Messeinrichtungen am Demonstrationsobjekt
- Vorbereitung der Co-Simulationsplattform zur Anbindung der entwickelten Regelung aus AP 1.3

Als Simulationsumgebung für das thermische Modell wurde die Software TRNSYS genutzt. Da die modellprädiktive Regelung aus AP 1.3 als mathematisches Modell in MATLAB umgesetzt wird, musste darüber hinaus noch eine Schnittstelle für die Anbindung des thermischen an das mathematische Modell eingerichtet werden. Dafür wurde die Plattform BCVTB gewählt, die sich grundsätzlich sehr gut für die Kopplung verschiedener Simulationsprogramme eignet.

In der ersten Projektphase wurden in Zusammenarbeit mit den verantwortlichen Partnern (v.a. DaLi und IG-CP) die entsprechenden Pläne und Datenblätter gesammelt, die die Gegebenheiten vor Ort abbilden. Auf Grundlage der Pläne wurde ein dreidimensionales Modell der Ferienwohnungen (FW) erstellt (siehe nachfolgende Abbildung.)



Abbildung 3: Dreidimensionales Modell der Ferienwohnungen

Auf Grundlage des dreidimensionalen Modells wurde anschließend die thermische Modellierung durchgeführt. In der thermischen Modellierung wird dabei nicht nur die äußere Geometrie des

Gebäudekomplexes berücksichtigt, es werden auch thermische Zonen und konkrete Bauteile definiert.

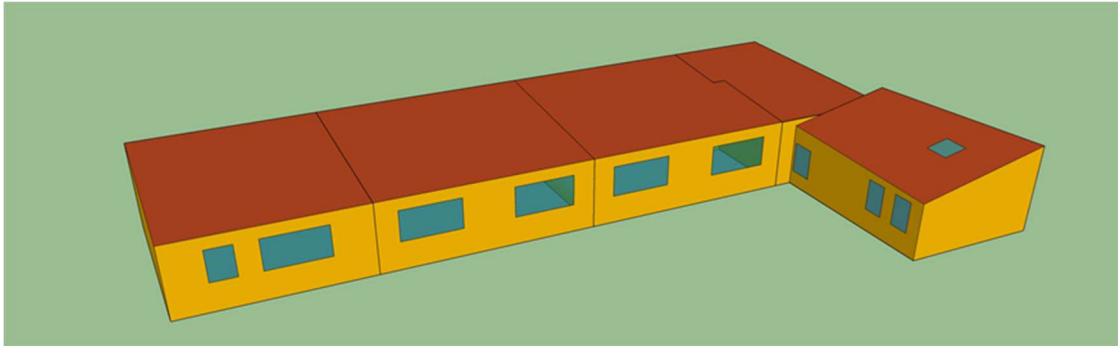


Abbildung 4: Thermisches Modell der Ferienwohnung basierend auf den Architektenplänen

Im direkten Vergleich der beiden Modelle zeigen sich leichte Unterschiede, z.B. das Dachfenster oder auch die Neigung der Dachschräge im Anbau von Ferienwohnung 4 im rechten Bereich des Modells. Während das dreidimensionale Modell auf der Grundlage von ersten und vereinfachten Plänen v.a. zur Veranschaulichung dargestellt wurde, bezieht sich das thermische Modell auf die Architektenpläne, die im Verlaufe des ersten Projektjahres zur Verfügung gestellt wurden und bildet die realen Gegebenheiten vor Ort daher möglichst genau ab. Die vier Ferienwohnungen werden nachfolgend von links nach rechts mit den Buchstaben A, B, C und D bezeichnet.

Tabelle 2 zeigt den Aufbau der Umgebungsflächen der Ferienwohnungen, sowie den entsprechenden Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert), der einen wichtigen Kennwert zur Beurteilung der thermischen Qualität von verschiedenen Bauteilen darstellt.

Tabelle 2: Aufbau und U-Wert der Umgebungsflächen der Ferienwohnungen

Bauteil	AW (neu)	AW (Bestand)	Dach	Bodenplatte	Fenster
Aufbau	Bruchstein, 10 cm WDVS	Holz mit Isolationsebene	Konstruktionsho- lz mit Dämmung	Beton + PIR- Hartschaum	3-Scheiben- Wärmeschutzverglasung
U-Wert (W/m²K)	0,16	0,35	0,14	0,17	0,95

Um in einem ersten Schritt zu überprüfen, ob das Gebäudemodell den Gegebenheiten vor Ort entspricht, bietet sich ein Vergleich mit dem vorliegenden Energieausweis an. Da es sich bei den Ferienwohnungen um einen Neubau handelt, liegt ein Energiebedarfsausweis vor. Dieser beruht auf Berechnungen und beinhaltet klar definierte Randbedingungen bzgl. Innentemperatur, Lüftung, interne Gewinne oder auch den Wetterdaten. Diese Randbedingungen wurden anschließend auch für die Simulationsumgebung übernommen und damit die thermische Simulation durchgeführt. Die nachfolgende Tabelle zeigt die Ergebnisse.

Tabelle 3: Simulationsergebnisse zum Vergleich des thermischen Modells mit dem vorliegenden Bedarfsausweis

Wohnung	HWB [kWh/m²a]
A	58,53
B	46,24
C	46,19
D	59,32
Ø	52,63
Energieausweis	52,61

Die Tabelle zeigt in grau hinterlegt die Ergebnisse aus der Simulation, einmal für die vier einzelnen Ferienwohnungen, allerdings auch den Durchschnittswert für das gesamte Gebäude. Dabei zeigt sich, dass die beiden inneren FWs (B und C) etwas weniger Wärmebedarf aufweisen als die äußeren Wohnungen, da sie eine geringere Außenwandfläche umfassen. In grün hinterlegt ist der Wert aus dem vorliegenden Energieausweis, der sich auf das gesamte Gebäude bezieht. Die Tabelle verdeutlicht, dass es kaum merkbare Abweichungen zwischen der Simulation und dem vorliegenden Ausweis gibt, die Abweichungen liegen deutlich unterhalb von 1 %. Dabei muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass Bedarfsausweise keinen wirklich dynamischen Gebäudebetrieb abbilden und sich daher auch recht gut in der Simulation nachbilden lassen. Dennoch verdeutlichen die Ergebnisse, dass das Gebäude entsprechend den vorgegebenen Daten aus den Architektenplänen modelliert wurde und dabei keine Fehlerquelle zu erkennen ist.

Neben dem Gebäudemodell konnten abschließend auch Modelle des thermischen Speichers und der Wärmepumpe entwickelt werden. Beide Modelle basieren dabei auf den jeweiligen Datenblättern, die für die vor Ort verbauten Anlagen vorliegen. Beim thermischen Speicher konnten somit die zentralen Größen (Volumen, Höhe, Wärmedämmung, Anzahl und Position der Anschlüsse, etc.) entnommen und im Simulationsmodell hinterlegt werden. Beim Modell der Wärmepumpe wurden die konkreten Leistungsdaten (elektrische und thermische Leistung, COP) bei gegebenen Randbedingungen entnommen. Aus diesen Leistungsdaten lassen sich Polynom-Koeffizienten ableiten, die im Modell in der Simulationsumgebung hinterlegt wurden und somit sicherstellen, dass ein realistischer Betrieb der WP in der Simulation abgebildet werden kann.

Anschließend konnten die thermischen Modelle in die Simulationsumgebung integriert und dort miteinander verknüpft werden. Im Zuge dessen wurde auch die Fußbodenheizung (FBH) als Heizsystem im Gebäude modelliert. Dementsprechend enthält das aktuelle Simulationssystem bereits alle thermischen Modelle (Wärmeerzeugung, Wärmespeicherung, Wärmeabgabe, Gebäude), die aktuell vor Ort verbaut sind. Weiterhin konnten erste Ergebnisse erzeugt und analysiert werden – alle thermischen Energieflüsse können mit dem aktuellen Modell dargestellt werden.

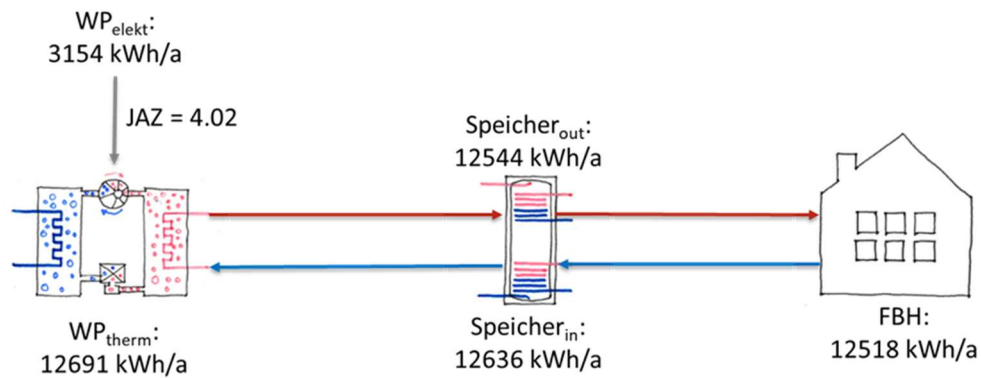


Abbildung 5: Energiebilanz des Simulationsmodells

Die Energiebilanz des Simulationsmodells ist hierbei eine gute Möglichkeit, die Plausibilität der Ergebnisse zu überprüfen. Die erzeugte Wärmemenge der WP muss jener Energiemenge entsprechen, die im Speicher ankommt und anschließend über die Fußbodenheizung ins Gebäude eingebracht wird – abzüglich der simulierten Verluste des Speichers. Die Abbildung zeigt, dass die Bilanz für das aktuelle Modell stimmig ist. Alle Abweichungen bei der Übertragung der thermischen Energie zwischen WP, Speicher und Gebäude liegen deutlich unter 1 %. Zudem kann die elektrische Leistungsaufnahme der WP, sowie die resultierende Jahresarbeitszahl (JAZ), bestimmt werden.

Mit dem Simulationsmodell konnten anschließend bereits einige Simulationsszenarien durchgerechnet werden. Einerseits die Frage, inwieweit die gewählte Innentemperatur in den Ferienwohnungen den Gesamtenergiebedarf und die Effizienz der Wärmepumpe (WP) beeinflusst. Diese Thematik war gerade in der politischen Lage des Krieges in der Ukraine und der damit einhergehenden Energiekrise, in der die Reduzierung der Innentemperatur als eine der Maßnahmen zur Energieeinsparung gewählt wurde, interessant. Die nachfolgende Abbildung zeigt einige Ergebnisse dieser Untersuchung.

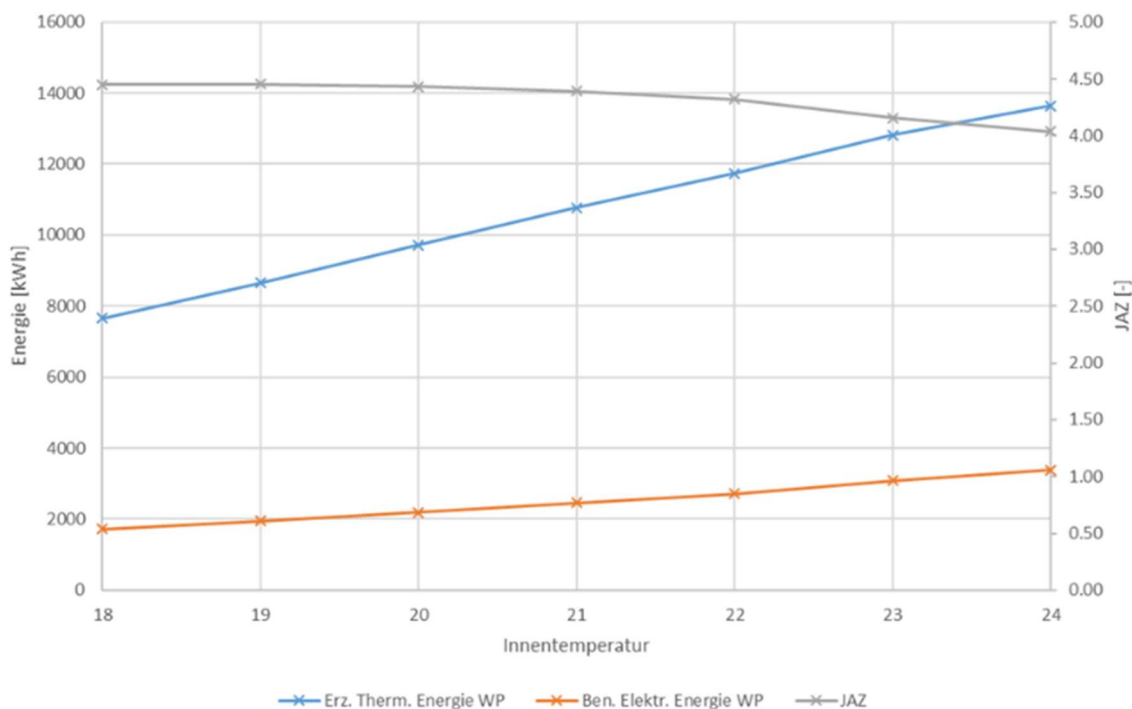


Abbildung 6: Untersuchung des Zusammenhangs zwischen Innentemperatur, thermischer und elektrischer Energie sowie der Effizienz der Wärmepumpe

Die Ergebnisse umfassen hierbei alle vier Ferienwohnungen für den Zeitraum eines Jahres, mit Fokus auf der Heizperiode. Alle gewählten Randbedingungen (Wärmepumpe als Wärmeerzeuger, FBH als Wärmeabgabe, thermischer Speicher, etc.) entsprechen den realen Gegebenheiten vor Ort. In blau dargestellt ist die erzeugte thermische Energie der WP, in orange die dafür benötigte elektrische Energiezufuhr. In grau gekennzeichnet und an der rechten y-Achse abzulesen ist die daraus resultierende Effizienz der WP, bezeichnet als Jahresarbeitszahl.

Durchgeführt wurden die Untersuchungen für eine flexible Innentemperatur zwischen 18 °C und 24 °C. Wie zu erwarten war, geht mit steigender Innentemperatur ein erhöhter Energiebedarf einher. Es zeigt sich beispielsweise, dass bei einer Absenkung der Innentemperatur von 22 °C auf 18 °C ca. 35 % der thermischen Energie eingespart werden könnte. Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass eine Reduzierung der Innentemperatur um 1 °C einem Einsparpotenzial der thermischen Energie zwischen 800 und 1000 kWh entspricht. Zudem ist erkennbar, dass die Effizienz der WP bei steigender Innentemperatur abnimmt. Die JAZ einer WP hängt maßgeblich von der Differenz zwischen Wärmequelle (Außenluft) und Wärmesenke (Heizungsvorlauf) ab. Bei steigender Innentemperatur wird auch eine erhöhte Vorlauftemperatur im Heizsystem benötigt, was somit zu einer geringeren Effizienz führt. Ein weiterer wichtiger Punkt in Arbeitspaket 1.1 war die Validierung der thermischen Simulation. Die folgende Abbildung verdeutlicht die Vorgehensweise.

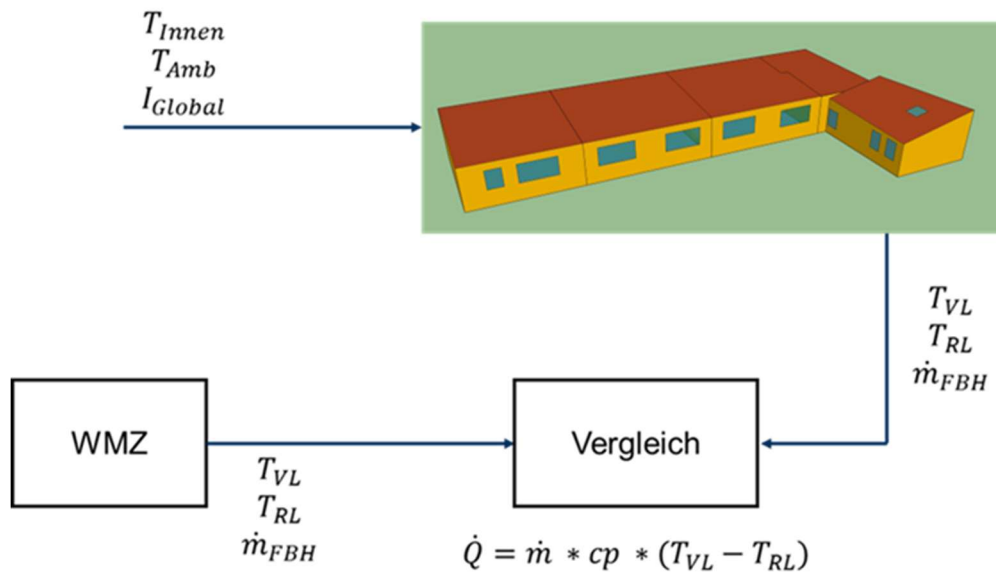


Abbildung 7: Schematische Darstellung der Vorgehensweise zur Validierung der Simulationsergebnisse anhand von Messdaten

Das abgebildete Gebäudemodell steht für die thermische Simulationsumgebung, die alle relevanten Informationen zu den Ferienwohnungen beinhaltet (Wärmeerzeugung, Wärmespeicherung, Wärmeabgabe, Nutzerprofile, etc.). Die Simulation benötigt hierbei zur Validierung die Innentemperatur der einzelnen Wohnungen (T_{Innen}), die Umgebungstemperatur (T_{Amb}) und die Globalstrahlung (I_{Global}). Mit diesen Daten lässt sich der Betrieb der Fußbodenheizung abbilden, dafür relevant sind v.a. die Vor- und Rücklauftemperatur (T_{VL} und T_{RL}) und der Massenstrom ($\dot{m}$). Die Vorlauftemperatur ergibt sich aus der Heizkurve, der Massenstrom wurde für die jeweiligen Heizkreise bestimmt und die Rücklauftemperatur ist ein Output der thermischen Simulation. Die identischen drei Variablen lassen sich auch aus dem Wärmemengenzähler (WMZ), der vor Ort installiert wurde und Daten aufzeichnet, auslesen. Über die aufgeführte Gleichung zur Bestimmung von $\dot{Q}$ lässt sich der Wärmeeintrag in die Wohnungen berechnen – sowohl aus der Messung, als auch aus der Simulation.

Wenn die entsprechenden Werte anschließend miteinander verglichen werden, zeigt sich also, welcher Wärmeeintrag vor Ort real gemessen wurde und welchen Bedarf die Simulation unter identischen Randbedingungen ausgeben würde. Über einen Vergleich der beiden Werte sollte abgeschätzt werden, ob das thermische Modell das reale Verhalten des Gebäudes hinreichend genau abschätzen kann.

Bei Vergleichen zwischen Simulation und Messungen muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass diese v.a. in Gebäuden sehr komplex sind. Dies liegt v.a. an den Einflussgrößen, die weder gemessen noch verlässlich prädiziert werden können. Betrachtet man konkret die entsprechenden Größen, die den Wärmebedarf eines Gebäudes beeinflussen, so lassen sich die Transmissionswärmeverluste und die solaren Gewinne recht gut abschätzen. Kennt man die entsprechenden Innen- und Außentemperaturen bzw. die Solarstrahlung, können die Werte recht verlässlich berechnet werden.

Abweichend dazu verhalten sich allerdings die Lüftungswärmeverluste und die internen Gewinne. Die internen Gewinne hängen stark von der Belegung und der Nutzung der Ferienwohnungen ab.

Diese werden in Simulationen allerdings in der Regel mit konstanten Faktoren angenommen. In den hier betrachteten Ferienwohnungen wurden eher geringe Werte gewählt, da das Nutzungsprofil der Wohnungen auf häufigere Abwesenheitszeiten schließen und sich somit nicht mit klassischen Wohngebäuden vergleichen lässt. In diesem Validierungsansatz wurden 50 W/Person in der prädizierten Anwesenheitszeit angenommen und 1 W/m² als Abwärme durch elektronische Geräte im Haushalt.

Ebenso schwierig in der Vorhersage, in den Auswirkungen auf den Wärmebedarf aber noch relevanter, sind die Lüftungswärmeverluste. Letztlich kann nicht verlässlich in der Simulation hinterlegt werden, wann Fenster zum Lüften geöffnet werden und somit ein höherer Wärmebedarf auftritt. Daher wurde auch hier in der Simulation auf Richtwerte zurückgegriffen (beispielsweise tagsüber 30 m³/h für die Fensterlüftung, DIN 1946-6).

Der Zeitraum, der konkret für die Validierung genutzt wurde, umfasst den 16.02.2024 bis zum 31.03.2024. Der Start wurde dabei auf eben jenes Datum gesetzt, an dem alle benötigten Messdaten vom Demonstrationsobjekt vorlagen, die für die Simulation benötigt werden. Ende März wurde gewählt, da der April, v.a. in den ersten Tagen, bereits recht frühlingshafte Temperaturen aufwies, die kaum einen Wärmeeintrag in den sehr gut gedämmten Ferienwohnungen erfordern. Nachfolgend werden die gemessenen Innentemperaturen für den genannten Zeitraum abgebildet.

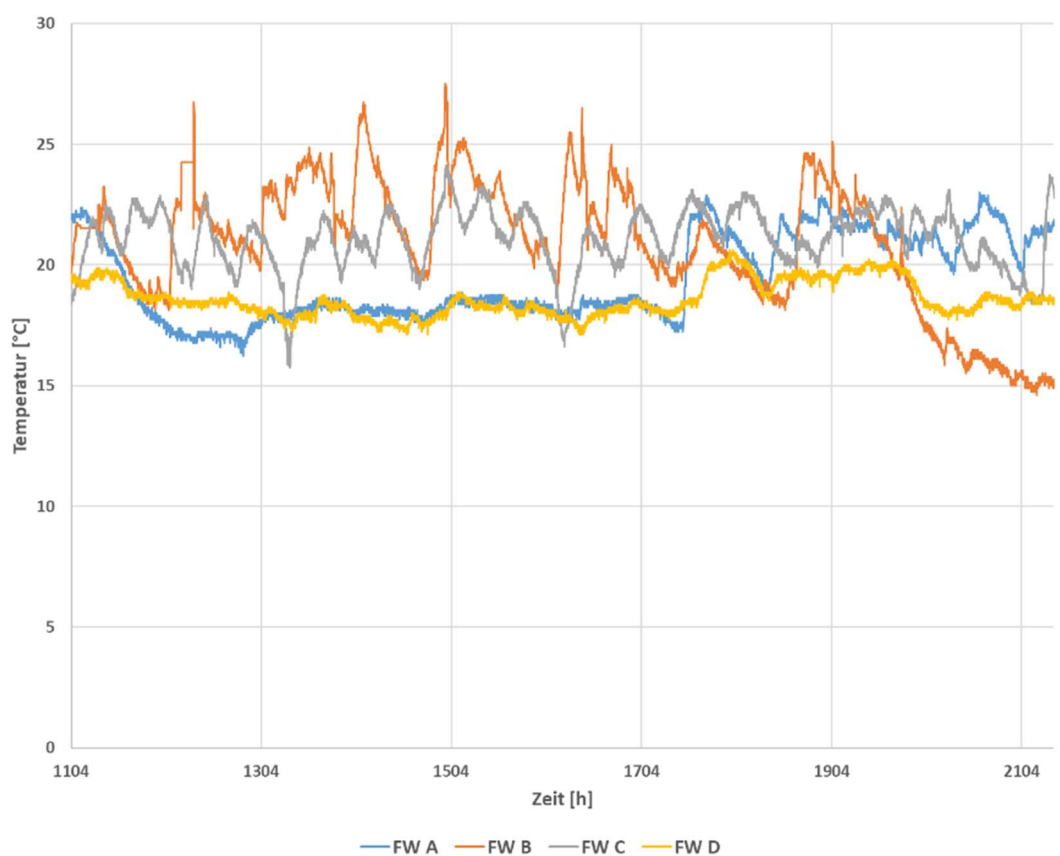


Abbildung 8: Innentemperaturen der Ferienwohnungen A, B, C und D während des Betrachtungszeitraums

Die Abbildung verdeutlicht, weshalb eine Messung der Innentemperatur für den Ansatz einer Validierung so wichtig ist. Die vier Ferienwohnungen zeigen ein sehr unterschiedliches thermisches

Nutzungsprofil. Während Ferienwohnung B auf über 25 °C geheizt wurde und lediglich zum Ende des Betrachtungszeitraum (vermutlich wegen Abwesenheit) deutlich in der Temperatur absinkt, liegt FW D eigentlich dauerhaft unterhalb von 20 °C. Da die Innentemperatur einen hohen Einfluss auf den Energiebedarf hat, wäre eine Validierung, die lediglich auf Abschätzungen basiert, nicht sinnvoll. Die folgende Abbildung zeigt überdies auch die Außentemperatur und die Solarstrahlung für den entsprechenden Zeitraum. Gemessen wurden die Daten über eine Wetterstation am Demonstrationsobjekt.

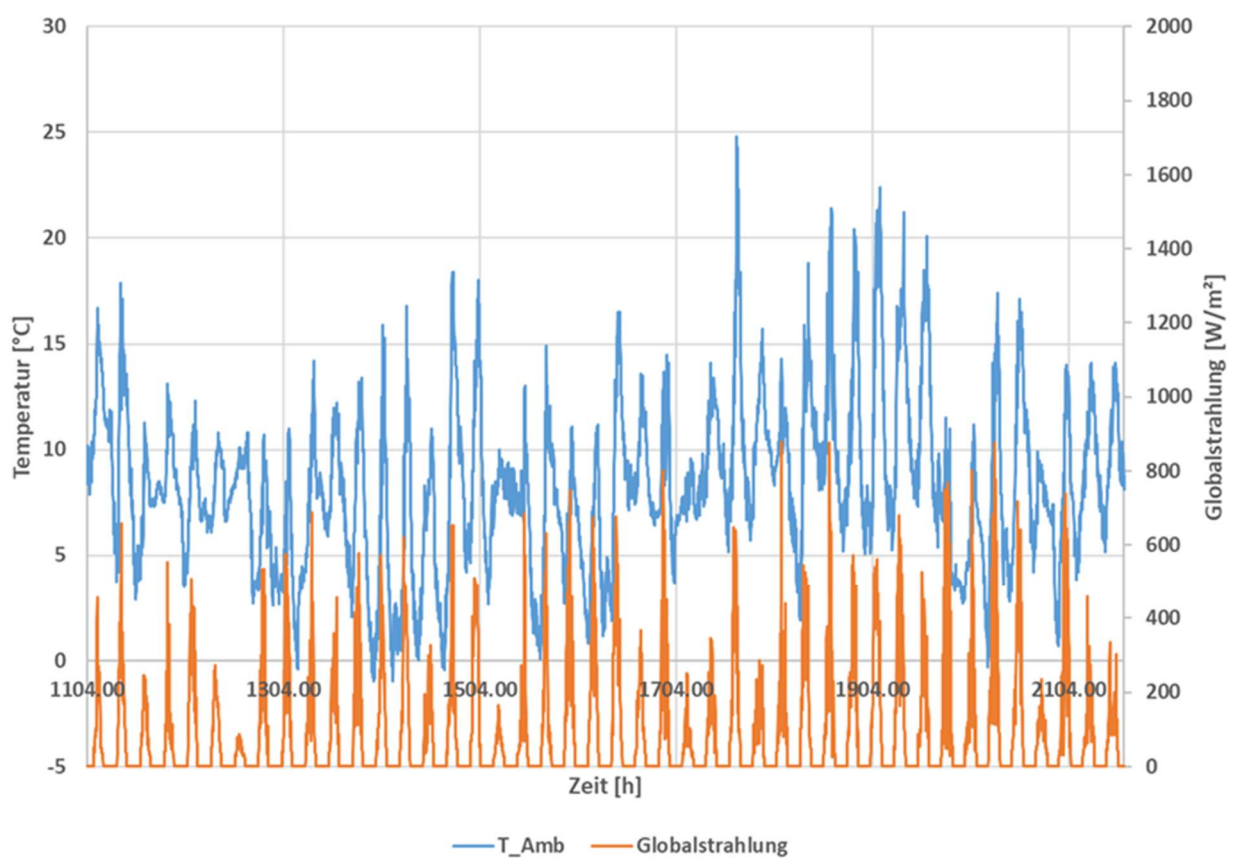


Abbildung 9: Messdaten der Außentemperatur und der Globalstrahlung aus der Wetterstation am Demonstrationsobjekt innerhalb des Betrachtungszeitraums

Die Umgebungstemperatur (in blau) ist dabei an der linken y-Achse abzulesen, die Solarstrahlung (in orange) an der rechten. Es zeigt sich, dass auch der Betrachtungszeitraum bereits recht milde Tage beinhaltet, die Temperaturen aber gerade in den Nacht- und Morgenstunden dennoch so gering sind, dass ein Wärmeeintrag über die Fußbodenheizung für die Bereitstellung der gewünschten Innentemperaturen benötigt wird.

Für den aufgeführten Zeitraum wurde das thermische Modell anschließend simuliert und die Ergebnisse mit den Messungen aus dem Wärmemengenzähler verglichen.

Tabelle 4: Vergleich der Simulationsergebnisse und der vorliegenden Messdaten während des Betrachtungszeitraums

Vergleich	Messung	Simulation	Abweichung	[%]
HWB [kWh]	1871	1764	107	6

Aufgeführt ist der Heizwärmebedarf (HWB) aus der Messung und der Simulation, sowie die absoluten und prozentualen Abweichungen. Über den gesamten Betrachtungszeitraum zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung, mit geringen Abweichungen von 107 kWh bzw. 6 %. Diese Werte sind zwar für eine erste Abschätzung durchaus interessant, ansonsten aber von geringer Relevanz. Es ist letztlich nicht das Ziel, mit dem thermischen Modell den Wärmebedarf über einen Zeitraum von etwa 1,5 Monaten darstellen zu können – sondern in Zeiträumen, die für die entwickelte Regelung zur Vorhersage des Wärmebedarfs relevant sind. Daher wird nachfolgend der Verlauf aus Simulation und Messung aufgeführt, jeweils für Zeiträume von 12 Stunden.

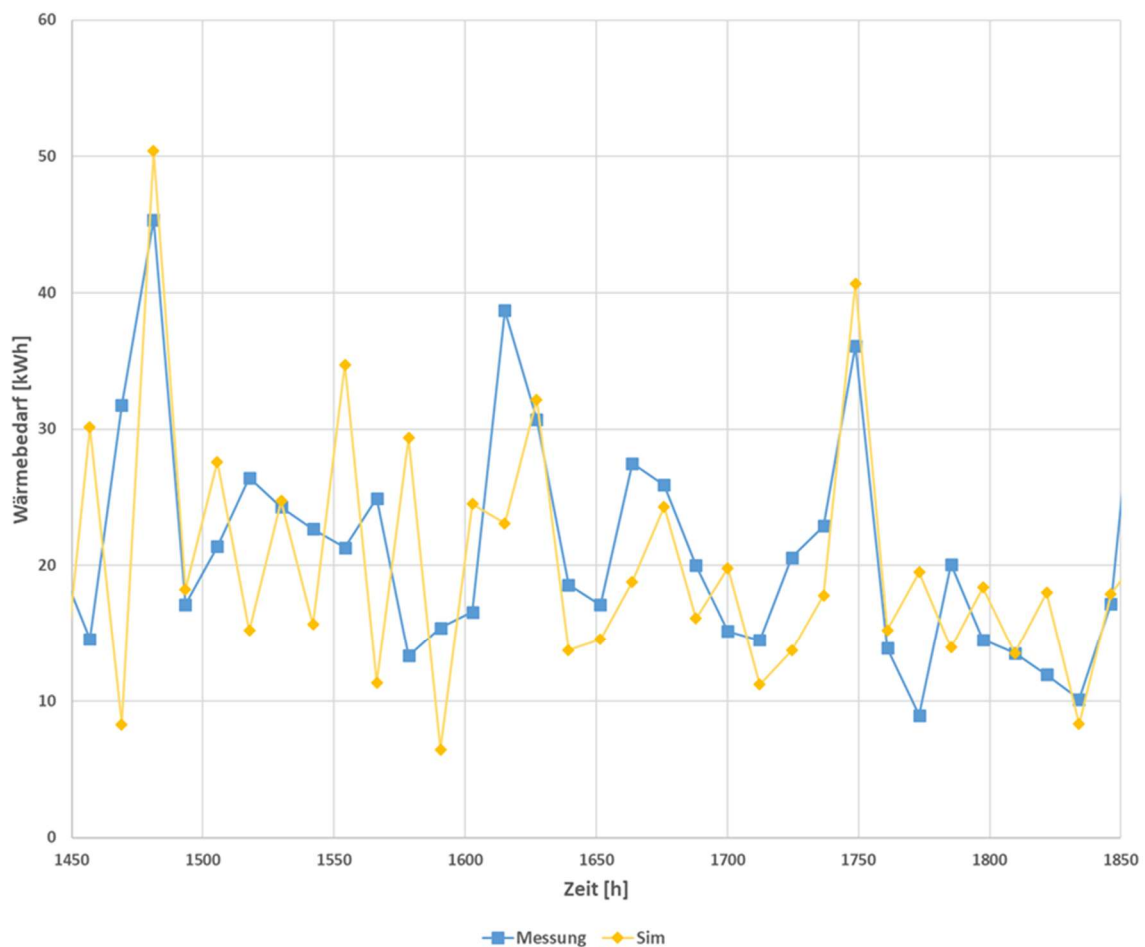


Abbildung 10: Vergleich der Messdaten und der Simulationsergebnisse für 12h-Intervalle

Dargestellt sind die Verläufe der Messung (in blau) und der Simulation (in gelb) für 400 Stunden. Es wurde darauf verzichtet, den gesamten Betrachtungszeitraum darzustellen, da die Anzahl der Werte für eine genauere Betrachtung der Verläufe zu hoch gewesen wäre. Der ausgewählte Zeitraum unterscheidet sich in den Erkenntnissen aber nicht von anderen Zeiträumen. Die Punkte stellen immer die gemessene und simulierte Energiemenge für 12 Stunden dar. Dies entspricht einer Periode, die auch für die Vorhersage der Regelung relevant sein kann.

Es zeigt sich, dass die Abweichungen in einzelnen Punkten deutlich höher sind als die aufgeführten 6 % über den Gesamtzeitraum. Dennoch bestätigt sich eine insgesamt gute Übereinstimmung im Verlauf der Kurven. Die größte Abweichung tritt etwa in Stunde 1470 auf. Dort ist der Wert der Simulation sehr gering, die Messung allerdings bereits deutlich höher. Schaut man nochmals auf Abbildung 6 sieht man, dass dies ziemlich genau dem Zeitpunkt entspricht, in dem Ferienwohnung B von unter 20 °C auf über 25 °C geheizt wird. In der Messung scheint die entsprechende Energiemenge teilweise schon integriert zu sein, die Simulation berücksichtigt dies erst in ihrem nächsten Schritt. Solche Abweichungen zwischen Simulation und Messung lassen sich allerdings kaum vermeiden. Dennoch sind die grundsätzlichen Übereinstimmungen als durchaus positiv zu bewerten.

Weiterhin wurde innerhalb des Projektzeitraums und unter dem thematischen Hintergrund des Projekts eine Dissertation mit dem Thema „Prädiktive Optimierung von Energieflüssen in Wohngebäuden mit Photovoltaik-Eigenstromerzeugung unter Berücksichtigung von Power-To-Heat (Wärmepumpe), Power-To-Power (Stromspeicher) und Vehicle-To-Building (bidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen)“ (D. Schmidt, 2024) fertiggestellt. In der Arbeit wurde eine prädiktive Optimierung entwickelt, die grundsätzlich identische Modelle beinhaltet, wie sie auch im Forschungsprojekt umgesetzt wurden, inklusive des Gebäudemodells. Das Ziel der Optimierung liegt dabei v.a. in der Reduzierung des Stromnetzbezugs durch einen regelbasierten und prädiktiven Betrieb der elektrischen Verbraucher hinsichtlich der Eigenstromerzeugung aus Photovoltaik.

Bei über 1000 untersuchten Szenarien, die sich in der Dimensionierung der Modelle (Größe der PV-Anlage, Volumen des thermischen Speichers, Kapazität der Haushalts- und Autobatterie) und der gewählten Innentemperatur (18-24 °C) unterscheiden, konnten im Vergleich zu einer Referenzbetrachtung ausschließlich Reduzierungen im Netzbezug erreicht werden. Die Einsparungen liegen maximal bei über 1000 kWh und im Mittel bei etwa 560 kWh bzw. bei maximal 35 % und im Mittel 16 %. Eine Vollversion der Dissertation steht unter <https://doi.org/10.26204/KLUEDO/8439> zur Verfügung.

Insgesamt konnten in AP 1.1 alle Aufgaben, die im Projektantrag aufgeführt wurden, abgeschlossen werden. Das Gebäude und die dazugehörigen Anlagen wurden modelliert und in eine Simulationsumgebung integriert. Mit verschiedenen Simulationen konnte das Verhalten der unterschiedlichen Komponenten dargestellt werden. Sowohl der Vergleich mit dem vorliegenden Energiebedarfsausweis als auch mit den vorhandenen Messdaten zeigt dabei gute Übereinstimmungen und verdeutlicht, dass sich die entwickelten Modelle gut zur Abbildung des realen Verhaltens einsetzen lassen. Die Simulationsumgebung zur Anbindung der Regelung aus AP 1.3 wurde entwickelt, erfolgreich getestet und steht zur Kopplung mit dem MATLAB-Modell bereit. Durch Verzögerungen konnte die modellprädiktive Regelung allerdings nicht mehr abschließend simulativ getestet werden. Genauere Erläuterung dazu sind dem inhaltlichen Bericht zu AP 1.3 zu entnehmen.

Beitrag von IG-CP

Zu den wesentlichen Tätigkeiten der IG-CP im Rahmen von Arbeitspaket 1.1 gehörten die detaillierte Auswertung der Lastgänge verschiedener Weingüter, Restaurants und Hotels. Ziel war es, fundierte Szenarien und Betriebsmodelle zu entwickeln. Durch kontinuierliche und sukzessive Anpassungen der Lastgangmodellierung, etwa durch detailliertere Lastganganalysen dieser Betriebe, konnten die Modelle stetig optimiert werden.

Darüber hinaus wurden Daten zur präzisen Modellierung der thermischen Gebäudehülle und der zugehörigen Infrastruktur bereitgestellt. Diese Daten ermöglichten eine genaue Simulation der thermischen Eigenschaften der Gebäude. Parallel dazu wurden verschiedene Betriebsszenarien entwickelt, um unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten und deren Auswirkungen auf das Energiemanagementsystem zu evaluieren. In diesem Zusammenhang wurden auch Lastgangdaten zur Verfügung gestellt, die detaillierte Analysen des Energieverbrauchs und der Lastprofile ermöglichten.

2.1.2 AP 1.2 Predictive Intelligence

Beitrag von IS Predict

Kurz zusammengefasst war es das Ziel, Prognosen für PV-Erzeugung und Stromverbrauch für das Demogebäude zu liefern, und zwar im 15-Minuten-Intervall für die nächsten 24 Stunden, so dass der Projektpartner RPTU (LRS) eine energieoptimierte vorausschauende Steuerung realisieren kann.

Hierzu wurden im Laufe des Projektes mehrere KI-Prognosemodelle aufgebaut, um die besten Verfahren und Konfigurationen für die notwendigen Prognosen zu erforschen. Zwar wurden prinzipiell immer die gleichen Arten von Daten genutzt, nämlich:

- PV-Stromerzeugungsdaten
- Stromverbrauchsdaten
- Wetterdaten,

doch die einzelnen Datenlagen haben sich stark unterschieden.

Datenlage

Die folgende Grafik gibt einen Überblick über die Datenlage, die weiter unten beschrieben ist.

Data Situation - Overview



Abbildung 11: Überblick über Datenlage für KI-Prognosemodelle

Zu PV-Stromerzeugungsdaten:

- Zu Beginn des Projektes wurden vom Projektpartner IG-CP historische Daten von fünf PV-Anlagen im weiteren Umfeld um Kaiserslautern bereitgestellt. Diese Daten waren von guter Qualität. Sie konnten für die Jahre 2019 bis Ende 2021 genutzt werden. (Die Jahre davor (2017 – 2018) waren nicht nutzbar, da parallel zu den PV-Daten auch die Wetterdaten vorhanden sein müssen. Zu Wetterdaten: Siehe unten.)
- Ca. Mitte 2020 war die Sensorik und Datensammlung im Demogebäude installiert, so dass die Daten von den beiden PV-Anlagen genutzt werden konnten, und zwar bis ca. Mitte 2023. Danach gab es Probleme mit der Datensammlung.
- Mit starker zeitlicher Verzögerung wurden Anfang 2024 die PV-Anlagedaten des Demogebäudes an den Server der RPTU (LRS) angebunden, so dass ab dann online auf die Daten zugegriffen werden konnte.

Zu Stromverbrauchsdaten:

- Auch hier gab es lange Zeit „nur“ Daten von anderen Gebäuden, die wieder der Projektpartner IG-CP zur Verfügung stellte. Dies waren Daten von Restaurant und Vinothek von 2017 – 2022. Auch hier konnten die Daten ab 2019 genutzt werden wegen parallel notwendiger Wetterdaten.
- Ab Anfang 2023 wurden die Daten der Ferienwohnungen des Demogebäudes gesammelt.
- Ab Anfang 2024 wurde der Online-Zugriff, wie bereits oben erwähnt, realisiert, so dass auch diese Daten online verfügbar waren.

Die Stromverbrauchsdaten vom Demogebäude konnten jedoch nicht sinnvoll genutzt werden. Siehe hierzu Erläuterungen unten im Kapitel für die entsprechende Prognose.

Hinweis:

- Es lagen weder bei dem Restaurant, noch bei der Vinothek weitere Nutzungsdaten vor, wie bspw. Events oder geänderte Öffnungszeiten.
- Es gab zwar Buchungsdaten für die Appartements im Demogebäude, jedoch zeigte sich, dass diese nicht der tatsächlichen Nutzung entsprachen. (Die Wohnungen werden über Monate von der US Army angemietet. Die Nutzung erfolgt jedoch unregelmäßig.)

Zu Wetterdaten:

Hier wurden sowohl historische Wetterdaten als auch Wettervorhersagen benötigt (Globalstrahlung, Temperaturen, Luftfeuchte, ...).

Es wurden unterschiedliche Wetterdatenlieferanten und deren Genauigkeit in der Vorhersage untersucht.

- Der Deutsche Wetterdienst (DWD) hat sich als gute Datenquelle für Vorhersagen herauskristallisiert, da die Daten von ausreichend guter Genauigkeit und Vollständigkeit waren. Die Daten wurden daher ab Dezember 2021 gesammelt.
- Für historische Daten hat sich jedoch der Wetterdatenanbieter Solcast als beste Alternative gezeigt. Leider fehlt hier die für die Vorhersage wichtige Globalstrahlung. Hier konnte ab April 2021 der Partner RPTU (GST) Daten liefern, da sie einen Pyrometer auf dem DFKI-Gebäude in Kaiserslautern installiert haben. Ab März 2023 war die Wetterstation auf dem Demogebäude installiert, so dass ab dann auch Wetterdaten, inkl. Globalstrahlung, verfügbar waren.

Des Weiteren wurde die Sonnenposition berechnet.

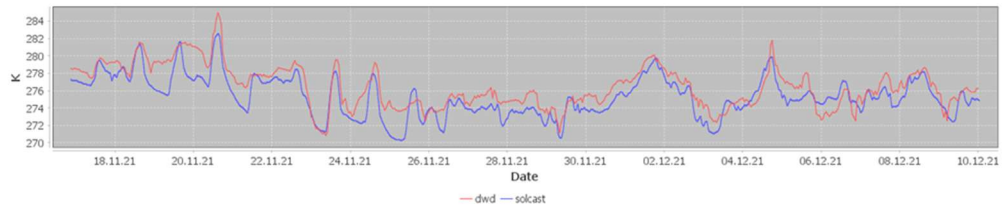
Hinweise:

- Bei so starken saisonalen Abhängigkeiten wie bspw. PV-Stromprognose ist es immer sinnvoll, mindestens zwei Jahre Daten zum Antrainieren der KI-Modelle zu haben. Dies war leider mit dem Demogebäude nicht gegeben.
- Außerdem hat sich gezeigt, dass
 - Die Daten zwischen DWD und Solcast teilweise stark abweichen,
 - Die Globalstrahlung zwischen Pyrometer (DFKI-Gebäude in KL) und Wetterstation (Erfenbach) ebenfalls stark abweichen, was durch vorbeiziehende Wolken verursacht werden kann.

All dies hat Auswirkungen auf die Genauigkeit beim Antrainieren der Modelle und danach natürlich bei der Prognoseleistung.

Die folgende Abbildung zeigt Temperatur und relative Luftfeuchte: Rot = DWD und Blau = Solcast. Die z.T. deutliche Differenz hat zur Konsequenz, dass die KI-Modelle ein bestimmtes Wetter, das sich in den Solcast-Daten widerspiegelt, mit einer bestimmten PV-Leistung verbinden, obwohl die Wettersituation laut DWD-Daten deutlich anders ist. (Es spielt auch keine Rolle, wer „recht hat“. Für die Prognose werden DWD-Daten genutzt, die die Wettersituation anders widerspiegeln.)

Temperature



Relative humidity

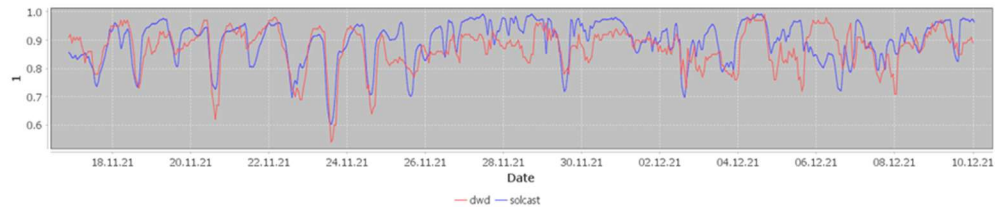


Abbildung 12: Wetterdaten DWD und Solcast im Vergleich mit z.T. großer Abweichung

Softwarearchitektur

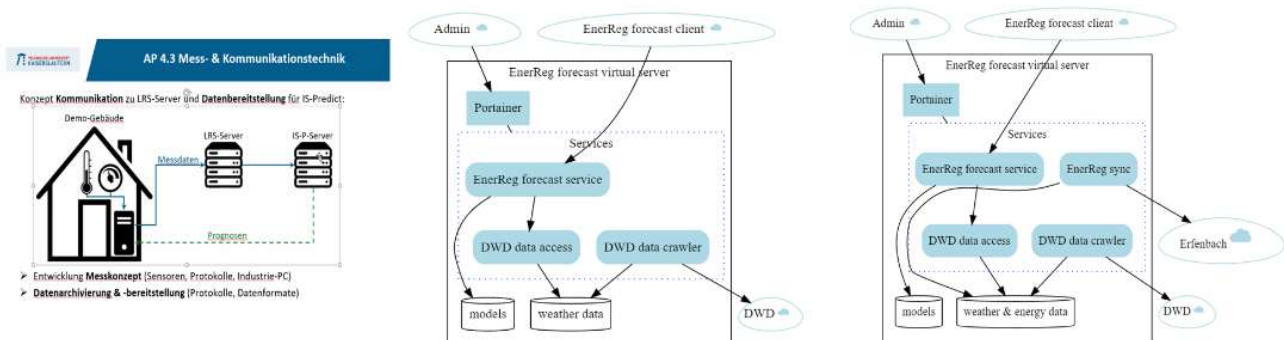
Die folgende Grafik zeigt die beiden im Projekt entwickelten Softwarearchitekturen, die weiter unten erläutert werden.

Software Architecture



Until July 2024: Offline data

From August 2024: Online data



www.ispredict.com | Copyright 2024

Abbildung 13: Softwarearchitektur für Datenoffline- und Datenonline-Betrieb

Für den Demobetrieb wurden die relevanten Daten im Demogebäude gesammelt und in regelmäßigen Abständen auf einen Server der RPTU (LRS) übertragen, von wo aus ISP auf die Daten zugreifen konnte. Die KI-Prognoseservices wurden aktiviert und lieferten die Ergebnisse an die RPTU (LRS) zurück.

Aufgrund der Verzögerung mit der Datenanbindung des Demogebäudes an den Server der RPTU LRS wurde die überwiegende Zeit im Projekt die Offline-Softwarearchitektur genutzt. Kurz vor Projektende konnten die Daten aus dem Demogebäude mit einer automatisierten Synchronisation über den RPTU (LRS)-Server (als Cloud dargestellt) online integriert werden.

- Die KI-Applikation wurde zwar auf IS Predict-Servern gehostet, war aber so aufgebaut, dass sie jederzeit in eine öffentliche Cloudumgebung überführt werden könnte.
- Durch die Nutzung von Swagger UI und Open AI konnte eine benutzerfreundliche und flexible Anwendung entwickelt werden. (<http://app.ispredict.com:9060/swagger-ui> sowie <http://app.ispredict.com:9060/enerreg-openapi>).
- Wie weiter unten erläutert, wurden unterschiedliche KI-Modelle für die Offline- und die Online-Architektur genutzt. Die Performance war in beiden Fällen zwar deutlich unterschiedlich, aber immer noch gut für die Kommunikation mit der Steuerungskomponente der RPTU (LRS). Eine REST-Anfrage wurde in der Offline-Architektur in 0,5 Sekunden (Multi Layer Perceptron Models) und in der Online-Architektur in 2 Sekunden (Long Short-Term Memory Models) bearbeitet.

KI-Prognosemodelle: Allgemeines

Es wurden ca. 90 % der Daten zum Antrainieren der Modelle genutzt und ca. 10 % der Daten zur Validierung. Auch wenn „nur“ 24-Stunden-Vorhersagen benötigt wurden, wurden die nächsten 45 Stunden prognostiziert (im 15-Minuten-Intervall). Grund hierfür war, dass die Wettervorhersage für 45 Stunden verfügbar war.

Die Abweichung zur Bewertung der Prognosegenauigkeit wurde mit der mittleren absoluten Abweichung in Prozent berechnet (Mean Absolute Percentage Deviation, abgekürzt MAPD oder PMAD, oder auch Mean Absolute Percentage Error (MAPE) genannt). Siehe: https://en.wikipedia.org/wiki/Mean_absolute_percentage_error

Besonderheit für Online-Modelle:

Bei ständig neuer Zufuhr von aktuellen Daten können tiefe KI-Modelle genutzt werden. Diese bringen in der Regel bessere Ergebnisse, da sie sich an Veränderungen anpassen können, also bspw. wenn die Effizienz der PV sich über die Zeit verändert oder wenn die Modelle auf andere Anlagen / Gebäude angewendet werden (Stichwort: Skalierbarkeit durch Anpassungsfähigkeit). Hierzu kann die Zufuhr der Online-Daten auch leicht verzögert sein. Die Modelle werden über einen Zahlenraum von „den letzten 7 Tagen“ trainiert (7 Tage * 24 Stunden * 4 15-Minuten-Werte). Mit kleineren Datenlücken, wie bspw. 2 Stunden fehlender Daten, können die Modelle gut umgehen, auch wenn dies Auswirkungen auf die Genauigkeit hat.

KI-Prognosemodell für PV-Stromerzeugung mit Offline-Daten

Es wurden mehrere lineare Netze ausprobiert. Die besten Ergebnisse erreichten Multi Layer Perceptron Models (MLPM) (<http://deeplearning.stanford.edu/tutorial/supervised/MultiLayerNeuralNetworks/>).

Während der Modellkonfiguration wurden unterschiedliche Varianten erprobt, wie bspw. unterschiedliche Inputparameter, Normalisierungen, Aktivierungen, Optimierungen und Regularisierungen. Die folgende Abbildung zeigt in Rot die tatsächlich erzeugte PV-Strommenge und in Blau die Prognose.

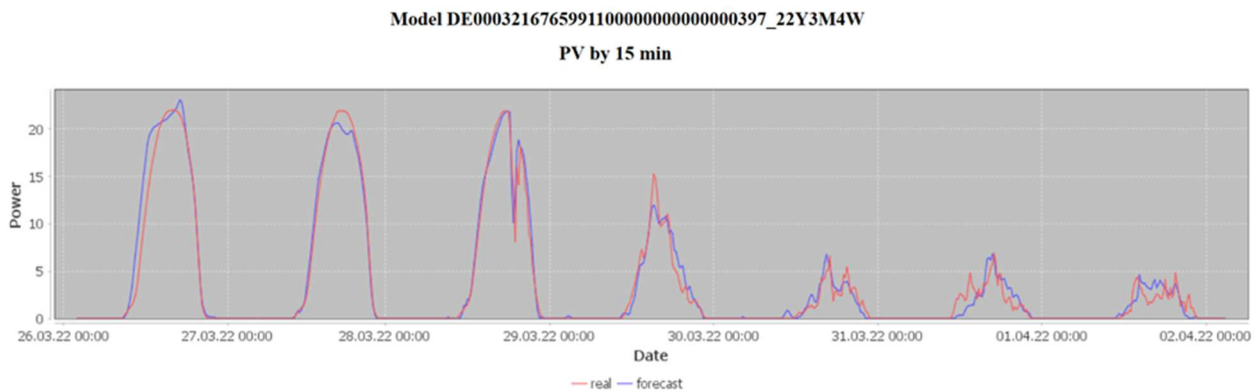


Abbildung 14: PV-Stromerzeugungsprognose mit Offline-Daten

Mit Multi Layer Perceptron Models war es extrem schwierig, stabile Ergebnisse mit einer Abweichung unter $PMAD = 18\%$ zu erreichen. Hierzu wären deutlich größere Datenmengen von sehr hoher Datenqualität von Nöten gewesen. (Es wurden Daten vom Demogebäude und weiteren PV-Anlagen genutzt.)

KI-Prognosemodell für PV-Stromerzeugung mit Online-Daten

Es wurden mehrere Long Short-Term Memory Models (LSTM) unterschiedlicher Tiefe ausprobiert. Während der Modellkonfiguration wurden unterschiedliche Varianten erprobt, wie bspw. Varianz in der Anzahl der Hidden Layer, in der Größe, in den verwendeten historischen Daten, in der Anzahl der Epochen, ... Die beste Konfiguration, die eine Größe von ca. 29 MB aufweist, kann mit jeder modernen Engine genutzt werden, wie bspw. TensorFlow, PyTorch oder MxNet.

Die folgende Abbildung zeigt in Blau die tatsächlich erzeugte PV-Strommenge und in Gelb die Prognose.

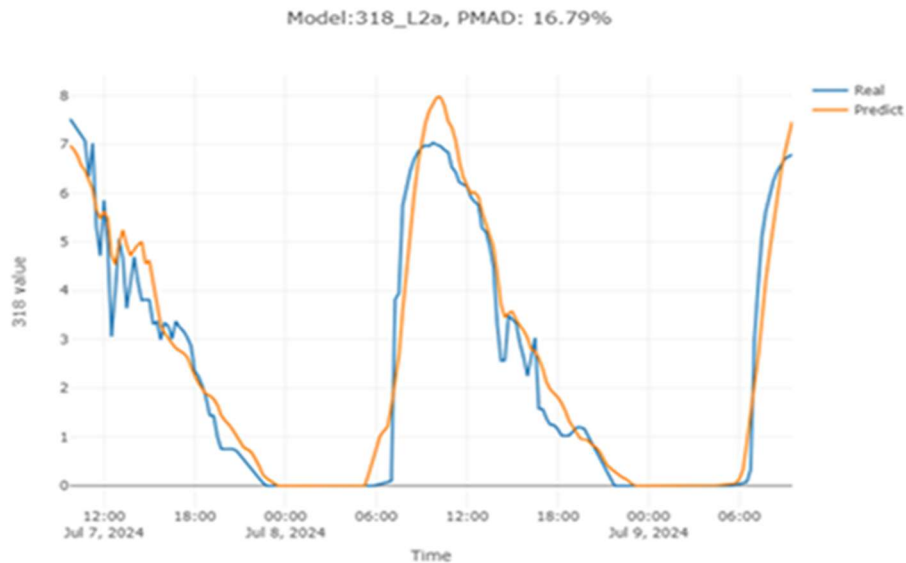


Abbildung 15: Hohe Genauigkeit für PV-Prognose mit Long Short Term Memory-Verfahren

Es konnten Abweichungen von ca. 9,5 % (PDMA) erzielt werden. Dies waren signifikant bessere Genauigkeiten als mit Offline-Daten. Betrachtet man die Tatsache, dass für saisonal stark variierende Werte, wie das bei PV der Fall ist, optimalerweise zwei Jahre als Trainingsdaten zur Verfügung stehen sollten, so ist davon auszugehen, dass die Abweichungen, die auf Trainingsdaten von April bis September 2024 basieren, noch weiter reduziert werden können mit weiteren Daten.

KI-Prognosemodell für Stromverbrauch mit Offline-Daten

Auch hier wurden mehrere lineare Netze ausprobiert. Wieder erzielten Multi Layer Perceptron Models (MLPM) die besten Ergebnisse (https://en.wikipedia.org/wiki/Multilayer_perceptron), die auf Daten von Restaurant und Vinothek angewendet wurden.

Die folgende Abbildung zeigt in Rot den tatsächlichen Stromverbrauch von einem Restaurant und in Blau die dazugehörige Prognose.

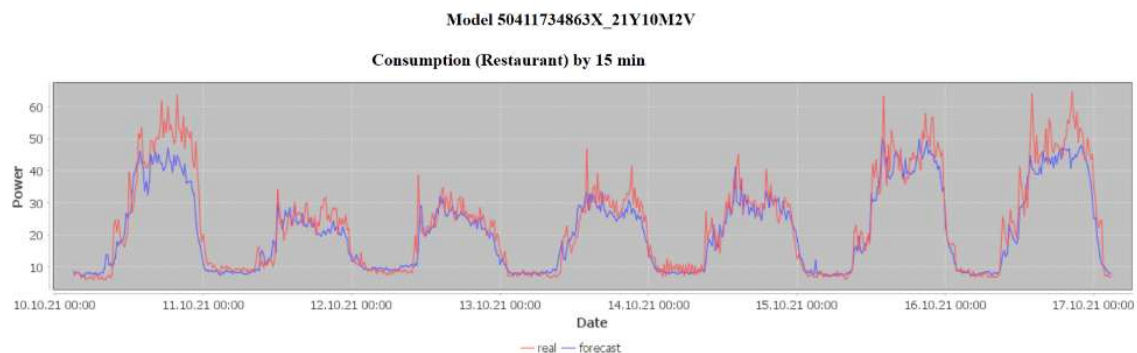


Abbildung 16: Prognose (blau) und tatsächlicher Stromverbrauch (rot) eines Restaurants

Es lagen – wie bereits in der Datenlage erläutert - keine weiteren Daten vor wie bspw. Events oder veränderte Öffnungszeiten. Von daher können die erzielten Ergebnisse mit einer Abweichung von 13,5 % (PMAD) als sehr gut angesehen werden.

KI-Prognosemodell für Stromverbrauch mit Online-Daten

Im Demogebäude waren die Stromverbräuche von vier Ferienwohnungen zu prognostizieren. (Ursprünglich war geplant, auch die Verbräuche des Restaurants zu prognostizieren. Aber aufgrund der Coronamaßnahmen wurde das Restaurant geschlossen. Nachdem die Coronamaßnahmen aufgehoben wurden, fand sich kein Pächter mehr für das traditionsreiche Restaurant.)

Die Ferienwohnungen sind von der US Army angemietet. Der Buchungsplan lag vor. Jedoch wurde schnell die Diskrepanz zwischen dem Buchungszeitraum und dem tatsächlichen Nutzungszeitraum erkannt.

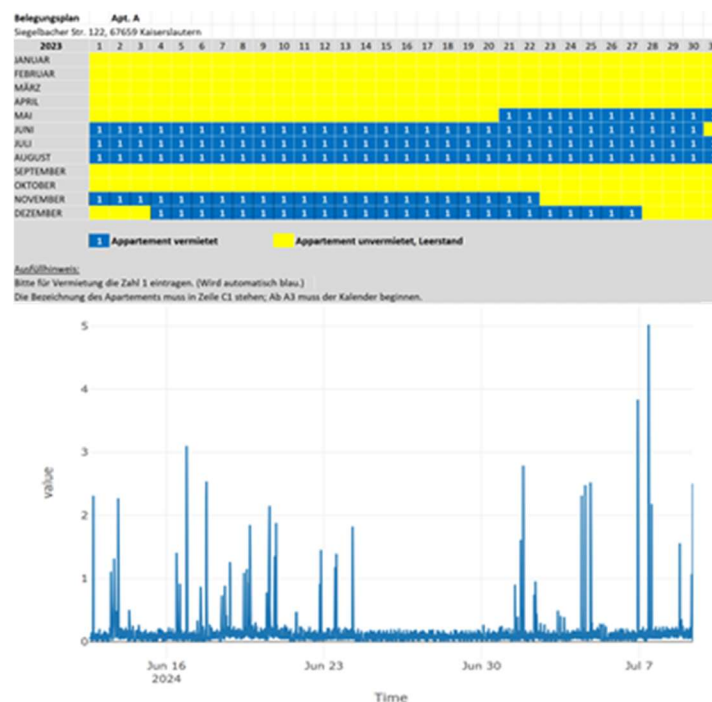
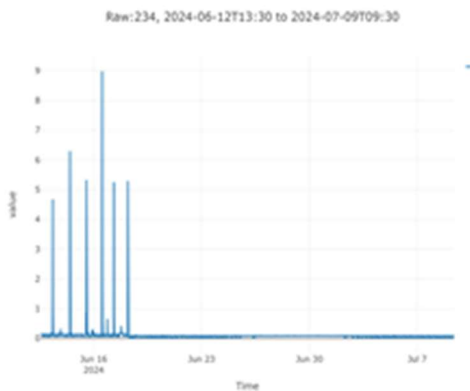


Abbildung 17: Wohnung A: Buchungszeitraum der Ferienwohnung entspricht nicht dem tatsächlichen Nutzungszeitraum.

Die folgende Abbildung zeigt, dass die Ferienwohnung A bspw. im Juni und Juli 2024 zwar vermietet war (blau in der oberen Abbildung), aber der Strom nur manchmal in dieser Zeit verbraucht wurde (abgesehen von einem Grundrauschen, verursacht durch z.B. Kühlschrank).

Diese Diskrepanz gilt auch für die anderen Ferienwohnungen. Die folgende Grafik zeigt für Ferienwohnung B und D die Verbräuche in einer Zeitperiode, in der die beiden Wohnungen vermietet waren.

Holiday Apartment B



Holiday Apartment D

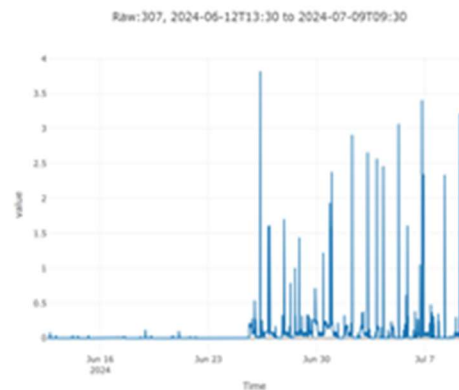


Abbildung 18: Wohnung B+D: Buchungszeitraum der Ferienwohnungen entspricht nicht dem tatsächlichen Nutzungszeitraum

Die einzige Ferienwohnung, die kontinuierliche Veränderung im Stromverbrauch hat, ist Ferienwohnung C; jedoch meist unter 300 W, was durch das o.g. Grundrauschen hervorgerufen wurde. Folglich ist es sehr unwahrscheinlich, dass in der gebuchten Zeit hier jemand lebte.

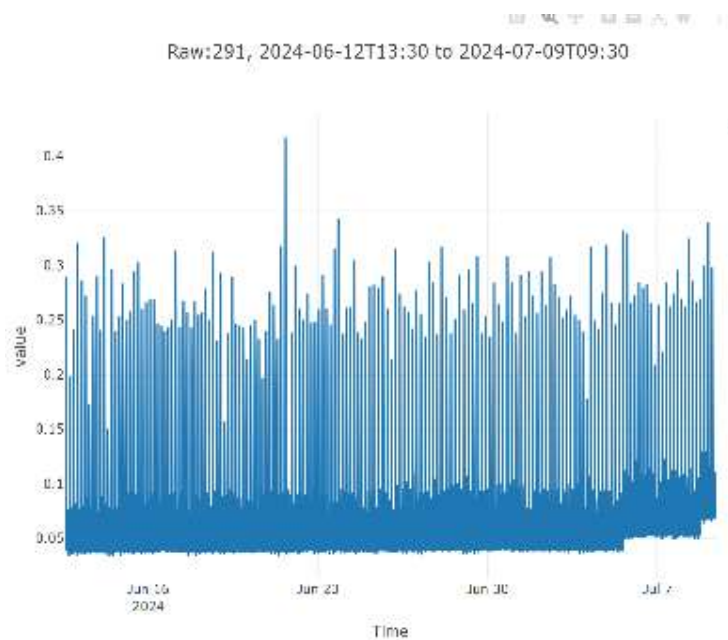


Abbildung 19: Ferienwohnung C hat während der Buchungsperiode einen maximalen Stromverbrauch von 300 W

Ohne einen verlässlichen Buchungsplan, der die tatsächliche Nutzung widerspiegelt, ist es nicht möglich, eine verlässliche Prognose zu erhalten.

Jedoch ist davon auszugehen, dass Online-Modelle wie Long Short-Term Memory Models (LSTM) auch für Stromverbräuche sehr gute Ergebnisse erreichen können und nicht weniger effektiv sein werden wie die Online-Modelle für die PV-Stromerzeugungsprognose.

- Online-Modell für PV-Stromprognose war mit 13,5 % Abweichung deutlich besser als Offline-Modell für PV-Stromprognose mit 18,3 % Abweichung.
- Das Offline-Modell für Stromverbrauch erreichte bereits eine Abweichung von 9,5 %, also schon signifikant besser als Offline-Modell für PV-Stromprognose mit 13,5 %.
- Folglich ist davon auszugehen, dass das Online-Modell für Stromverbrauch auch – signifikant – besser wird als 9,5 % Abweichung.

Zusammenfassung

Die folgende Abbildung

- fasst die Ergebnisse im AP 1.2 Predictive Intelligence zusammen und
- greift bereits die relevanten Ergebnisse aus dem AP 4 Demonstration / AP 4.4 Inbetriebnahme und Validierung auf.




▪ **Data**

- **Large delay** in Erfenbach data due to technical problems on material delivery for demo building.
- Similar data (PV / restaurant / vlnothek) was made available for getting started.
- **Online data:** From April 2024

▪ **Software Application**

- **Web service** runs with **good** and **stable performance (0.5 - 2 sec)**.
- **Open architecture** (Swagger UI and Open API)

▪ **Analytics**

▫ **Good and reliable results on 15 min prediction**

PV	AI Model	Deviation
Offline	Multi Layer Perception Models	18.29%
Online	Long Short Term Memory	9.48%*

Cons.	AI Model	Deviation
Offline	Multi Layer Perception Models	13.5%
Online	-- **	-- **

* High potential to reduce deviation below 8% with more online data.
** High potential to reach results with less then 9.48 deviation if reliable occupation plan or larger building (restaurant, hotel, school, administrative buildings, ..).

▫ **Good perspective** to apply algorithms on **other prediction tasks**, either **within energy context** or on **other domain**



Demonstration successfully executed. Validation of functionality completed. (Mile Stone 3)

www.ispredict.com | Copyright 2024

Abbildung 20: Zusammenfassung der Ergebnisse für PV-Stromerzeugungs- und Stromverbrauchsprognose (AP 1.2 und AP 4.4)

Beitrag von Dali Solarpower

Daten bekannter PV-Anlagen wurden gesammelt, vorverarbeitet und weitergegeben. Weitergegeben wurden beispielweise Daten einer PV-Anlage in Hochspeyer mit einer Leistung von 29,7 kWp und 135 Modulen. Außerdem gesammelt wurden Daten von Anlagen in Mehlingen, Clausen, Miesau, Landstuhl und auf dem Fröhnerhof. Alle sind im Umkreis Kaiserslautern, wie das

Gebäude des Projekts. Die Infrastruktur und der Ausbau des Stromnetzes sind Erfenbach ähnlich, weshalb diese Anlagen gut geeignet sind.

Daten aller PV-Anlagen am Beispielobjekt wurden gesammelt. Vergleich zwischen Süd, Nord und Westseite wurde durchgeführt. Dabei wird die Südseite als stärkster Produzent mit 100 % angerechnet im Vergleich zur Nord- und Westseite.

	Leistungsvergleich Erfenbach seit 11.05.2022 (Inbetriebnahme Norddach)		
	Erfenbach Kapellenhof 124 (29,60 kWp Südseite)	Erfenbach Kapellenhof Nord (29,56 kWp)	Erfenbach Kapellenhof 2.ter Bauabschnitt (24,960 kWp) West
Mai 22	4008	3128	3462
Jun 22	3755	3291	3362
Jul 22	4189	3459	3664
Aug 22	3986	2468	3144
Sep 22	2758	1345	1923
Okt 22	2228	736	1156
Nov 22	1144	415	497
Dez 22	231	113	105
Gesamt Mai-Dez-2022	22299	14955	17313
KWp	29,6	29,56	24,96
KWh/KW/Jahr	753	506	694
Verhältnis zur Südseite	100%	67%	92%

Abbildung 21: Leistungsmessungen am Demonstrationsgebäude

Zur Messung von Verbrauchsdaten an unterschiedlichen Standorten wurden Messgeräte verbaut und die Zugangsdaten zur Überwachung an Immobilien Kafitz weitergeleitet.

Beitrag von IG-CP

Im Rahmen von Arbeitspaket AP 1.2 hat die IG-CP mbH historische PV-Erzeugungsdaten beschafft, um die Software von IS Predict zu trainieren und präzise Prognosen zu ermöglichen. Diese Daten bildeten die Grundlage für die Entwicklung intelligenter und adaptiver Prädiktionsalgorithmen. Darüber hinaus bereitete die IG-CP mbH relevante Datensätze, einschließlich Standorten und Gewerbearten, für die Weiterverarbeitung durch IS Predict auf.

Beitrag von Immobilien Kafitz

Es wurden Verbrauchsdaten von Weingütern erfragt und ausgewertet. Bei Höfen, die bereits selbst Strom erzeugen, wurde ebenfalls die Produktion festgehalten und analysiert. Hierzu wurden zum einen Weingüter vor Ort besucht (Weingut Knöll & Vogel und Weingut Hahnühle), aber auch Fragebögen verschickt zur Befragung. Um weitere Verbrauchsdaten einer Mischnutzung zu erhalten, wurden ebenfalls Messgeräte in einem Restaurant, auf einem Reiterhof und in einer Produktionshalle installiert. Die erhaltenen Verbrauchsdaten wurden an IS Predict weitergeleitet.

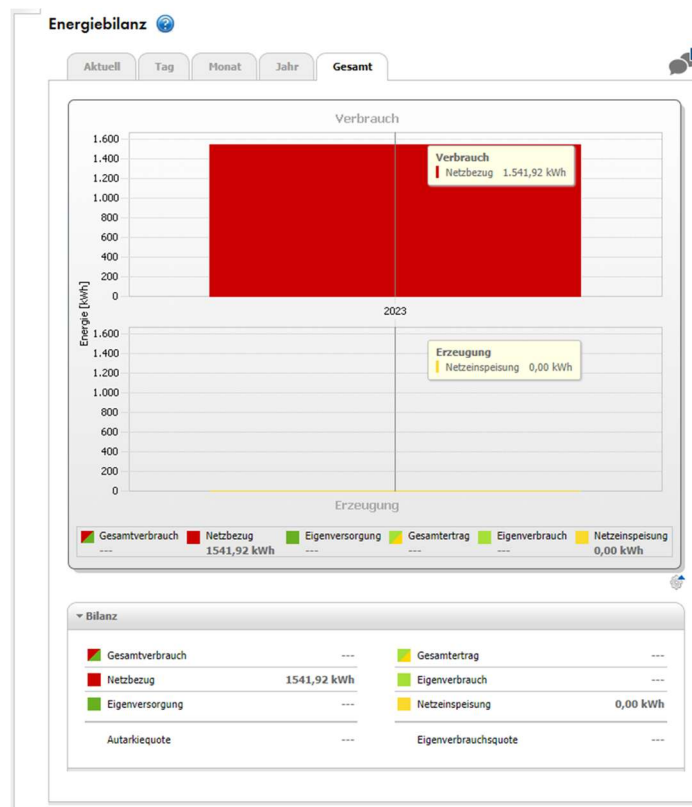


Abbildung 22: Verbrauchsmessdaten der Wärmepumpe vom Reiterhof auf dem Fröhnerhof

Immobilie:	Knöll & Vogel Klingweg 3, 76887 Bad Bergzabern		
Nutzung:	Gewerbe	Privat	Zustand
			Gut
	Branche		Mittel
Verbrauch/Jahr:	Strom	 kWh	Renovierungsbedürftig
	Öl	 Liter	Kosten ca. €
	Gas	 cbm	
	Wasser	 cbm	Dachfläche
			Ziegel
Haupt Verbraucher:	Privathaus		Blech
	Mieter		Eternit ohne Asbest
	Gewerbe		Eternit mit Asbest
	Maschinen		Folie
			Lage
			Stadt
			Dorf
Fuhrpark:	PKW	 Stk.	Touristisch
	LKW	 Stk.	Abgelegen
	E-Mobil	 Stk.	Attraktiv
	Motorrad	 Stk.	Bäuerlich
			Unattraktiv
Immobilien:	Privathaus		Objekt
	Mietshaus		Industrie
	Fremdenzimmer		Bäuerlich
	Produktion		Eher groß
	Lager		Eher klein
			Grundstück m²

Abbildung 23: Fragebogen

2.1.3 AP 1.3 Modellprädiktive Regelung

Beitrag von RPTU/LRS

Im Rahmen dieses Unterarbeitspakets wurde ein Energiemanagement mittels modellprädiktiver Regelung für das betrachtete Mischnutzungsgebäude entworfen und implementiert. Die Aufgabe des Energiemanagementsystems ist es, basierend auf den Prognosen von lokaler regenerativer Erzeugung einerseits und den elektrischen Bedarfen für die verschiedenen Nutzungseinheiten sowie der durch die Wärmepumpe bereitgestellten Heizwärme andererseits, die Gesamtheit der elektrischen und thermischen Energieflüsse im Gebäude zu optimieren. Nach welchen Kriterien die Energieflüsse optimiert werden sollen, kann dabei durch die Wahl der Kostenfunktion verschieden gestaltet werden. Es ist beispielsweise eine Minimierung der Energiekosten möglich, oder alternativ eine stärker netzschonende Betriebsweise, welche Einspeise- und Bezugsspitzen minimiert. Die reale Situation der Anlagentechnik und baulichen Begebenheiten im Gebäude wird dabei durch die Verwendung der physikalischen Modelle aus AP 1.1 und die Einflüsse durch nutzerspezifisches Verhalten durch die KI-basierten Prognosemodelle aus AP 1.2 in der Prädiktion explizit berücksichtigt. Daneben können auch regulatorische Einschränkungen, wie beispielsweise eine Einspeisebegrenzung am Netzanschluss, in das Optimierungsproblem als Nebenbedingungen integriert werden.

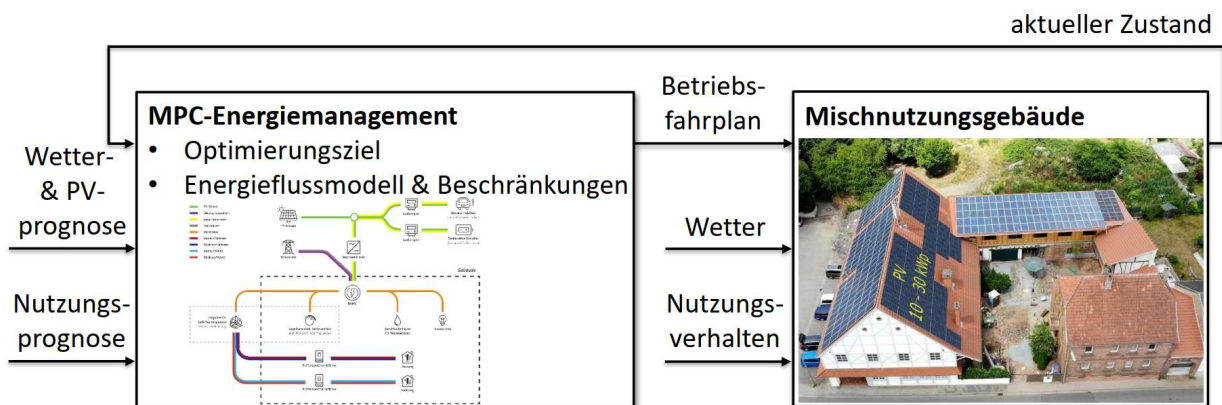


Abbildung 24: Übersicht der Informationsflüsse zwischen Energiemanagementsystem und Gebäude.

Abbildung 24 gibt eine Übersicht über den strukturellen Aufbau des Gebäudes mit Energiemanagement. Grundsätzlich besteht das gesamte Energieflussmodell aus zwei Teilen: dem elektrischen System, dargestellt durch das Versorgungsteilsystem zwischen der solarelektrischen Erzeugung und dem Hausanschluss sowie das Teilsystem Haus, welches durch den gesamten elektrischen Energieverbrauch charakterisiert ist. Als Modellerweiterung dient ein zusätzlicher thermischer Strang zur gezielten Nachbildung des auch im Demonstrationsgebäude realisierten Heizungskonzeptes mit einer Wärmepumpe und einem Warmwasser-Pufferspeicher. Das EMS berechnet durch Optimierung der Energieflüsse, unter Berücksichtigung der Energieflussmodelle, weiteren Einschränkungen, sowie den Prognosen für Erzeugung und Verbräuchen einen Betriebsfahrplan für alle steuerbaren Komponenten im Gebäude. Dieser wird an die einzelnen Komponenten übertragen, welche diesen umsetzen. Da die tatsächliche Erzeugung und insbesondere der nutzerabhängige Bedarf typischerweise von der gestellten Prognose abweichen, werden alle Energieflüsse im Gebäude gemessen und als aktuelle Zustandsinformation an das EMS zurückgemeldet. Dieses kann dadurch auf die veränderten Gegebenheiten reagieren und eine neue

optimale Betriebsweise für die kommenden Stunden berechnen. Dieser Prozess läuft wiederkehrend ab, so dass eine fortlaufende Optimierung der Energieflüsse stattfindet.

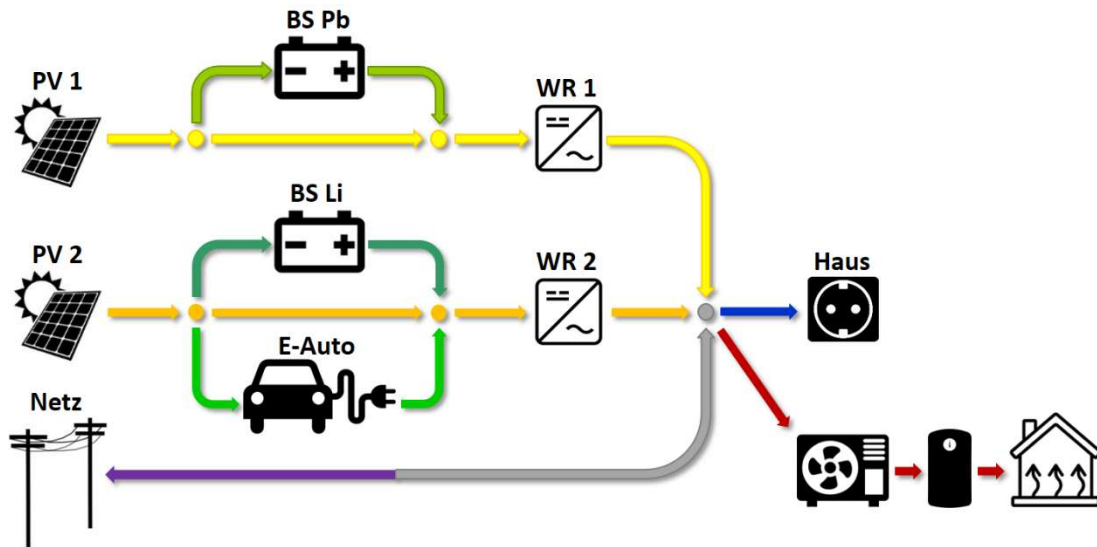


Abbildung 25: Übersicht Energieflussmodell innerhalb des MPC-Energiemanagements

Die Arbeiten am Energiemanagementsystem mittels modellprädiktiver Regelung wurden in mehrere Teilschritte implementiert: Im ersten Schritt der Entwicklung wurde ein prototypisches Energieflussmodell entworfen, welches in Abbildung 25 dargestellt ist. Wie auch im Demonstrationsgebäude beinhaltet es zwei getrennte Photovoltaik-Anlagen zur regenerativen Erzeugung. Der Batteriespeicher mit Blei-Säure-Zellen wird DC-seitig an die PV-Anlage 1 und der mit Lithium-Zellen an die PV-Anlage 2 angeschlossen. Die Integration des E-Autos erfolgte im DC-Strang der Photovoltaik-Anlage als zusätzlicher Energiespeicher. Da der bereits im Demonstrationsgebäude verbaute Wechselrichter – wie alle marktüblichen PV-Wechselrichter – nur die unidirektionale Umwandlung von DC zu AC erlaubt, wurde außerdem auch der Lithium-Batteriespeicher in dasselbe DC-Netz eingebunden, damit das E-Auto auch dann geladen werden kann, wenn die PV-Anlage keine Energie bereitstellen kann. Beide PV-Anlagen speisen jeweils über einen Wechselrichter in das Hausnetz ein, so dass die erzeugte Energie direkt im Haus zur Verfügung steht und der Überschuss ins Stromnetz eingespeist werden kann. Im zweiten Schritt wurden dann die einzelnen Komponenten des Energieflussmodells mit entsprechenden realistischen Parametern versehen und in die MPC-Prädiktion eingearbeitet. Für die Erzeugung der PV-Anlagen und den Haushaltsverbrauch werden zunächst historische Daten aus einem anderen Forschungsprojekt genutzt, in einer späteren Phase aber auch die durch die installierte Messtechnik im Demonstrationsgebäude (siehe auch AP 1.2 und AP 4.3) gewonnenen Daten. Die Batteriespeicher werden für die Zwecke des Energiemanagements als lineare Energiespeicher mit verlustbehafteten Zu- und Abflüssen modelliert. Die Wechselrichter lassen sich als verlustbehaftete Wandlerglieder von DC nach AC beschreiben und das Stromnetz stellt die Einhaltung der Energiebilanz sowohl bei Überschuss als auch Mangel an regenerativ erzeugter Energie sicher. Aus modellierungstechnischer Sicht lässt sich ein E-Auto sehr ähnlich zu einem Batteriespeicher bezüglich seiner Lade- und Entladedynamik beschreiben, wobei zusätzliche Restriktionen auf Grund der eingeschränkten Verfügbarkeit und Mobilitätsanforderungen einbezogen werden müssen. Dabei wurden die zur Erfassung notwendigen Parameter wie Abfahrtszeit und gewünschter minimaler Ladezustand, sowie erwartete Wiederankunftszeit und Ladezustand bei Ankunft als externe Parameter in das Optimierungsproblem integriert. Diese können

somit durch den Nutzer angegeben oder auch aus statistischen Mobilitätsdaten geschätzt werden. Als Optimierungsziel wurde eine Minimierung der Energiekosten als Differenz von Bezugskosten zu Einspeisevergütung mit derzeit üblichen Preisen von rund 40 ct / kWh bzw. 7 ct / kWh gewählt.

Das gesamte Energiemanagement inklusive Energieflussmodell wurde in Matlab mit Hilfe der open-source symbolischen Optimierungstoolbox „CasADi“ implementiert und in eine Simulation des gesamten prototypischen Systems eingebettet. Ein Vorteil der Verwendung von „CasADi“ ist, dass die in Matlab entwickelten Algorithmen mit Hilfe der Matlab-internen Code-Generierung in C-Code übersetzt werden können, um diese später auf der Echtzeit-Hardware ausführen zu können. Die Realisierung des MPC-basierten EMS im Demonstrationsgebäude erfolgte dann auf einem Industrie-PC, welcher die Optimierungsalgorithmen unter Einbeziehung realer Echtzeitmessungen im Gebäude sowie fortlaufender Erzeugungs- und Verbrauchsprognose ausführt.

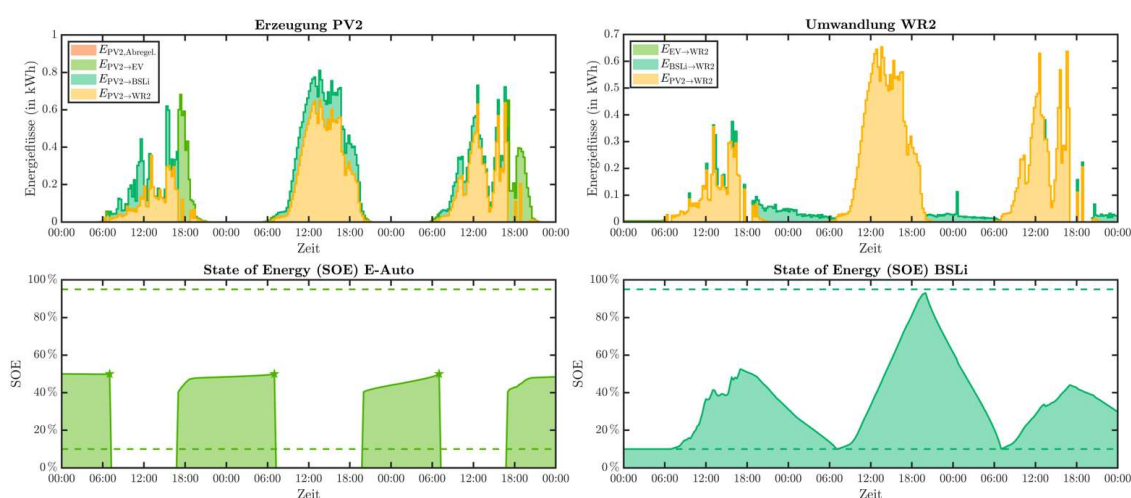


Abbildung 26: Simulationsergebnisse des Energiemanagementsystems für das elektrische Teilsystem inklusive E-Auto

Zur Validierung wurde das MPC-basierte Energiemanagementsystem EMS zunächst nur für das elektrische System betrachtet und simulativ untersucht. Die Ergebnisse einer typischen Simulation des Energiemanagements für das gesamte elektrische Teilsystem inklusive E-Auto sind in Abbildung 26 dargestellt. Zur besseren Übersicht werden nur die Energieflüsse im DC-Netz gezeigt. Die Simulation umfasst drei Tage mit unterschiedlichen Wetterbedingungen. Anhand der Erzeugung der PV-Anlage oben links wird deutlich, dass der erste und dritte Tag sehr bewölkt sind, wohingegen der zweite Tag morgens klar und ab mittags leicht bewölkt ist. In diesem Simulationsszenario fährt das E-Auto jeden Morgen um 7:00 Uhr ab. Bei der Wiederankunft um 17:00 Uhr am ersten Tag ist der Akkustand um 4,8 kWh niedriger als bei Abfahrt. Dies entspricht einer zurückgelegten Strecke von 30 km – laut Mobilitätstatistik ist das die durchschnittliche tägliche Fahrstrecke eines Autos an einem Werktag. Das E-Auto wird bereits direkt nach der Ankunft mit der verfügbaren PV-Energie aufgeladen, so dass es am folgenden Tag erneut mit 50 % Akkustand bereit zur Abfahrt ist. Am zweiten Tag hingegen kommt das Auto erst um 20:00 Uhr zurück. Daher ist es nicht mehr möglich, das Auto nur mit der verfügbaren PV-Energie bis zur Abfahrt am nächsten Morgen zu laden. Damit bis dorthin dennoch der gewünschte Akkuzustand erreicht wird, lädt das E-Auto über Nacht mit Energie aus dem Batteriespeicher. Wie unten rechts zu sehen ist, wurde dieser über den Tag fast komplett vollgeladen, damit später ausreichend Energie zum Laden des E-Autos zur Verfügung steht. Dieses Verhalten unterstreicht den prädiktiven Charakter des Energiemanagementsystems mittels

MPC. Am dritten Tag kommt das E-Auto wieder um 17:00 Uhr zurück und kann mittels PV-Energie geladen werden. Dementsprechend wird der Batteriespeicher über den Tag auch weniger geladen.

Für die Erweiterung des Energiemanagements um thermische Energieflüsse wurden zunächst Prädiktionsmodelle für die Wärmepumpe und den Pufferspeicher als Komponenten der thermischen Energieerzeugung und -speicherung entwickelt und mit Hilfe der aus AP 1.1 verfügbaren Simulationsergebnisse validiert. Die Wärmepumpe stellt als Wärmeerzeuger einerseits und elektrischer Verbraucher andererseits eine Kopplung der thermischen und elektrischen Energieflüsse im Gebäude dar. Sowohl die thermische Heizleistung als auch der elektrische Leistungsbedarf der Wärmepumpe hängen dabei von den Betriebsbedingungen, insbesondere dem Temperaturniveau der Wärmequelle – in unserem Anwendungsfall der Außenluft – und der Vorlauftemperatur im hydraulischen Kreislauf, ab. Der Hersteller der im Demonstrationsgebäude verbauten Wärmepumpe stellt dazu Informationen in Form von Leistungskurven im technischen Datenblatt zur Verfügung. Das Diagramm der Heizleistung in Abhängigkeit der Außentemperatur für verschiedene Vorlauftemperaturen ist in Abbildung 27 auf der linken Seite dargestellt. Diese Informationen wurden genutzt, um sowohl für die thermische Heizleistung als auch den elektrischen Leistungsbedarf mit Hilfe eines Least-Square-Fits jeweils Polynome dritter Ordnung als Funktion der Außen- und der Vorlauftemperatur zu bestimmen. Dabei wurde bewusst die dritte Ordnung in der Außentemperaturabhängigkeit miteinbezogen, um die Krümmung der Kurven im Bereich zwischen 5 °C und 10 °C besser approximieren zu können als mit in der Literatur üblichen Ansätzen zweiter Ordnung. Diese Temperaturbereiche sind in der Übergangszeit der Heizperiode von Bedeutung.

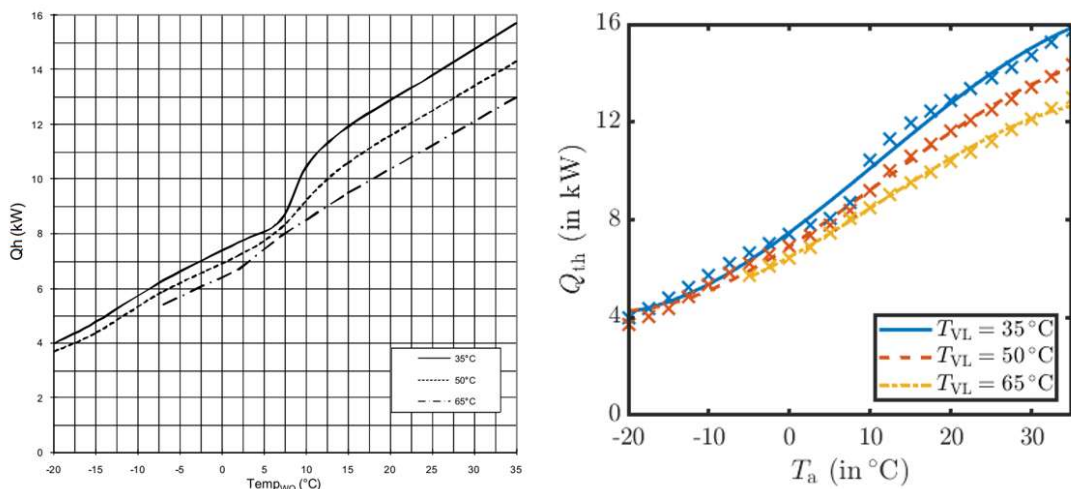


Abbildung 27: Thermische Heizleistung der Wärmepumpe für verschiedene Betriebsbedingungen (links Diagramm aus Datenblatt, rechts Polynomfit & Stützstellen (x))

$$E_{PS}(k+1) = E_{PS}(k) - k_V (E_{PS}(k) - E_{V,0}) + Q_{th}(k)\Delta t - E_{FeW_0}(k)$$

Der Pufferspeicher ermöglicht als Energiespeicher eine zeitliche Entkopplung der Wärmeerzeugung durch die Wärmepumpe und der Wärmenutzung in den Ferienwohnungen. Ähnlich wie im Fall des Batteriespeichers im elektrischen Teilsystem wurde das Modell des Pufferspeichers rein basierend auf einer Energiebeschreibung entwickelt. Dabei stellt der erste Term die Erhaltung der eingespeicherten Energie und der zweite die Transmissionsverluste an die Umgebung des Pufferspeichers dar. Die Zufuhr an Heizwärme durch die Wärmepumpe wird mit dem dritten Term abgebildet und der Entzug zur Beheizung der Ferienwohnungen mit dem letzten Term. Der Vorteil

einer reinen Energiemodellierung gegenüber einer Abbildung mittels Temperaturen und Massenströmen liegt in der konzentrierten Natur sowie den linearen Beziehungen auf dieser Beschreibungsebene, was die Komplexität des Modells gering hält. Um zu überprüfen, ob das vorgeschlagene Modell tatsächlich für Prädiktionen des zukünftigen Systemverhaltens geeignet ist, wurde dieses den Simulationsergebnissen aus AP 1.1 gegenübergestellt. Wie im oberen Teil von Abbildung 28 dargestellt, wird der Zustand des Pufferspeichers im TRNSYS-Simulationsmodell über die Temperatur in drei verschiedenen Höhen im Speicher abgebildet. Um diese mit dem vorgeschlagenen Modell vergleichen zu können, wird daraus die im Pufferspeicher vorhandene Energie berechnet, unter der vereinfachenden Annahme, dass diese Temperaturen jeweils die Durchschnittstemperatur für die jeweilige Schicht darstellen. Daraus ergibt sich die blaue Referenzkurve im unteren Diagramm der Abbildung. Diese wird nun dem Ergebnis des vorgeschlagenen Energiemodells gegenübergestellt, wobei die gleiche Energie im Anfangszustand gewählt wird. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung. Dies gilt auch für Zeitintervalle, in welchen der Pufferspeicher eine deutliche Temperaturschichtung aufweist. In diesen Bereichen scheint das Energiemodell den Energieinhalt des Speichers geringfügig höher einzuschätzen. Dennoch zeigt sich eine sehr gute Eignung des Modells für eine Prädiktion des Systemverhaltens im Maßstab von 24 Stunden.

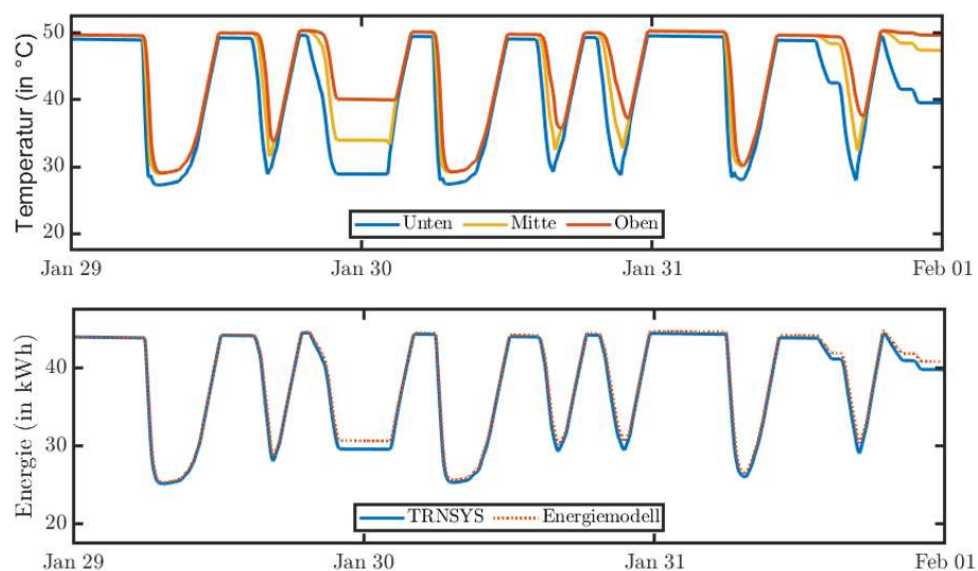


Abbildung 28: Simulationsergebnisse für den Pufferspeicher (TRNSYS-Ergebnisse oben & Vergleich mit Energiemodell unten)

Die Komponentenmodelle für die Wärmepumpe und den Pufferspeicher wurden gemeinsam mit dem Heizwärmebedarf der Ferienwohnungen aus der TRNSYS-Simulation als thermisches Teilmodell in das Energiemanagement integriert. Dabei ist lediglich die Wärmepumpe ein steuerbares Element, da keine direkten Eingriffe in die Beheizung der Ferienwohnungen vorgenommen werden, was nur mit erheblichem technischem Ertüchtigungsaufwand realisierbar wäre. Da die Wärmepumpe lediglich ein- und ausgeschaltet werden kann, handelt es sich um ein so genanntes mixed-integer Optimierungsproblem, so dass nun eine deutlich erhöhte Komplexität des Optimierungsproblems vorliegt. Dabei stellt die numerische Lösung dieses komplexen Problems in Echtzeit eine besondere Herausforderung dar, welche speziell dafür geeignete Lösungsalgorithmen erfordert. Für eine approximative Lösung wird das Optimierungsproblem zunächst als ein kontinuierliches MPC gelöst

und anschließend eine Schaltstrategie der Wärmepumpe im Sinne einer Pulsweitenmodulation unter Einhaltung der Mindestein- bzw. -ausschaltzeiten im Steuerungs-PC realisiert. Weitere Einschränkungen in den tatsächlichen Demonstrationen werden später noch unter AP 4 beschrieben.

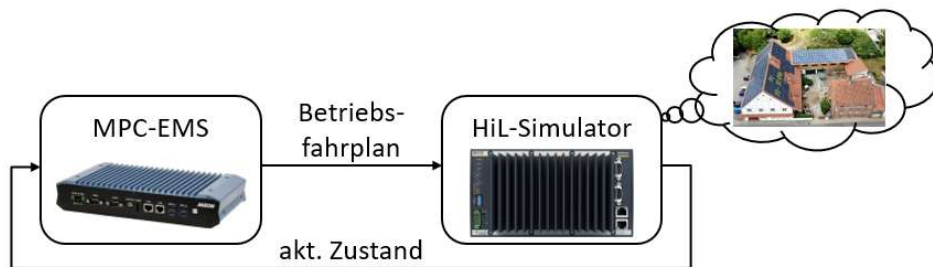


Abbildung 29: Schematischer Aufbau des Hardware-in-the-Loop-Systems

Das entwickelte Energiemanagementsystem wurde schließlich noch in einem Hardware-in-the-Loop-System (HiL-System) unter möglichst realitätsnahen Bedingungen erprobt, um eine optimale Vorbereitung der Demonstration zu gewährleisten. Der schematische Aufbau ist in Abbildung 29 dargestellt. Es besteht aus der Regelungseinheit, welche das Energiemanagementsystem betreibt, und dem so genannten HiL-Simulator. Dieser bildet das energetische Verhalten des Demonstrationsgebäudes simulativ nach und ersetzt damit das reale System im dargestellten Regelungskreis. Der Vorteil einer HiL-Erprobung liegt in der besonders hohen Realitätsnähe, da das gesamte Regelungssystem inklusive der Kommunikation über Modbus auf eine korrekte Funktionsweise getestet werden kann. Dies ist bei einer rein simulativen Erprobung, wo das Energiemanagement und das Systemverhalten auf derselben Hardware berechnet werden, nicht möglich. Trotz der hohen Nähe zum realen Verhalten, wird bei der HiL-Erprobung eine mögliche Gefährdung der realen Systemkomponenten bei Fehlfunktion der Regelung ausgeschlossen. Zusammengefasst ermöglicht die HiL-Erprobung ein realitätsnahes Testen des Energiemanagementsystems bereits in frühen Entwicklungsstadien und stellt gleichzeitig eine Validierung der korrekten Funktionsweise beim Übergang von einer rein simulativen Erprobung hin zur Anwendung im realen Demonstrationsgebäude dar. Für einen Aufbau des HiL-Systems im Labor wurde ein Desktoprechner als Hardware für das Energiemanagement – da der als Steuerrechner vorgesehene Industrie-PC bereits im Demonstrationsgebäude zur dauerhaften Messdatenakquisition in Betrieb ist – und eine SPS-Steuerung der Firma Bachmann als HiL-Simulator verwendet. Die bereits entwickelten Simulationsmodelle des energetischen Systemverhaltens wurden entsprechend angepasst, um diese auf der SPS simulieren zu können. Die Kommunikation erfolgt – wie im späteren Realbetrieb – über eine Modbus-TCP-Verbindung. Alle verwendeten Messdaten stammen aus den tatsächlichem Messbetrieb im Demonstrationsgebäude, ebenso wie die Prognosedaten. In Abbildung 30 sind beispielhaft die Ergebnisse einer HiL-Simulation für das elektrische Teilsystem dargestellt (da die dazu passenden thermischen Daten wegen der zeitweise Nichtverfügbarkeit nicht nutzbar waren, wurden hierzu nur Daten des elektrischen Verbrauchs verwendet). Grundsätzlich wurde hiermit die Funktionsfähigkeit des EMS bestätigt, da auch weitere Varianten der HiL-Simulation durchgehend erfolgreich funktioniert haben. Mit diesen verifizierten Laborergebnissen gilt das Unterarbeitspaket AP 1.3 als erfolgreich abgeschlossen.

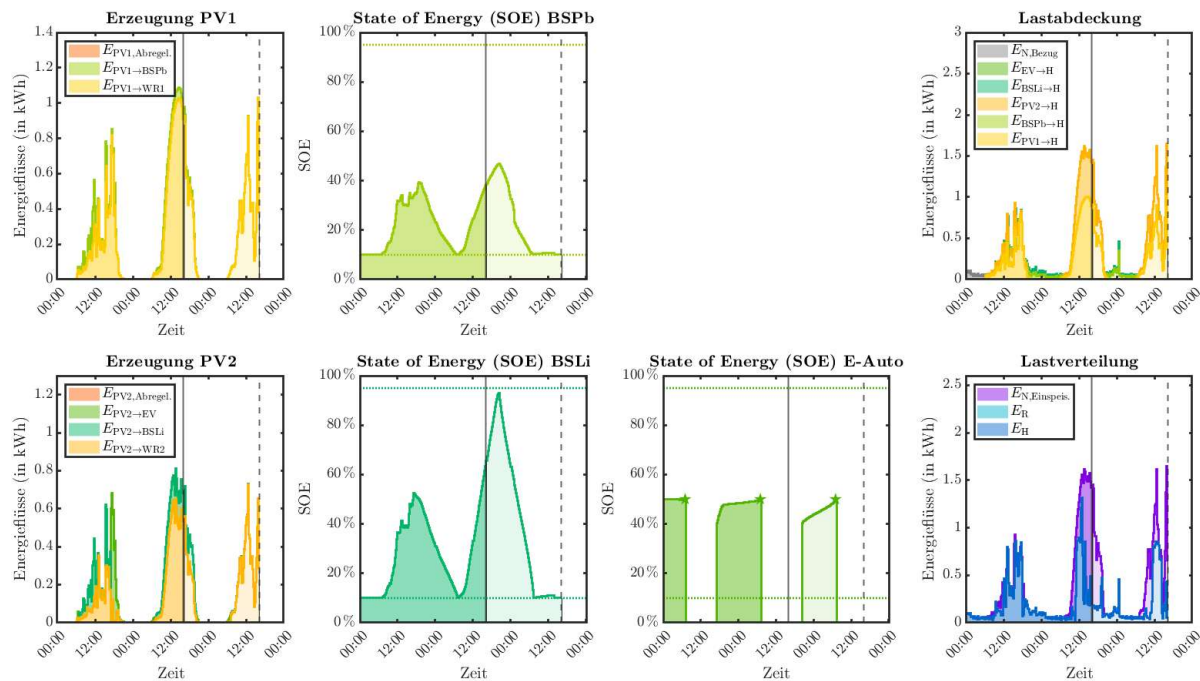


Abbildung 30: HiL-Simulationsergebnisse für elektrisches Teilsystem

2.2 AP 2: Betriebswirtschaftlich-projektplanerische Untersuchungen

Zielsetzung AP 2:

AP 2 beinhaltet vor allem Arbeiten zur betriebswirtschaftlichen und projektplanerischen Analyse sowie zur Implementierung von Betreiberkonzepten. Es ist einerseits eine wichtige Vorbereitung für das AP 4 (Demonstration) und liefert andererseits auch Grundlagen für spätere Verwertungen.

2.2.1 AP 2.1 Betriebs- und Geschäftsmodelle

Beitrag von IG-CP

Ein zu erreichender Meilenstein in AP 2.1 war die Erarbeitung eines Summen-/Mieterstrommodells bzw. eines Betriebs- und Abrechnungsmodells für das Energiemanagementsystem inkl. Verifizierung und rechtlicher Absicherung.

Ein Summenstrommodell ermöglicht es, im 15-minütigen Intervall abzurechnen, welcher Haushalt welche Anteile an PV-Strom, Speicherenergie oder Netzstrom zu welchem Zeitpunkt verbraucht hat. Die Gleichzeitigkeit der Abrechnung ist essentiell wichtig, um die Marktliberalität zu wahren. Dadurch wird es ermöglicht, den Anteil des PV-Stroms von der Wärmeversorgung und vom Allgemeinstrom abzugrenzen.

Die Grundvoraussetzung für ein Summenstrommodell ist ein sogenanntes Smart Meter. Die intelligenten Messsysteme mit Smart-Meter-Gateway sind laut Gesetz zum Neustart der Digitalisierung der Energiewende (GNDEW) ab 2028 verpflichtend vom Messstellenbetreiber (Energieversorgungsunternehmen) zu installieren. Ab 2025 ist der Einbau von intelligenten Messsystemen verpflichtend für Haushalte mit einem Jahresstromverbrauch von mehr als

6.000 kWh/a oder einer installierten PV-Leistung von mehr als 7 kWp. Hierzu muss der zuständige Messstellenbetreiber Summenzähler bereitstellen. Der Messstellenbetreiber und Energieversorger im Forschungsobjekt sind die Stadtwerke Kaiserslautern (SWK). Dem vorzeitigen Einbau eines Smart Meter ab 2025 stand die Problematik gegenüber, dass die SWK und andere Messstellenbetreiber aufgrund fehlender Lieferanten diese Messeinrichtungen nicht zur Verfügung stellen konnten. Für diese Lieferproblematik schafft das GNDew mit § 20 Abs. 1d Satz 2 Abhilfe. Dieser stellt klar, dass auch durch einen virtuellen Summenzähler rechnerisch ermittelte Summenmesswerte denen eines Summenzählers gleichgestellt sind, wenn alle Messeinrichtungen, deren Werte in die Saldierung eingehen, mit intelligenten Messsystemen ausgestattet sind. Unter dieser Voraussetzung wurden die folgenden Summenstrommodelle für das Referenz-Demonstrationsobjekt und das Forschungsobjekt erarbeitet, siehe folgende Abbildungen.

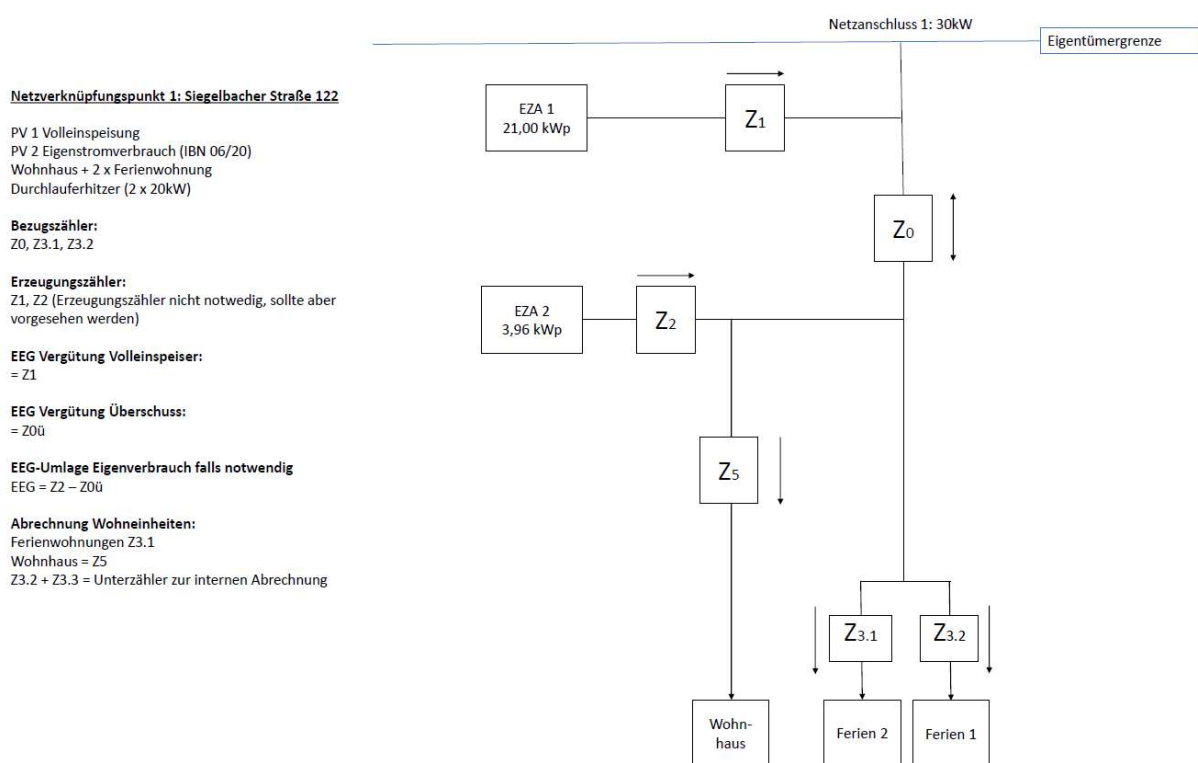


Abbildung 31: Summenstrommodell Demonstrationsobjekt Referenz

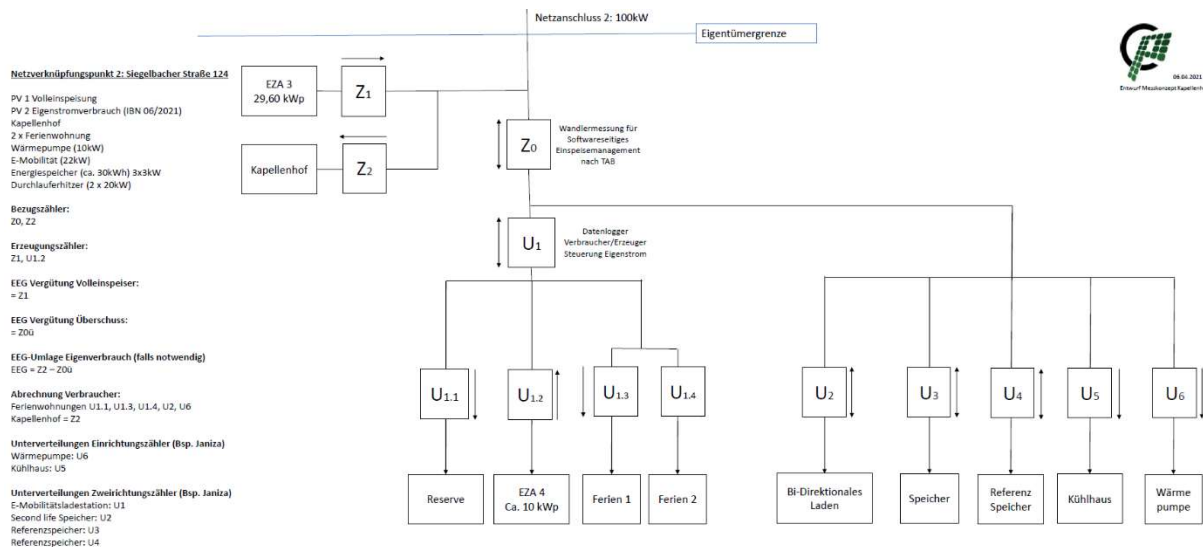


Abbildung 32: Summenstrommodell Forschungsobjekt

Da die Messwerte aus dem Betrieb der Zähleinrichtungen des Messstellenbetreibers auch dem Forschungsprojekt zur Verfügung stehen, sollen diese über eine optische Schnittstelle abgegriffen werden. Da eine optische Schnittstelle keine Kommunikation mit dem Zähler des EVU aufnehmen kann, kollidiert diese nicht mit deren strengen Datenschutzbestimmungen und kann dementsprechend eingesetzt werden. Dennoch sind, um den Datenabgriff rechtlich sauber zu gestalten, folgende Vereinbarungen zwischen dem Messstellenbetreiber (EVU) und der Forschungsgemeinschaft zu treffen: Vertraulichkeitsvereinbarung, Datenschutzerklärung, Auftragsdatenverarbeitung, Kooperationsvereinbarung.

Die Implementierung dieses Modells stellte im Projekt nicht nur eine technische, sondern auch eine organisatorische Herausforderung dar. Es ist jedoch von entscheidender Bedeutung, um eine faire und transparente Abrechnung des Stromverbrauchs zu gewährleisten und die Integration erneuerbarer Energien in das Energiemanagement der Haushalte zu fördern. Das erarbeitete Messkonzept wurde vom lokalen Energieversorgungsunternehmen anerkannt.

Der Meilenstein, das Summenstrom-/Mieterstrommodell für das Energiemanagementsystem zu erarbeiten, zu verifizieren und rechtlich abzusichern, wurde hiermit erreicht. Allerdings konnte die Analyse der Wechselwirkung zwischen Nutzer und Energiemanagementsystem nicht erfolgen, da der Demonstrator nicht ausreichend im Betrieb war.

2.2.2 AP 2.2 Prozessanalyse für Planung und Projektierung

Beitrag von Immobilien Kafitz

Um vorab den Bedarf und das Potenzial eines solchen Energiemanagements einzuschätzen, wurde bei der Befragung der Weingüter ebenfalls die Lage, der energetische Bedarf und damit verbunden die Zufriedenheit der Energieversorgung abgefragt.

Zu Beginn wurde eine Kostenermittlung des Demonstrationsobjekts erstellt. Diese ergab eine Investition an Materialkosten in Höhe von 53.250 €. Darin beinhaltet sind die PV-Anlage, die Wärmepumpe und die steuerbaren Verbraucher, sprich Fußbodenheizung in den Wohnungen.

Die Immobilienseitige Betrachtung ist für die Wirtschaftlichkeit von großer Bedeutung, deshalb wurde der Marktwert der Immobilie ohne ein EMS vorab ermittelt. Hierzu wurde die Rechnung anhand des Sachwertverfahrens und des Ertragswertverfahrens durchgeführt und anschließend der Mittelwert als Marktwert festgelegt. Das Ergebnis ist ein Wert in Höhe von 2.500.000 €.

Die folgende Tabelle verdeutlicht das Sachwertverfahren:

Tabelle 5: Marktwert-Einschätzung des Immobilie - sachwertorientiert

1. Marktwert-Einschätzung - sachwertorientiert				
Neubauwert				
Hauptgebäude				3.902.885 €
Nebengebäude (ohne Garagen/Stellplätze)				0 €
Garagen/Stellplätze				16.554 €
Neubauwert (gesamt)				3.919.439 €
Zeitwert der baulichen Anlagen				3.057.129 €
+Außenanlagen			5,00 %	152.856 €
Zeitwert bauliche Anlagen und Außenanlagen				3.209.985 €
+Bodenwert				385.540 €
vorläufiger Sachwert				3.595.525 €
besondere objektspezifische Grundstücksmerkmale				
+ objektspezifische Nebengebäude/Stellplätze				0 €
Sachwert (im Volleigentum)				3.595.525 €
Marktwert auf Basis Sachwertermittlung				3.595.525 €

Nachfolgend wird auch die ertragswertorientierte Berechnung dargestellt:

Tabelle 6: Markwert-Einschätzung des Immobilie - ertragswertorientiert

9 Marktwert-Einschätzung - ertragswertorientiert

Jahresrohertrag		75.900 €
- Bewirtschaftungskosten	-16,33 %	-12.397 €
Jahresreinertrag		63.503 €
- Bodenwertverzinsungsbetrag		-15.962 €
Gebäudereinertrag		47.541 €
x gewichteter Barwertfaktor	20,7450	
Ertragswert der baulichen Anlagen		986.238 €
+ Bodenwert		385.540 €
vorläufiger Ertragswert		1.371.778 €
besondere objektspezifische Grundstücksmerkmale		
+ sonstige Wertzuschläge		
PV-Anlage		40.000 €
Ertragswert (im Volleigentum)		1.411.778 €
Marktwert auf Basis Ertragswertermittlung		1.411.778 €

Ein Mieterstrommodell wurde analysiert, jedoch nicht für den Kapellenhof ausgearbeitet oder rechtlich geprüft durch eine Anwaltskanzlei, da es zu dieser Thematik noch keine verlässlichen Rechtsprechungen bzw. Musterprozesse gibt und sich die Gesetzeslage in diesem Bereich häufig ändert. Diese beantragten Kosten wurden somit nicht beansprucht. Trotzdem wurde hierzu ein beispielhafter Stromliefervertrag des Bundesverbands Solarwirtschaft e.V. analysiert, denn Mieterstrom muss vertraglich festgehalten werden. Eine Kopplung an einen Mietvertrag ist rechtlich nicht möglich, jedoch nur im Falle einer Langzeitvermietung. Ferienwohnungen, welche einen befristeten Gebrauch vorweisen, können eine Kopplung zwischen Stromliefervertrag und Mietvertrag enthalten. Außerdem ist seit dem EEG 2023 Mieterstrom von Umlagen befreit. Zur detaillierteren Betrachtung wurde folgendes Modell genutzt.

Grundmodell: Mieterstromlieferung des Anlagenbetreibers

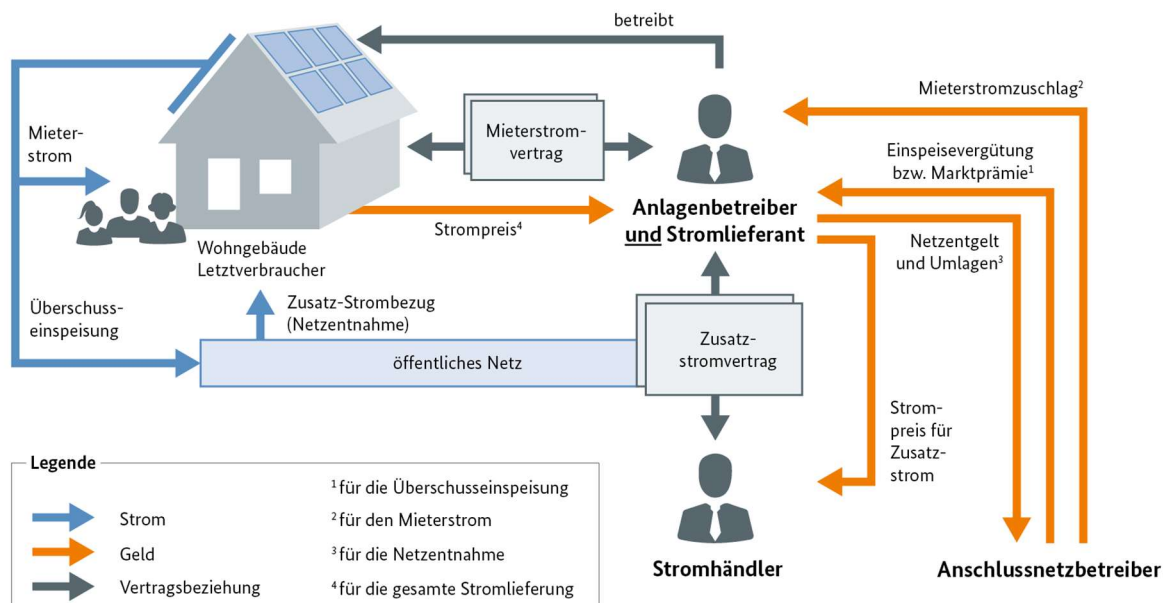


Abbildung 33: Grundmodell Mieterstrom

Quelle:

<https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/ElektrizitaetundGas/ErneuerbareEnergien/EEGAufsicht/Mieterstrom/start.html>

Ein Modell zur Bewertung der Übertragbarkeit auf andere Standorte wurde angefertigt. Dabei gibt es viele Variablen, welche das Potenzial des Objekts zeigen. Der Nutzer gibt die gefragten Variablen ein, wie z.B. die Dachfläche je nach Ausrichtung und das Modell errechnet weitere Variablen, die sich dadurch ergeben, beispielweise die Kosten für eine PV-Anlage. Der Nutzer sieht am Ende eine Gegenüberstellung der Kosten und Erträge ohne PV-Anlage, eine weitere Gegenüberstellung mit PV-Anlage ohne einen Batteriespeicher, eine weitere für das RBC-EMS und die letzte Darstellung für das MPC-EMS. Das Wirtschaftlichkeitsmodell für verschiedene Standorte wurde für ein fiktives Objekt genutzt. Hier ergab die Nutzung mit MPC-EMS die beste Rendite, jedoch kann das Ergebnis, je nach Variablen der Weinbauern, variieren. Den größten Unterschied der Rendite bewirkt die Eigenverbrauchsquote. Diese liegt mit MPC-EMS bei ca. 70 %, mit RBC-EMS (einem kommerziellen EMS mit PV-Anlage und Energiespeicher, allerdings ohne modellprädiktive Regelung) bei ca. 50 % und nur mit PV-Anlage ohne Batterie bei ca. 35 %. Dabei wird die Verwendung der erzeugten Energie beim RBC-EMS durch den Nutzer festgelegt und erfolgt meist im gleichen Muster, wodurch sich das System nicht an die Gegebenheiten anpasst. Eine weitere Änderung zwischen den Modellen sind die Kosten für die künstliche Intelligenz. Bei der Erstellung des Wirtschaftlichkeitsmodells haben die Firmen DaLi Solarpower und Immobilien Kafitz eng zusammengearbeitet, da die Auswertung der PV-Daten eine große Rolle spielt und DaLi als Experte somit helfen konnte. Dadurch gab es für Immobilien Kafitz geringere Personalkosten in AP 2.1 und für DaLi höhere.

Folgend zur Veranschaulichung die Berechnung mit MPC-EMS:

Berechnung möglicher Aspekte der Standortwahl zugunsten des ländlichen Raums									
Geeignete Dachfläche		500	qm	Süd	400	Ost/West	100		
					100%		85%		
Freiland		2000	qm	0,10 €	Vergütung Land (€/KWh)				
Stromertrag gesamt vom Dach (in KWh)		87.300	KWh/Jahr				900	KWh/KWp	a. Standort
Stromertrag vom Land (in KWh) Fläche		216.000	KWh/Jahr		60%	Flächenbelegung			
Vergütung bei > 100 KWp		0,10 €		30.330 €	Stromertrag bei KWp größer 100 KWp				
Vergütung bei < 100 KWp		0,07 €			Stromertrag bei KWp größer 100 KWp				
Stromverbräuche				Nacht in %	in KWh	Tag in %	in KWh		
	Wohnen	5.000	KWh	50%	2.500	50%	2.500		
	Gastronomie	15.000	KWh	60%	9.000	40%	6.000		
	Gewerbe	15.000	KWh	20%	3.000	80%	12.000		
	Hotellerie	20.000	KWh	40%	8.000	60%	12.000		
	Landwirtschaft	8.000	KWh	20%	1.600	80%	6.400		
					24.100	Nacht	38.900	Tag	
Durchschnittlicher Stromverbrauch		63.000	KWh						
Strompreis		0,30 €	netto/kwh						
Windturbine in KW	15	800	KWh/KW/Jahr		12.000	KWh/Jahr			
Investitionssumme Solar Dach	qm Dach x 0,2 (KWp/qm)	100	KWp		1.200 €	KWp Preis	120.000 €	Dach	
Investitionssumme Solar Land	qm Land x 60% x 0,2 (KWp/qm)	240	KWp		900 €	KWp Preis	216.000 €	Land	
Investitionssumme Wind	15	KW	1500	€/Kwp	800	KWh/KWp/ Jahr	22.500 €	Wind	
Investitionssumme Sensorik und EMS			6696,27	€	ohne die Prototypen für das DC-Netz von Pedro				
Investitionssumme Batterie	200	€/KWh	30	KWh			6.000 €	Batterie	
							364.500 €		
Optimale Batteriegröße (bester ROI)	30	KWh	max. 1,5kWh je 1kW PV-Leistung			Quelle: HTW Berlin			
			allerdings max. 1,5 kWh je 1000kWh/a Stromverbrauch						
Ertrag der Investition	Solar	8.169 €	KWh x KWh Preis x Eigenverbrauchsant.				70%	EV Anteil	
		3.501 €	KWh x EEG Vergütung Dach x Überschuß				30%		
			KWh x EEG Vergütung Land unter 100 KWp						
		21.600 €	KWh x EEG Vergütung Land über 100 KWp						
		33.270 €	Gesamt Solar						
	Wind	2.520 €	KWh x KWh Preis x Eigenverbrauchsant.				70%	EV Anteil	
		234	KWh x EEG Vergütung						
	Batterie	4.928 €	Kapazität x 365 Tage x 1,5 KWh/KWp/Tag (für die Nacht)						
	Ertrag Total	40.952 €							
Ertrag mit zeitvariablen Strompreisen		45.047 €							
	Kosten Total	364.500 €							
Kaufpreis Immobilie		600.000 €							
Kosten Energiekonzept		364.500 €							
Finanzierungsbedarf ohne Energiekonzept		600.000 €							
Zinssatz		4,5%	in %						
Finanzierungsbedarf mit Energiekonzept		964.500 €							
Zinssatz		4,5%	in %						
Zu erwartende Erträge ohne Energiekonzept		4%	in % vom Kaufpreis (Mieterlöse)				4,00%		
Einnahmen Miete, Pacht, etc.		24.000 €	pro Jahr						
Zu erwartende Erträge mit Energiekonzept		69.047 €					7,16%		
Erstes Jahr									
Erträge zum Kapitaldienst	mit E-Konzept	69.047 €							
Kosten Sensorik und EMS	MPC-EMS	6.696,27 €							
Kosten KI laufend		2.400,00 €							
Kosten KI einmalig		5.000 €							
Zins - Kapitaldienst		43.403 €							
Tilgung		11.547,88 €							
Folgejahre									
Erträge zum Kapitaldienst	mit E-Konzept	69.047 €							
Kosten KI laufend		2.400,00 €							
Zins - Kapitaldienst		43.403 €							
Tilgung		23.244,15 €							

Abbildung 34: Wirtschaftlichkeitsberechnung

Die gelben Felder sind zur Eingabe durch den Nutzer und der Rest wird automatisch errechnet.

Beitrag von IG-CP

Im Rahmen von AP 2.2 wurden Lastgänge verschiedener Weingüter, Restaurants und Hotels analysiert, um fundierte Szenarien und Betriebsmodelle zu entwickeln. Auf dieser Basis wurde ein gemittelter Standard-Lastgang für Mischnutzungen generiert. Zudem wurden die Lastgangmodelle stetig und sukzessive angepasst, beispielsweise durch detailliertere Lastganganalysen von Weingütern, Restaurants und der Hotellerie. Diese kontinuierlichen Anpassungen tragen dazu bei, die Modelle immer präziser und realistischer zu gestalten, um den spezifischen Anforderungen der verschiedenen Nutzungsarten gerecht zu werden. Zusätzlich wurden die Daten aus einem Referenzobjekt zur Entwicklung von Prognosemodellen bereitgestellt. Das Energiesystem des Referenzobjekts umfasst eine PV-Anlage mit einer Leistung von 20 kWp, eine Wärmepumpe mit 8 kW sowie einem zusätzlichen 12 kW Heizstab. Zur Speicherung der thermischen Energie wird ein thermischer Schichtspeicher mit einem Fassungsvermögen von 800 Litern verwendet. Zusätzlich gibt es einen wasserführenden Kamin mit einer Leistung von 12 kW, der 6 kW in Form von Konvektion und 6 kW über Wasser abgibt.

Diese Modelle werden zur Szenarienentwicklung verwendet und ermöglichen die Vorhersage von Wärmebedarf und -verlusten sowie des elektrischen Energiebedarfs in Abhängigkeit von der Außentemperatur. Zusätzlich werden die Speicherpotenziale und Mobilitätspotenziale untersucht, um umfassende und praxistaugliche Lösungen für Energiemanagementsysteme zu entwickeln.

Für die Analyse der Wechselwirkung zwischen Nutzer und Energiemanagement-System lagen seit April 2023 erste Daten aus dem Demonstrationsobjekt in Erfenbach vor. Die Datenintervalle waren mit einer Taktung von drei Sekunden sehr detailliert. Für den Abgleich der Simulationen und entwickelten Szenarien mit realen Daten ist eine Auflösung von 15-min. Intervallen angelehnt an die registrierende Leistungsmessung (RLM) der Energieversorger ausreichend. Leider waren die Daten nicht repräsentativ, da das Objekt nicht ausgelastet/richtig im Betrieb war. Es erfolgte die Erarbeitung von Konzeptvorgaben zur solaren Optimierung der Wärmepumpe, des Speichers, der E-Mobilitäts-Ladeinfrastruktur sowie der Verteilersysteme.

Es erfolgte die detaillierte Betrachtung und Optimierung der Prozesse, die bei der Planung und Projektierung von prädiktiven, regelungsbasierten Energiemanagementsystemen entstehen. Die Ergebnisse sollen als praxisorientierte Anleitung für zukünftige Projekte dienen und in verschiedenen Kontexten angewendet werden können.

Die Installation der Einzelkomponenten und deren Einbindung erwies sich als weitgehend unproblematisch. Herausforderungen traten vor allem in der Definition von Schnittstellen und der Optimierung des Gesamtsystems auf:

- Heizkurve: Nutzer- und objektabhängige Temperaturniveaus, die nicht einfach übertragbar sind.

- Fluktuierende Energieerzeugung durch PV und erneuerbare Energieträger: Funktioniert relativ gut, wenn die Anlagenkomponenten sinnvoll dimensioniert und aufeinander abgestimmt sind.
- Ladeverhalten der E-Mobilität: Abhängig von der Objektnutzung (Tages- und Nachtrhythmus).

Für andere Projekte lässt sich festhalten, dass praxisorientierte Leitfäden nur in begrenztem Umfang erstellt werden können. Besonders bei nutzer- und objektabhängigen Anforderungen, wie Temperaturniveaus und Ladeverhalten, sind maßgeschneiderte Lösungen notwendig, die sich durch „Standartlastprofile“ näherungsweise vorhersagen lassen. Die Komponenten der Energieerzeugung sollten optimal dimensioniert und aufeinander abgestimmt sein, um eine effiziente und zuverlässige Versorgung zu gewährleisten. Die klare Definition von Schnittstellen und eine kontinuierliche Optimierung des Gesamtsystems sind entscheidend, um die Integration reibungslos zu gestalten.

Die Ergebnisse zur Planung und Projektierung von regelungsbasiertem Energiemanagement und der Optimierung der Energiemanagement-Systeme basierend auf den Bedürfnissen der Nutzer wurden bereits auf über 20 Nichtwohn- sowie Wohnwirtschaftliche Projekte übertragen. Damit trägt das Projekt maßgeblich zur Weiterentwicklung und Implementierung effizienter und nachhaltiger Energiemanagementsysteme in der Region Rheinland-Pfalz bei.

2.3 AP 3: IKT-Komponenten

Zielsetzung AP 3:

In AP 3 geht es vor allem um die leistungselektronische, steuerungstechnische und kommunikationstechnische Ertüchtigung vorhandener Erzeuger, Speicher und Verbraucher für eine aktive Teilnahme am Energiemanagement. Insbesondere das auf dem Markt noch nicht verfügbare bidirektionale Ladegerät für die Demonstrationsanlage sowie das flexible Batteriemanagementsystem für den Second-Life-Batteriespeicher sind mit hohem Forschungs- und Entwicklungsaufwand verbunden. Damit liefert das AP 3 essentielle technische Voraussetzung für die Demonstration AP 4.

2.3.1 AP 3.1 Bidirektionales Laden (E-Auto)

Beitrag von RPTU/LRS

In diesem Unterarbeitspaket soll ein leistungselektronisches Ladegerät für bidirektionale Energieflüsse zwecks Lade-/Entladesteuerung für E-Autos entwickelt werden, da ein solches kommerzielles System zu Beginn des Projektes auf dem Markt nicht zur Verfügung stand. Je nach Prinzip variiert die Zellspannung eines elektrochemischen Energiespeichers mit dem Ladezustand. Daher ist ein elektrischer Wandler notwendig, um nach außen hin eine Schnittstelle mit einer definierten Spannung bereitstellen zu können. Vorgesehen ist die Integration des bidirektionalen Wandlers in das durch die Photovoltaik bereitgestellte DC-Netz mit einer Spannung von ca. 700 V. (s. Abbildung 35). Durch eine geeignete Regelung des Ladegerätes soll eine Spannungsanpassung auf beiden Seiten (zum Netz hin sowie zum E-Auto hin) gewährleistet werden. Aus Sicherheitsgründen

sollen die Quellenbezugspotentiale getrennt bleiben. Daher muss der entwickelte DC/DC-Wandler eine galvanische Trennung bereitstellen.

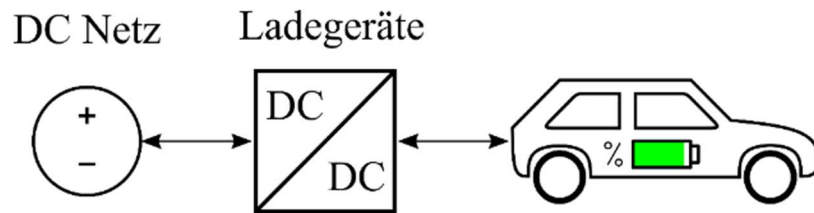


Abbildung 35: Bidirektionales Ladegerät (prinzipielle Darstellung)

Die Anforderungen an die Entwicklung entsprechen im Wesentlichen denen an klassische Ladegeräte. Aufgrund der vorhandenen PV-Anlage im Gebäude basierend auf einer wirtschaftlichen Komponentenauswahl muss mit einer DC-Netzspannung zwischen 600 V und 800 V gerechnet werden. Während der Sonnenstunden wird diese (durchaus veränderliche) Netzspannung von der PV-Ausgangsspannungsamplitude diktiert. Für die Spannung der Autobatterie wird das europäische CCS (Combined Charging System) Protocol herangezogen, welches eine Ausgangsspannung des Ladegeräts zwischen 200 V und 500 V erfordert. Als Leistungsvorgabe wird ein Nennleistungswert von max. 12 kW für die gesamte Spannungsbreite festgelegt.

Leistungselektronik-Topologie

Eine Topologie, die die beiden Eigenschaften bidirektionaler Energiefluss und galvanische Trennung sehr gut vereint, ist die Dual-Active-Bridge-Topologie (DAB). Diese Topologie wird auch wegen der geringen Zahl von benötigten Bauteilen als eine einfache und robuste Variante eingeschätzt. Wie in Abbildung 36 dargestellt, besteht sie aus zwei aktiv geschalteten Vollbrücken mit einem Mittelfrequenz-Transformator dazwischen.

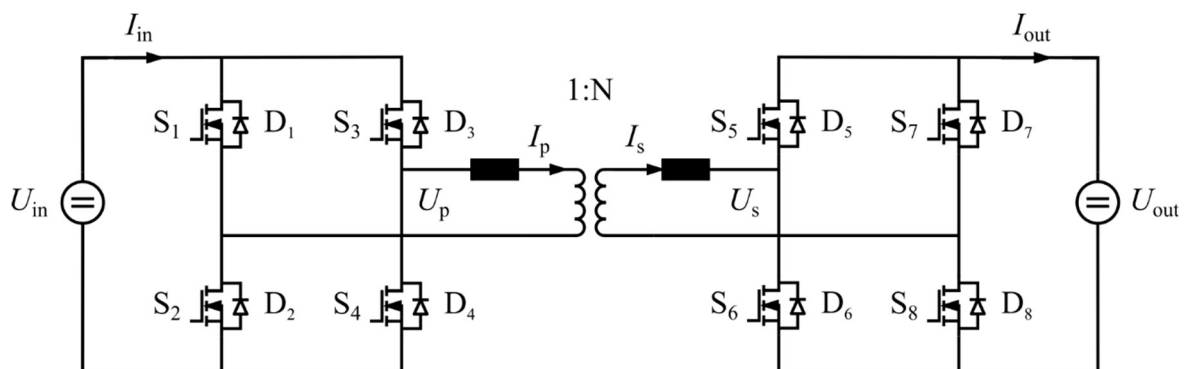


Abbildung 36: Dual-Active-Bridge-Topologie

Jede Vollbrücke besteht aus 4 steuerbaren Halbleitern (z.B. MOSFETs) und 4 passiven Dioden. Durch das Ansteuerungsverfahren wird die Gleichspannung (U_{in} oder U_{out}) in eine Wechselspannung umgewandelt (U_p oder U_s), mit derselben Frequenz wie der Schaltfrequenz der Halbleiter. Auf diese Weise dürfen jede DC-Quelle und Vollbrücke als eine steuerbare AC-Quelle modelliert werden. Der

Transformator legt zum einen das Übersetzungsverhältnis zwischen Primär- und Sekundärseite fest (1:N), zum anderen stellt er die galvanische Trennung sicher. Idealerweise kann der Transformator durch seine resultierende Streuinduktivität (L) sowie das Übersetzungsverhältnis modelliert werden. In Abbildung 37 wird das Funktionsprinzip des DAB-Wandlers dargestellt.

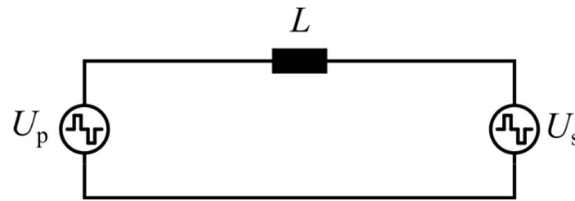


Abbildung 37: Äquivalentes Schaltbild zur Darstellung des DAB-Funktionsprinzips

Die Leistungsübertragung zwischen Primär- und Sekundärseite ist nicht nur abhängig von der Spannungsamplitude, sondern von der Phasenverschiebung (θ) zwischen den Spannungen U_p und U_s sowie der der Schaltfrequenz proportionalen Trafo-Impedanz (Z_{trafo}). Letztere ist ein Kernparameter beim Entwurf und erfordert einen Design-Kompromiss. Je höher die Schaltfrequenz (f_{sw}) (und damit geringer Bauraum bzw. Gewicht), desto höher die Leistungsdichte (L), aber auch desto höher die Schaltverluste. Die korrekte Auslegung und Fertigung des Transformators setzt also einiges an Knowhow und Erfahrung voraus, weswegen hierzu ein Unterauftrag an einen Transformator-Hersteller vorgesehen war. Grundsätzlich bietet die DAB-Topologie auch die Möglichkeit, ein Zero-Voltage-Switching (ZVS) zu realisieren, wodurch die Schaltverluste noch reduziert werden können. Für die übertragene Leistung gilt:

$$P = \frac{U_p U_s}{Z_{trafo}} \theta \left[1 - \frac{\theta}{\pi} \right] = \frac{U_p U_s}{2\pi f_{sw} L} \theta \left[1 - \frac{\theta}{\pi} \right]$$

Durch die Steuerung der Phasenverschiebung (θ) kann die Leistung entsprechend reguliert werden.

Leistungselektronik-Auslegung

Nach der Auswahl der Topologie ist die Schaltungsauslegung entsprechend den Anforderungen zu definieren. Dazu gehören im Fall der DAB-Topologie folgende Komponenten/Subsysteme:

- Gate Treiber
- Filterschaltungen
- Sensorik
- Vor- und Entladungsschaltungen
- Sicherheitsschaltung
- Regelung- und Steuerungsplattform

Zusammenfassend ist das Konzept für das Ladegerät mit allen zugehörigen Komponenten in Abbildung 38 dargestellt. In Tabelle 7 sind alle wichtigen Parameter des Konzepts aufgelistet.

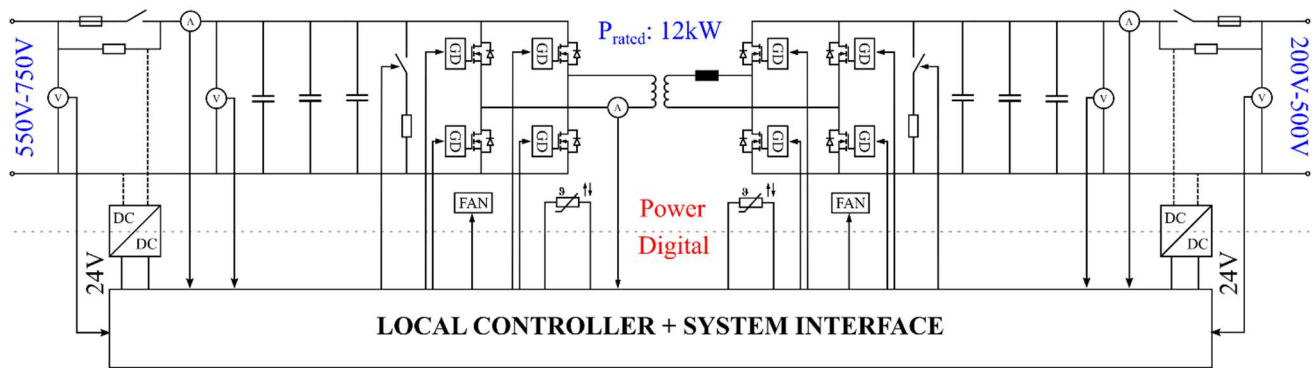


Abbildung 38: Konzeptionelle Auslegung des Ladegerätes (12 kW Nennleistung)

Tabelle 7: Auslegungsparameter des Ladegerätes

Nennleistung [kW]	12kW / 25 kW für Simulation	P_{rated}
Eingangsspannung [V]	600V bis 800V	U_{in}
Ausgangsspannung [V]	200V bis 500V	U_{out}
Übersetzungsverhältnis	1:2	N
Schaltfrequenz [kHz]	50kHz	f_{sw}
Streuinduktivität [uH]	22uH	L

Simulative Validierung des Konzeptes

Mit Hilfe der Simulationsplattform für leistungselektronische Systeme PLECS ist das zu entwickelnde Ladegerät im Detail modelliert und für verschiedene vorgesehene Betriebspunkte simuliert worden. Das aufgebaute Modell besteht nicht nur aus den Kernelementen, sondern berücksichtigt auch parasitäre Effekte sowie nichtlineare Sub-Modelle von unterschiedlichen Halbleitern am Markt. Damit bildet die Simulation die Grundlage für eine sichere Wahl der Komponenten.

In Abbildung 39 ist die Ladung eines E-Fahrzeugs simuliert. Die Kurven der elektrischen Größen (Transformator-Spannungen und -Ströme) im Wechselspannungszwischenkreis sind in den oberen zwei Graphen dargestellt. Die Spitzenleistung wird mit einem sehr hohen Wirkungsgrad (fast 99 %) erreicht. Eine zusätzliche Berechnung der Halbleitertemperaturen zeigt, dass diese von allen Halbleitern unter 59 °C bei der Nennleistungsübertragung bleiben. Damit wird das Konzept als validiert betrachtet.

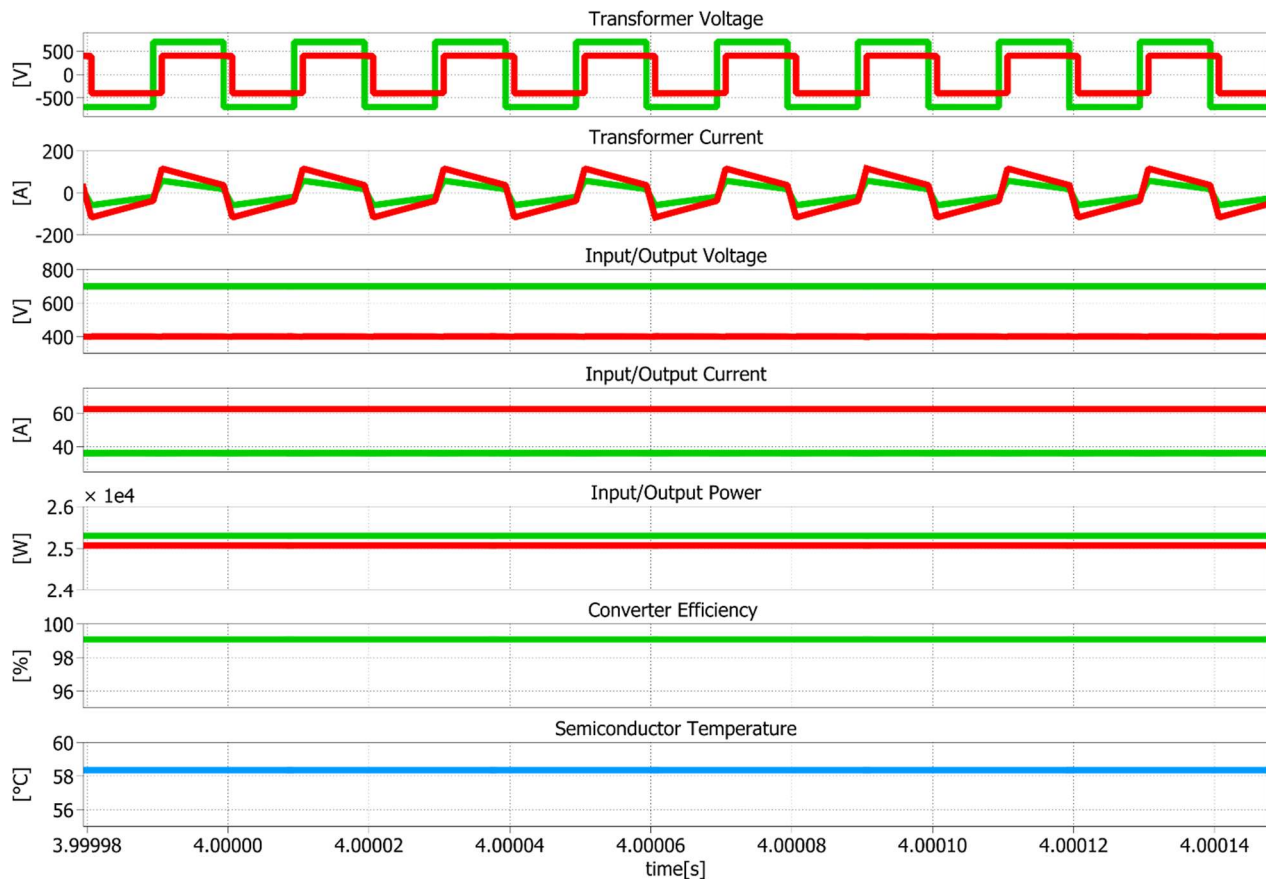


Abbildung 39: Simulationsergebnisse des DAB-Wandlers

Validierung des Konzeptes mittels eines leistungsskalierten Laborprototyps

Vor dem Bau des Ladegerätes in voller Leistung wird das Konzept noch mit einem in der Leistung herunter skalierten Laborprototyp überprüft. Gleichzeitig soll damit die Regelungsplattform erstellt, programmiert und getestet werden. Der Prototyp wird mit gleichem Konzept und angepassten Komponenten aufgebaut. Dafür wurde zunächst ein auf dem Markt verfügbarer Mittelfrequenz-Transformator ausgesucht und auf dessen Eigenschaften basierend andere Bauelemente dimensioniert. Die Spezifikationen des Prototyps sind in Tabelle 8 angegeben.

Tabelle 8: Spezifikation des Laborprototyps für das bidirektionale Ladegerät

Nennleistung [W]	500 W	P_{rated}
Eingangsspannung [V]	17 V bis 34 V	U_{in}
Ausgangsspannung [V]	34 V bis 46 V	U_{out}
Übersetzungsverhältnis	1:1,67	N

Schaltfrequenz [kHz]	100 kHz	f_{sw}
Streuinduktivität [μ H]	0.2 μ H	L

Für die Hardware-Realisierung wurden mit Hilfe des EDA-Programms Altium die Leiterplatten entwickelt. Der gesamte Prototyp besteht aus vier unterschiedlichen Platinen (s. Abbildung 40 und Abbildung 41):

- zwei Vollbrücken-Boards (1, 2)
- Gate-Treiber- und Signalverarbeitungs-Board (3)
- Regelung- und Steuerungsboard (4)

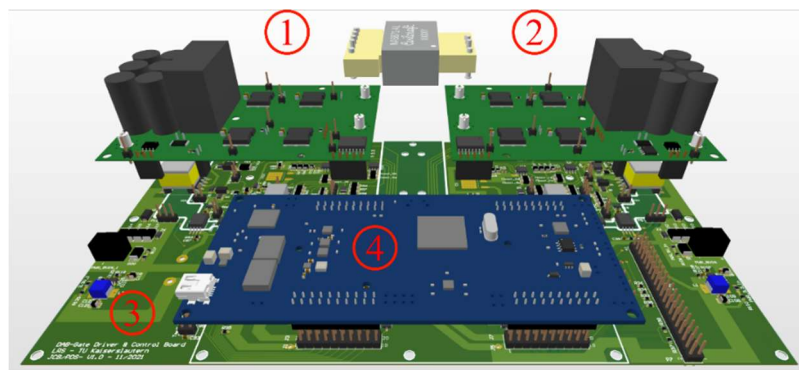


Abbildung 40: 3D-Visualisierung des 500W-Prototyps des DAB-Wandlers

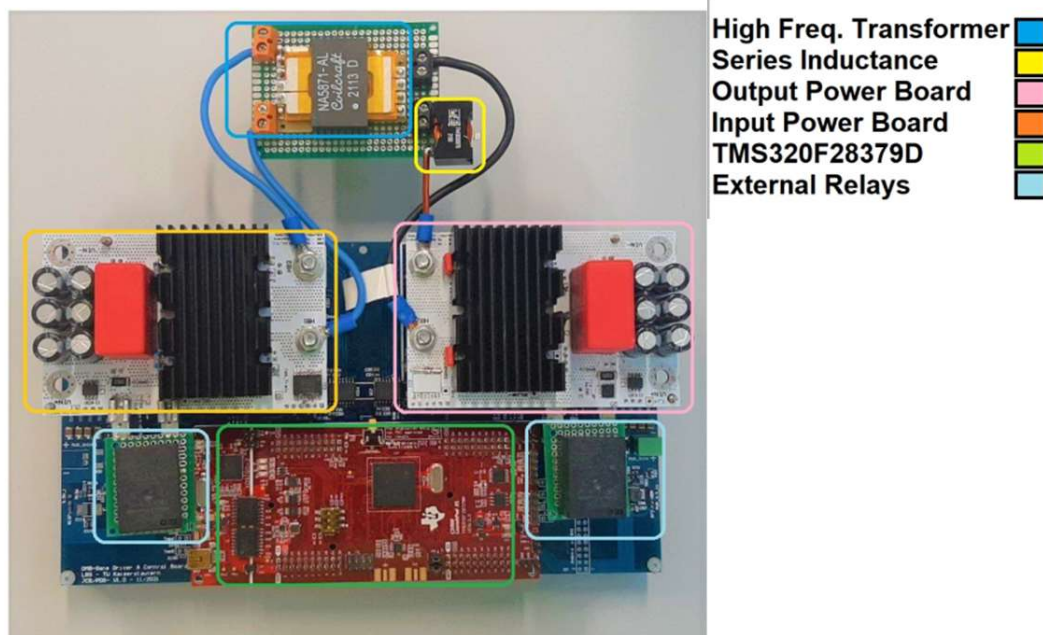


Abbildung 41: Hardware-Aufbau des DAB-Laborprototyps

Nach dem Hardware-Aufbau wurde der Prototyp im Labor unter verschiedenen Betriebsbedingungen in Betrieb genommen, eingehend getestet und optimiert. Als Spannungsquellen dienten dabei zwei 4-Quadranten-Spannungsquellen, so dass das DC-Netz sowie die Autobatterie emuliert und der bidirektionale Betrieb überprüft werden konnten.

Test 1 – Leistungsübertragung vom DC-Netz in die Autobatterie:



Abbildung 42: Leistungsübertragung vom DC-Netz in die Batterie am Laborprototyp

Die Einstellung einer Phasenverschiebung von $+20^\circ$ zwischen den generierten Wechselspannungen am Hochfrequenztransformator führt zu einer Leistungsübertragung von 300 W, wie in Abbildung 42 dargestellt. Abgesehen von den Störungen der Messsensoren ist die Stromform genau so wie aus der Simulation erwartet. Auf der rechten Seite der Spannungsquellen werden die Amplituden und Richtungen der resultierenden DC-Ströme angezeigt. Wie erwartet, agiert das emulierte DC-Netz als Versorger (positiver Strom) und die emulierte Batterie als Verbraucher (negativer Strom).

Test 2 – Leistungsübertragung aus der Batterie ins DC-Netz:

Die Einstellung einer Phasenverschiebung von -20° zwischen den generierten Wechselspannungen am Hochfrequenztransformator führt zu einer Leistungsübertragung von 300 W in der Gegenrichtung, wie in Abbildung 43 dargestellt. Auch hier ist die Stromform genau wie aus der Simulation erwartet - abgesehen von den Störungen der Messsensoren. Auf der rechten Seite der Spannungsquellen werden die Amplituden und Richtungen der resultierenden DC-Ströme angezeigt. Nun arbeitet das emulierte DC-Netz als Verbraucher (negativer Strom) und die emulierte Batterie als Versorger (positiver Strom).



Abbildung 43: Leistungsübertragung von der Batterie ins DC-Netz am Laborprototyp

Mit diesen Tests ist die Verifikation des Konzepts durch Labor-Hardware abgeschlossen. Das Konzept wurde anschließend auf eine Volleleistungsvariante übertragen. Das Unterarbeitspaket ist somit erfolgreich abgeschlossen.

2.3.2 AP 3.2 Lade- und Steuergerät Altbatterie

Beitrag von RPTU/LRS

In diesem Arbeitspaket soll ein elektronisches System inkl. eines bidirektionalen Ladegerätes und eines auf einem Batteriemanagementsystem (BMS) basierenden Steuergerätes für die Integration und Nutzung von Second-Life-Batterien in das DC-Netz entwickelt werden. Bei den Second-Life-Batterien geht es in diesem Projekt um Bleisäure-Akkumulatoren (Lead Acid), die heute üblicherweise als Starter-Batterien in städtischen Omnibussen eingesetzt werden. Von unserem externen Projektunterstützer (Lol-Partner) Stadtwerke Kaiserslautern (SWK) erhielten wir einige Second-Life-Batterien, die wir in diesem Projekt zu einem stationären Energiespeicher zusammenschalteten und für das Energiemanagement nutzen wollten. Das Ladegerät für die Second-Life-Bleibatterien hat das gleiche Konzept wie jenes für die Li-Batterie aus AP 3.1, weswegen eine Art „Duplikat“ dafür gebaut wurde. Angepasst wurde die batterie-seitige Spannung (zwischen 80 V und 240 V) sowie die maximale Lade-/Entladeleistung (7 kW). Abbildung 44 zeigt die Hardware des DC/DC-Wandlers (zu sehen nur die primäre Seite) sowie dazugehörige Komponenten.

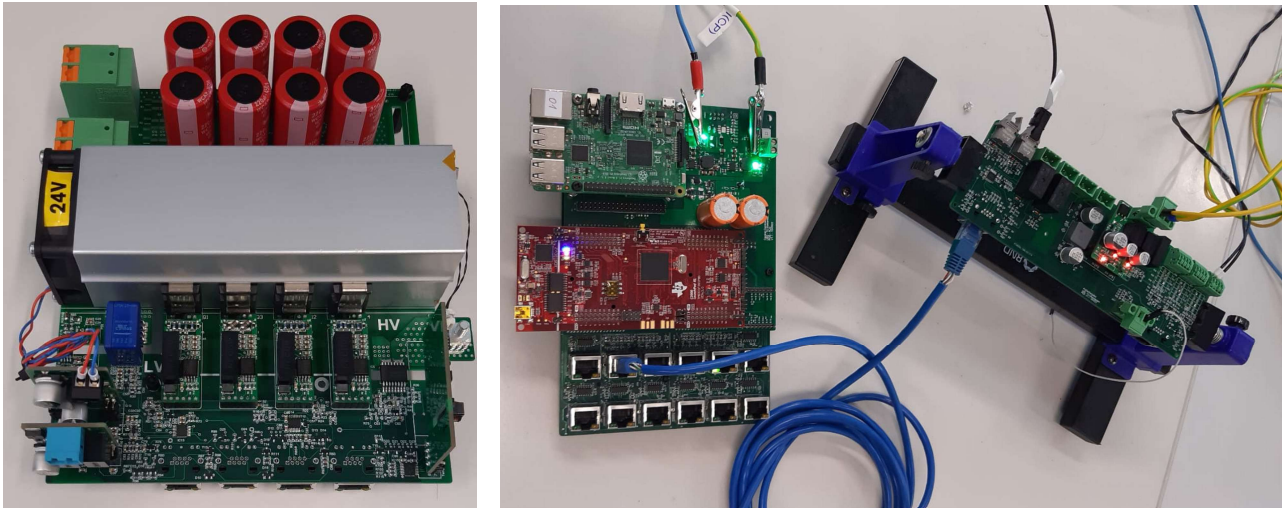


Abbildung 44: DAB-Wandler für Second-Life-Batterie-Ladegerät mit Vorladungs- und Datenerfassungseinheit

Da die Second-Life-Blei-Batterien in einer losen Form ohne Steuerungselektronik zur Verfügung gestellt wurden, wurde neben einem bidirektionalen Batterieladegerät auch ein elektronisches Steuergerät (Batterie-Management-System BMS) mit Kommunikationsschnittstellen zur zentralen Steuerung benötigt, welches in diesem Unterarbeitspaket entwickelt, gebaut und getestet wurde. Im Wesentlichen soll der Energiezustand der Batterie erfasst und die Energieflüsse in die einzelnen Zellen gesteuert werden. Das Steuergerät beinhaltet auch das Batteriemanagementsystem, wie in Abbildung 45 dargestellt. Zur Ladung bzw. Entladung vom Batteriespeicher arbeitet das BMS als unterlagerte Ebene zur Überwachung der Batteriezustände mit entsprechenden Schutzfunktionen, während die Lade-/Entladeleistung vom Ladegerät bereitgestellt wird. Zusätzlich wurde auch noch ein elektronischer Laderegler implementiert, der im Zusammenwirken mit dem zentralen Energiemanagementsystem den Sollwert für den DAB-Wandler vorgibt und ggf. auch beschränkt. Dieser Regler soll in Zusammenarbeit mit dem BMS auch dafür sorgen, dass eine Balancierung der Batteriespannungen innerhalb der Reihenschaltung erreicht wird. Diese Balancierungsregelung ist für die dauerhafte Funktion des Energiespeichers essentiell und auf der Ebene des BMS letztlich realisiert.

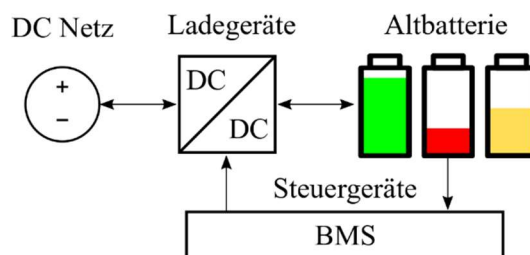


Abbildung 45: Übersicht Lade- und Steuergerät für Second-Life-Batterien

Das BMS überwacht den Energiezustand der Batterie, steuert den Kühlkreislauf (sofern dieser notwendig ist) sowie Schütze, überwacht den Gesundheitsstatus der einzelnen Zellen, dient als Kommunikationsschnittstelle zu externen Steuergeräten und reagiert auf mögliche Fehlerzustände. Zur Zustandsüberwachung werden alle Einzelzellspannungen, der Laststrom sowie Temperaturen an ausgewählten Stellen des Zellenblocks gemessen. Aus diesen Messwerten können dann

Zustandsgrößen wie der SOC (State of Charge), SOH (State of Health) oder die abrufbare Leistung und Ladefähigkeit geschätzt und über die externe Kommunikationsschnittstelle ausgegeben werden. Diese Größen sind notwendig, um das Energiemanagementsystem aus AP 1.3 über die Betriebsfähigkeit der Batterie zu informieren.

Ursprünglich war die Nutzung von zwei Arten der Second-Life-Batterien geplant

- Blei-Säure-Batterien: typische Verwendung als Starter-Batterien in PKW & LKW
- Lithium-Ionen-Batterien: typische Verwendung in Elektro-PKW und Elektrofahrrädern

Aufgrund der verschiedenen Eigenschaften und Anforderungen, hätten dafür verschiedene BMS-Arten entwickelt werden müssen. Im Verlauf des Projektes zeigte sich jedoch, dass Second-Life-Li-Ionen-Batterien nicht verfügbar sein werden, so dass letztendlich nur die Blei-Säure-Variante realisiert wurde.

Konzept des Blei-Batteriemanagementsystems (BMS)

Das besondere Merkmal des hier entwickelten BMS ist die Fähigkeit, Blei-Batterien unterschiedlicher Type/Modelle, unterschiedlicher Hersteller und unterschiedlicher Restkapazitäten miteinander in einem gemeinsamen Energiespeicher zu verwalten. Diese Batterien weisen typischerweise eine Spannung von etwa 12 V oder 6 V auf. Um eine hohe Gesamtspannung zu erreichen, müssen eine große Anzahl dieser Batterien in Serie zu einem Gesamtenergiespeicher geschaltet werden. Für die spätere Regelung des Ladens und Entladens müssen die Zustände der einzelnen Batterie laufend erfasst, lokal vorverarbeitet und schließlich an eine zentrale Recheneinheit weitergegeben werden, damit diese die Überwachungs- und Schutzfunktionen zentral ausführen kann. Es wurde ein Master-Slave-Konzept (s. Abbildung 46) entwickelt.

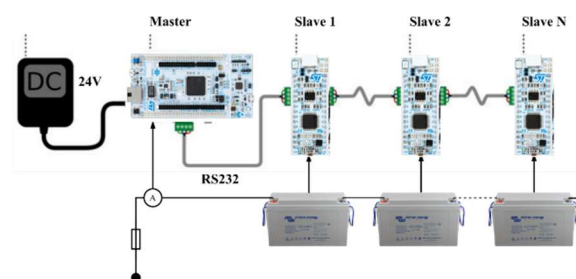


Abbildung 46: Konzept des Blei-BMS

Für die Zustandsüberwachung sind alle Batterien mit je einem Slave-Mikrocontroller STM32F031K6 (Slave 1 - N) ausgestattet. Die Slaves werden durch eine serielle Kommunikation Schnittstelle (RS232) vom Master-Mikrocontroller STM32F429ZI gesteuert.

Slave-Aufgaben:

- Zellspannungsüberwachung
- Zelltemperaturüberwachung
- Passive Landungsbilanz

Master-Aufgaben:

- Zusammenfassung von Slave-Daten
- Messung des Laststroms

- Monitoring Ladezustands (SOC) der Batterien
- Monitoring des Gesundheitszustands (SOH) der Batterien
- Steuerung der Ladungsbilanz
- Fehlerdiagnose
- Datenübertragung an Energiemanagementsystem und Ladegerät

Hardware-Entwurf

Der Hardware-Entwurf betrifft im Wesentlichen die Auslegung und Verbindung der Slave-Platinen, der Master-Platine und der Mikroprozessor-Platinen (Mikrokontroller Boards der Firma ST Microelectronics). Der realisierte Entwurf sowie die real aufgebauten Hardware-Platinen zeigen Abbildung 47 und Abbildung 48.

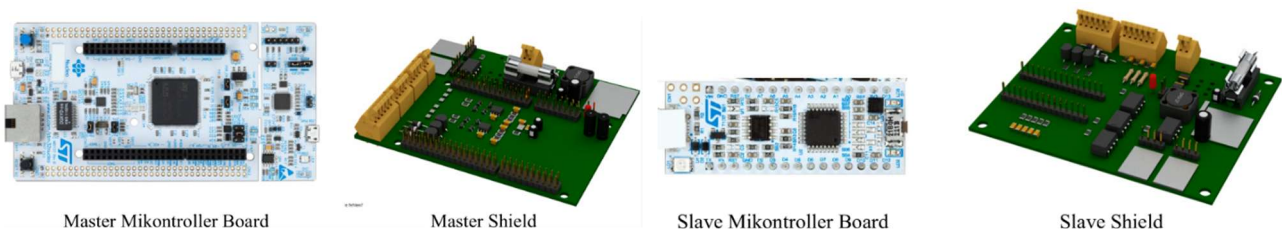


Abbildung 47: Entwurf Master-Hardware und Entwurf Slave-Hardware

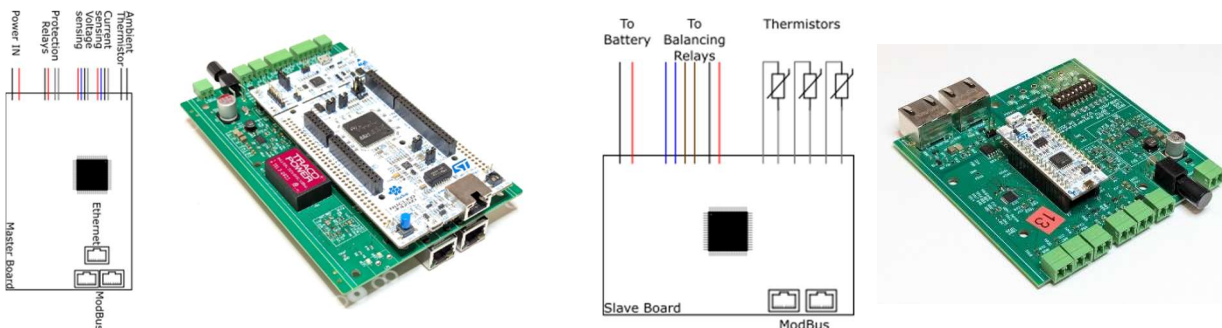


Abbildung 48: Hardware-Platinen mit Mikrocontrollern von Master (links) und Slave (rechts)

Neben der Hardware wurde eine entsprechende Software für die Batterie- und Ladezustandsüberwachung entwickelt und auf der Master-Platine implementiert. Folgende Funktionen wurden dabei realisiert:

- Modulare Kommunikation zwischen Master- und Slave-Einheiten
- Datenerfassung der Batterie-Größen (Zell Spannung, Temperatur und Ladenstrom)
- Berechnung des gesamten Ladezustands der Batterie (SOC)
- Grafische Benutzeroberfläche

Für die Überprüfung der Funktionsfähigkeit der gesamten Hard- und Software wurde zunächst ein kleiner Prüfstand mit drei Akkuzellen gleicher Spannungen von unterschiedlich Herstellern im Labor

aufgebaut (s. Abbildung 49). Aufgrund der modularen Konstruktion der Hardware können bis zu 255 Zellen in Serien eingesetzt werden. In Abbildung 50 ist die entwickelte grafische Benutzeroberfläche gezeigt.

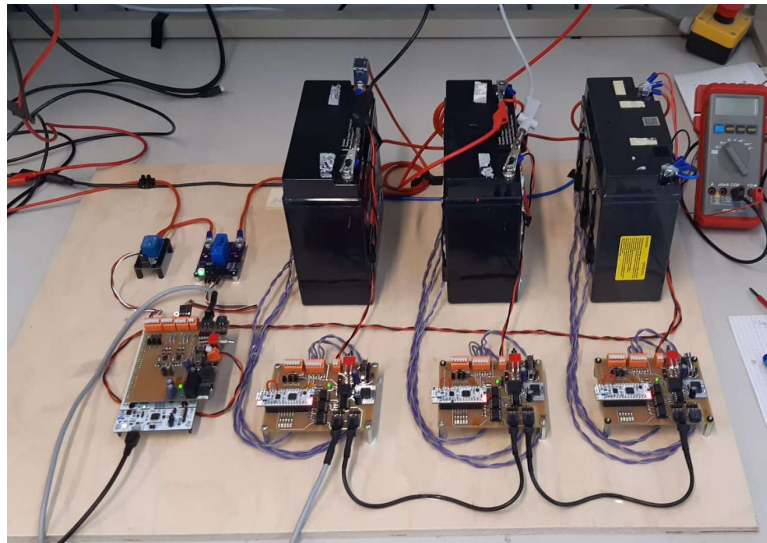


Abbildung 49: Aufbau des kleinen BMS-Laborprüfstands

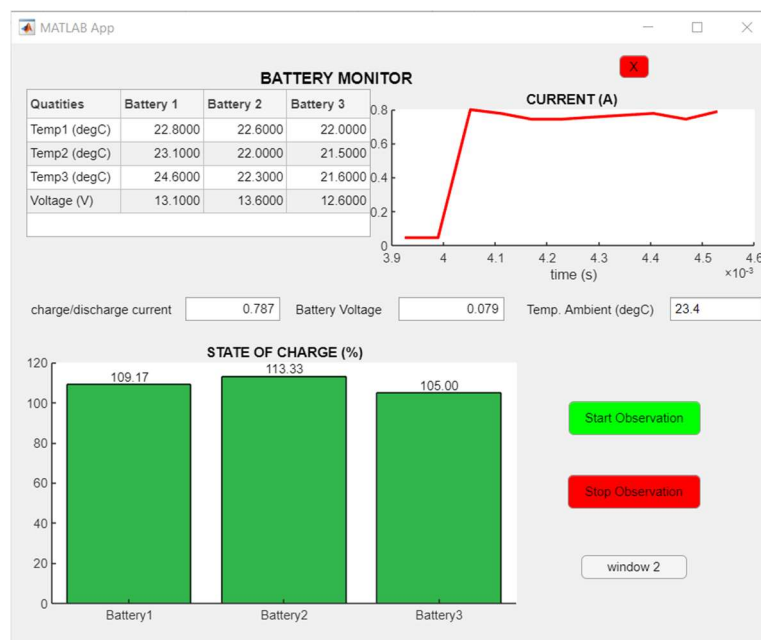


Abbildung 50: Grafische Benutzeroberfläche des kleinen BMS-Prüfstands

Nachdem die grundsätzliche Funktionsfähigkeit erfolgreich überprüft wurde, fand eine Validierung des BMS mit realistischen Akkubatterien im Labor statt. Nun ist die Hardware mit 6 V-, 12 V- und 24 V-Bleizellen kompatibel. Damit können mehrere Second-Life-Zellen aus verschiedenen industriellen Anwendungen miteinander kombiniert werden (s. Abbildung 51). Der einzige Unterschied zum späteren Demonstrator ist die hier noch geringere Gesamtspannung (sechs Batterien in Reihe).



Abbildung 51: Labortestaufbau des BMS mit sechs Batterien

Das BMS ist zuständig für die Datenerfassung aller Second-Life-Zellen. Die erfassten Daten sollen verarbeitet und an das Energie-Management-System des Gebäudes kommuniziert werden. Dafür wird das Modbus-Protokoll verwendet. Für die Validierung des BMS wurde ein gesteuertes Labornetzteil als Ersatz für das bidirektionale Ladegerät aus AP 3.1 verwendet. Damit konnte die Befehls- und Datenübertragung mit dem Industrie-PC als Hardware für das Energiemanagement (hier als Raspberry Pi 4 dargestellt) überprüft werden. Der gesamte Aufbau ist in Abbildung 52 dargestellt.

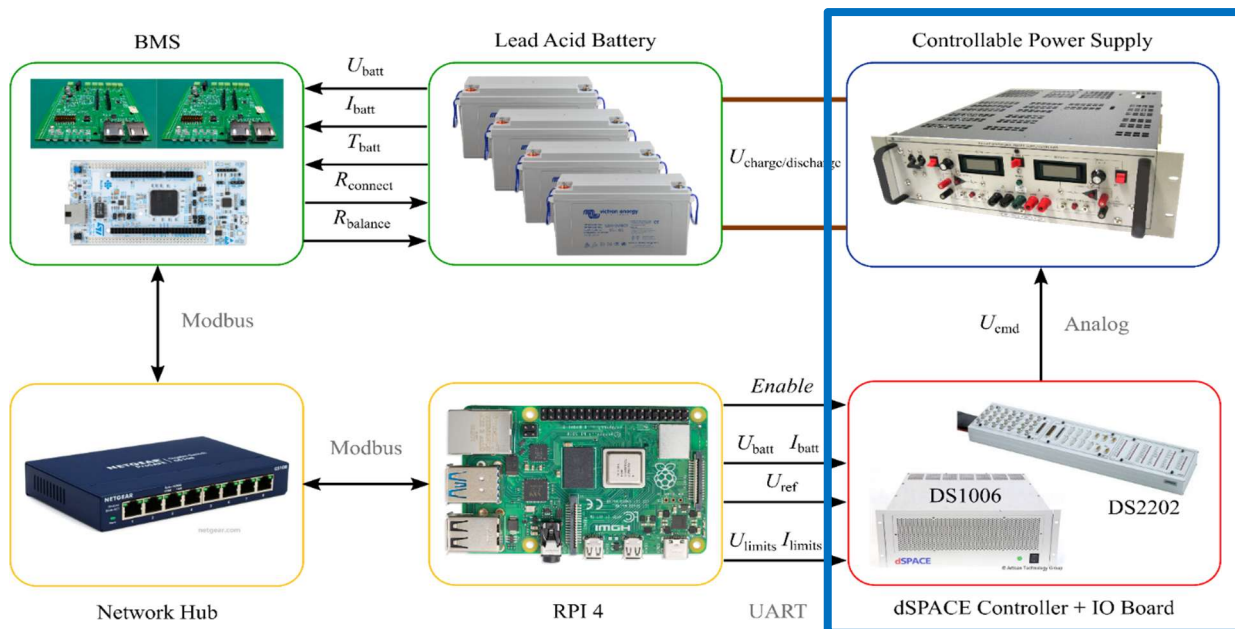


Abbildung 52: Blockschaltbild des BMS-Prüfstands

Weiterhin wurde eine verbesserte GUI (Abbildung 53) entwickelt, mit der alle Zellen überwacht werden können. Diese kann auch vom Nutzer verwendet werden, um das Ladegerät manuell zu steuern.

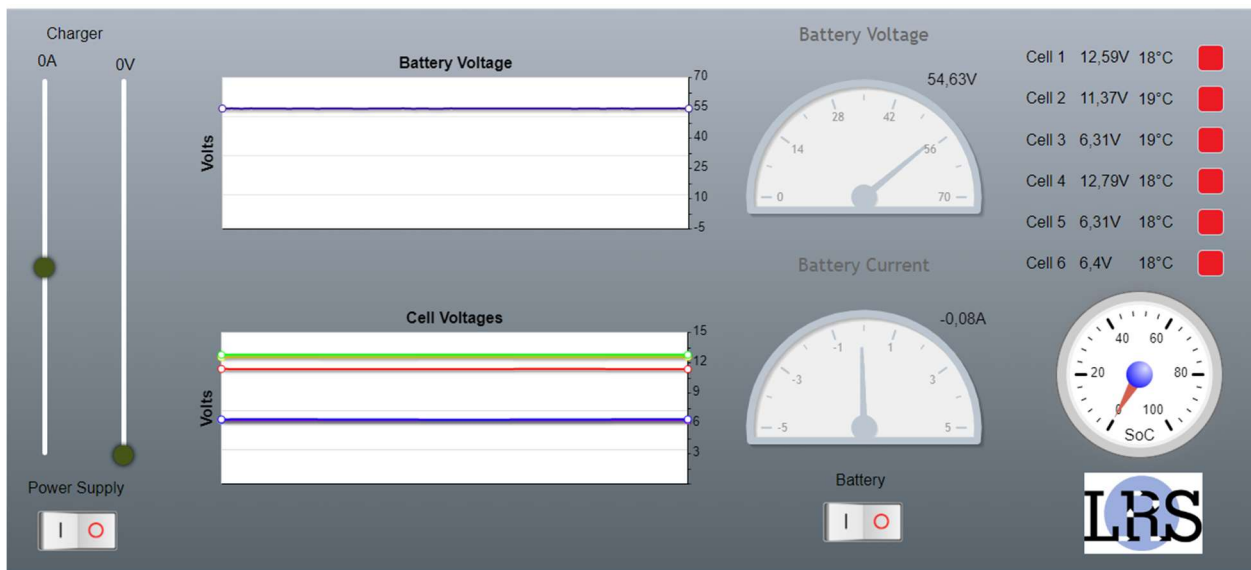


Abbildung 53: Graphical User Interface (GUI) des BMS

Mit dem Abschluss aller Labortests wurde die Hardware des BMS noch einmal überarbeitet. Sie wurde nun auch gegen Fremdkörper, Berührung von außen und Tropfwasser geschützt. Die endgültige Hardware ist in Abbildung 54 dargestellt.

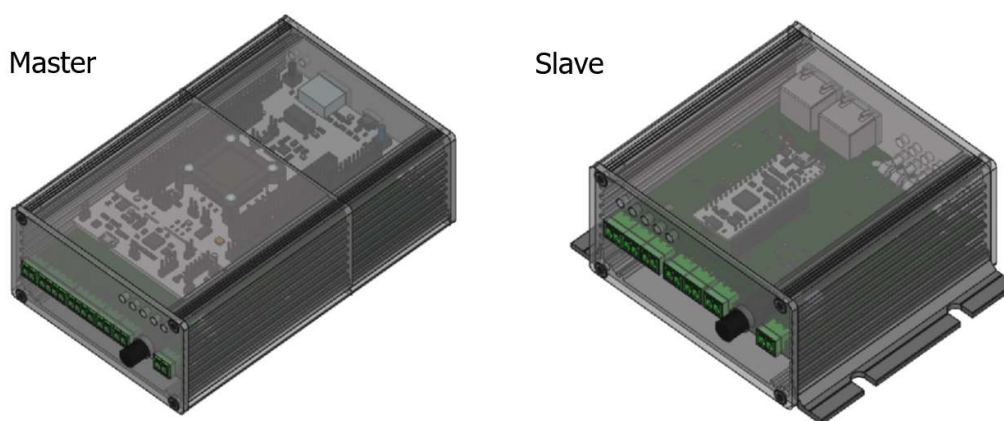


Abbildung 54: Finale Hardware des BMI für den Einsatz in der Demonstration AP 4

2.4 AP 4: Demonstration

Zielsetzung AP 4:

In diesem AP soll die Demonstrationsanlage geplant, projiziert, realisiert und demonstriert werden. Alle dafür notwendigen planerischen und technischen Arbeiten bilden die AP-Inhalte.

Grundsätzliche Anmerkungen

Gegenüber der ursprünglichen Planung mussten im Umfang der realen Demonstration einige Änderungen vorgenommen werden. Zunächst stellte sich heraus, dass der Gastronomiebetrieb nicht mehr wie vorgesehen verfügbar sein wird. Grund hierfür war die Corona-Krise und die damit verbundene Konsequenz, dass kein Pächter mehr für den Gastronomiebetrieb zu gewinnen war, so dass der Betrieb dauerhaft ausfällt. Damit wird das Lastprofil im Wesentlichen durch die vier Ferienwohnungen bestimmt. Auch eine aktive Ansteuerung der thermischen Verbraucher, d.h. der Wärmepumpe und des Kühlhauses, ist wegen der technischen Beschaffenheit der verfügbaren Geräte sowie u.a. auch damit verbundener Garantieforderungen nicht realistisch möglich. Damit mussten sich die realen Demonstrationsszenarien auf das Energiemanagement der elektrischen Energieflüsse beschränken, wobei eine Einbeziehung sowohl des elektrischen als auch des thermischen Verbrauchs dennoch möglich war, da dessen sensorische Erfassung weiterhin gegeben war. Zur teilweisen Kompensation der realen Demonstrationseinschränkungen und damit zur Gewährleistung der Übertragbarkeit der Projektergebnisse wurde daher beschlossen, eine zusätzliche simulative Demonstration mit realen Messdaten sowohl aus dem Demonstrationsgebäude wie auch aus weiteren Weingütern mit Gastronomiebetrieben aufzubauen. Damit soll der Mischnutzungscharakter des Projektes erhalten bleiben. Die Beschaffung dieser notwendigen Daten konnte dann im Laufe des Projektes realisiert werden. Ein weiteres Problem ergab sich mit dem bidirektionalen Laden des vorgesehenen E-Autos. Es stellte sich heraus, dass das Steuergerät im Auto sich nicht umprogrammieren ließ, um einen bidirektionalen Energiefluss zu erlauben. Zudem erwies sich auch die darin verbaute Batterie als ein Sondermodell mit einer außergewöhnlich geringen Spannung von lediglich 80 V. Damit wäre nur eine maximale Ladeleistung von ca. 2,5 kW zu realisieren, also nur einen Bruchteil der verfügbaren PV-Leistung. Somit eignet sich das E-Auto nicht für die Demonstration. Um die bidirektionale Funktionalität des Ladegerätes dennoch mit entsprechender Leistung zu demonstrieren, wurde ein Li-Akku mit einer Spannung von ca. 400 V und einer erlaubten Ladeleistung von ca. 10 kW im Demonstrationsgebäude verwendet.

2.4.1 AP 4.1 Gesamtplanung und Projektierung

Beitrag von IG-CP

Im Rahmen des Arbeitspakets hat IG-CP mbH neben der Erstellung des Gesamtprojektplans maßgeblich der Fa. Dali hinsichtlich der Integration (Recherche, Dimensionierung, Planung, Begleitung und Umsetzung) von Batteriespeichersystemen, Wärmepumpen und Photovoltaikanlagen in das Energiemanagementsystem zugearbeitet. Diese Arbeiten umfassten die Planung und Implementierung der jeweiligen Technologien, um eine effiziente Nutzung und Steuerung der Energiesysteme zu gewährleisten. Es erfolgte zudem die Baubegleitung und Überwachung vor Ort inkl. Dokumentation.

Im Rahmen von Arbeitspaket 4.1 wurde ein umfassender Gesamtprojektplan erstellt, siehe nachfolgende Abbildungen. Durch Verzögerungen in AP 3 – bidirektionales Laden von Batterien und Elektroautos – verschoben sich neben der Installation und Inbetriebnahme der Ladesysteme im Demonstrationsgebäude auch die Installation des Batteriespeichers. Infolge dieser Verzögerungen

verschob sich auch die Inbetriebnahme und der Ablauf des gesamten Demonstrationssystems. Das AP konnte nicht im geplanten Zeitrahmen abgeschlossen werden. Die Arbeiten konnten durch die Projektverlängerung teilweise nachgeholt werden.

Tabelle 9: Projektumsetzung und Meilensteine

Konzept			Konzeptentwicklung und stetige Weiterentwicklung Messen + Steuern → Entwicklung Messkonzept → Modellierung Erzeugungsprofil → Definition von steuerbaren Lasten → Zukunftsaussicht aufgrund von Überschussoptimierung → Entwicklung weiterer Nutzungskonzepte wie vertical gardening, Kältekammer, etc.		
Q1 (2021)	Q2 (2021)	Q3 (2022)	Elektrisch → Ertüchtigung Hausanschluss → Integration der Bestandsanlagen → Konzeptionierung des Schrankes hinsichtlich des entwickelten Messkonzeptes → Bestellung Schrank aktuell: Einbau und Anschluss	Thermisch → Definition Wärmekonzept - zentral: Bereitstellung Heizung - dezentral: Bereitstellung Trinkwarmwasser → Netzwerkanbindung Unterverteiler im Objekt → elektrische Anbindung dezentrale Trinkwassererzeugung	Speicher → Schnittstellengespräche Beschaffung 2-Life-Speicher → Dimensionierung nötige Kapazität im aktuellen Betrieb und in zukünftig erwarteter Auslastung → Auf- und Ausbau Netzwerk durch Messebesuch (The smarter E Europe) und Kontakt mit Herstellern von 2-Life-Speichern aus Autobatterien
Konzept und Umsetzung			Überarbeitung Konzept → Anpassung und Weiterentwicklung Messkonzept mit Wärmemengenzähler - el. Erzeugung mit 30 kWp PV-Anlage - th. Erzeugung mit Wärmepumpe - Nutzung PV-Strom in WP und zwei Wohneinheiten (2 WE in Forschungsobjekt, 2 WE als Referenz) - Nutzung von th. Energie aus WP in Wohneinheiten		
Q4 und Erreichung Meilensteine M1 (2022)			Umsetzung → Einholung Angebote Messtechnik + Sensorik → Auswertung der Angebote hinsichtlich der notwendigen Anforderungen im Forschungskontext → Rücksprache Konzepte mit TU KL rückgesprochen und Definition von Schnittstellen → Erstellung Materialliste Messtechnik und Wetterstation → Bestellung der Komponenten über DaLi ist erfolgt		
Q5 (2022)	Q6 (2022)	Umsetzung → Finalisierung der Testläufe → Auswertung der Ergebnisse und Transfer in Forschungsprojekt → Implementierung der Sensorik und Messtechnik ins Objekt → Monitoring der elektrischen und thermischen Energieflüsse			
Q7 (2023)	Q8 und Erreichung Meilensteine M2 (2023)	Meilensteine M2 nach 24 Projektmonaten (Q8) AP1: MPC-Algorithmen entwickelt und in das Simulationsmodell integriert; Prototypische Prognosemodelle sind angebunden und stehen für den Testbetrieb bereit AP2: Summenstrom-/Mieterstrommodell bzw. Betriebsmodell für das Energiemanagementsystem erarbeitet, verifiziert und rechtlich gesichert. Analyse der Wechselwirkung zwischen Nutzer und Energiemanagement-System erstellt. AP3: Prototyp für bidirektionales Laden fertiggestellt; Prototyp des Batteriesteuergerätes implementiert → Verzögerung im Ablauf AP4: Batteriespeicher betriebsbereit installiert und getestet; Mess- und IK-Technik installiert.			
Q9 (2023)	Q10 (2023)	Verzögerungen in AP 3 – bidirektionales Laden von Batterien und E-Auto → folgende davon abhängigen Maßnahmen haben sich dadurch verschoben - Installation und Inbetriebnahme der Ladesysteme im Demonstrationsgebäude - Installation des Batteriespeichers und dessen Anbindung an die Gesamtsteuerung - Inbetriebnahme und Ablauf des Demonstrationssystems Aufgrund der Verzögerungen konnte AP 4 – Demonstration nicht im geplanten Zeitrahmen abgeschlossen werden – Arbeiten sollten durch kostenneutrale Projektverlängerung nachgeholt werden			



Die methodische Einführung des Energiemanagementsystems in das Mischnutzungsgebäude wurde erfolgreich durchgeführt. Zudem wurden die geplanten Energiesysteme, einschließlich Photovoltaik, Batterien, Ladestationen und Heizung/Kühlung, erfolgreich in die baulichen Maßnahmen integriert und implementiert.

Beitrag von Dali Solarpower

Der Einbau und die Inbetriebnahme der „Novelan Wärmepumpe LAD7-HID Heizleistung 7,7 kW / 3,8 kW“ oberhalb der vier Fremdenzimmer wurde umgesetzt, um diese zu versorgen. Ein Kühlhaus wurde in der Scheune platziert, um die Simulation einer Gastronomie besser darzustellen.



Abbildung 55: Kühlhaus und Elektroauto

2.4.2 AP 4.2 Energieerzeugung und Batteriespeicher

Beitrag von Dali Solarpower

Die Planung, Genehmigung und Installation der PV-Anlage mit einer Leistung von 30 kWp wurde durchgeführt. Diese befindet sich über der Scheune auf der Westseite des Daches.

Die Brandschutzaufgaben wurden abgeklärt und basierend darauf ein Batterieraum geplant und gebaut. Dafür wurde ein 20 Fuß großer Batteriecontainer außerhalb des Demonstrationsobjekts auf ein Fundament gestellt und Brandschutztechnisch aufbereitet. Der Innenausbau geschah mit F-90 Platten. Es handelt sich um einen gebrauchten Container, um den Aspekt der Nachhaltigkeit beizubehalten. Ebenfalls in diesem Container befindet sich ein kleiner Computerarbeitsplatz.

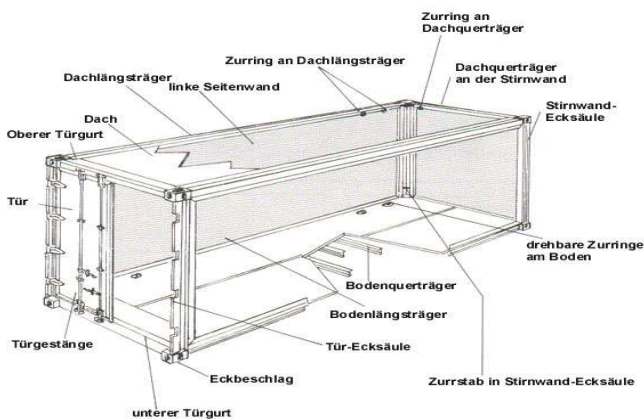


Abbildung 56: Batteriecontainer

Für das Innere des Batteriecontainers wurde ein belastbares Batterieträgersystem aus Metall entworfen, geschweißt und anschließend eingebaut. Die Batterien sind darauf gelagert und verkabelt. Außerdem wurden die Batterien über einen kleinen Schacht in die Scheune mit den Steuerelementen verkabelt.

Ein Elektroauto des niederländischen Startups Carice wurde zunächst als zusätzlicher Speicher mit Hilfe von bidirektionalem Laden zur Verfügung gestellt. Der Carice MK1 ist ein Roadster des niederländischen Autoherstellers Carice Cars aus Delft. Präsentiert wurde das Fahrzeug 2013 auf der Techno-Classica in Essen. Es sieht aus wie ein Oldtimer, wird jedoch von einem Elektromotor angetrieben. Bei einem Innovationswettbewerb der niederländischen Rabobank wurde 2013 der 1. Platz erreicht. Um technische Daten abzuklären wurde Kontakt zwischen RPTU und Carice hergestellt. Dabei stellte sich heraus, dass die autointerne Ladekontrolle eine Bidirektionalität nicht ohne weiteres zulässt und die Spannung des Autos nicht kompatibel ist und das Modell somit nicht als Speicher für die Demonstration genutzt werden kann.

Beitrag von RPTU/LRS

Abbildung 57 zeigt das Ladegerät (DAB-Wandler) zusammen mit dem Li-Akkumulator (E-Auto-Ersatz). Nach Integration des Systems stromseitig ins PV-DC-Netz und kommunikationsseitig in den Modbus sowie erfolgreicher Erprobung stand das System für die Demonstration zur Verfügung.



Abbildung 57: Ladegerät nach Transport zum Demo-Gebäude und nach Systemintegration

Das Lade- und Steuergerät für die Second-Life-Bleibatterien wurde ebenfalls installiert und in Betrieb genommen. Dabei wurde das Ladegerät in der Halle neben dem entsprechenden Gerät für die Li-Batterie aufgestellt und ans PV-DC-Netz angeschlossen. Das BMS (die Master- und Slave-Platinen sowie die elektronischen Schaltungen für die Ladespannungsbalancierung) wurden im Batteriecontainer außerhalb des eigentlichen Gebäudes installiert. Kommunikationsseitig erfolgt die Anbindung der Master-Platinen übers Ethernet an den IPC und der Slave-Platinen an den Modbus (s. Abbildung 58). Das in Betrieb genommene und überprüfte DC-Netz mit entsprechenden Schutzschaltern zeigt Abbildung 59.

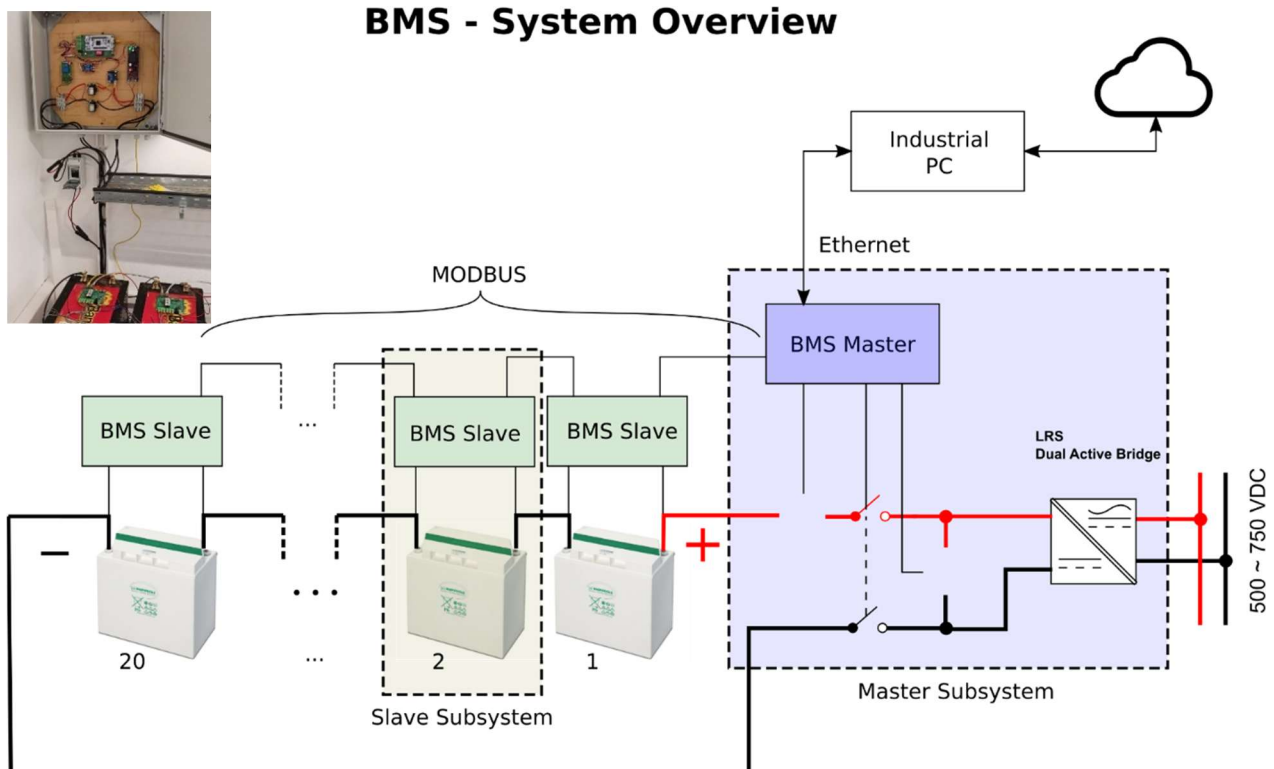


Abbildung 58: Installation des BMS im Demonstrationsgebäude

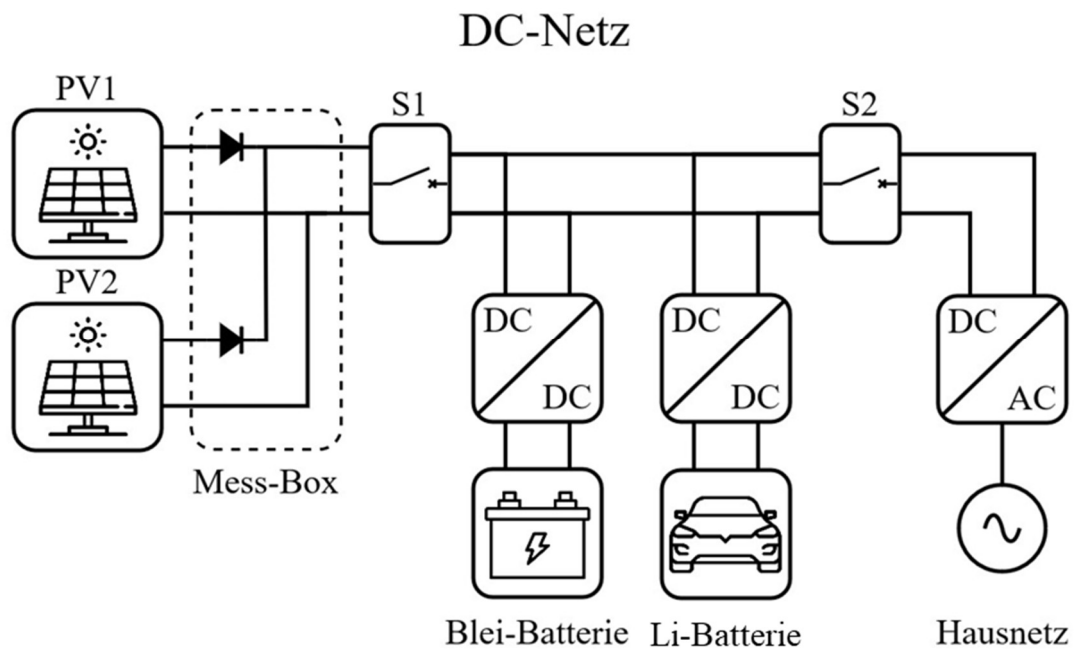


Abbildung 59: Installiertes DC-Netz mit Schutzfunktionen

Beitrag von IG-CP

Bezüglich der Beschaffung der Second-Life-Batterien von LKW und PKW besteht die Herausforderung, dass viele Fahrzeughersteller eine Rücksendung der Batterien nach erfolgtem Ausbau fordern. Daher wurden mehrere Schnittstellengespräche mit der SWK Mobility, EnStadt:Pfaff, Rittersbacher (größter VW, Audi und Porschehändler in Kaiserslautern) geführt, um die Zurverfügungstellung der Batterien sicherzustellen. Es wurden sowohl Second-Life Batterien als auch neue Batterien als Referenz beschafft.

Die Energieerzeugungs- und -speicherungsanlagen wurden erfolgreich fertiggestellt und fachgerecht in Betrieb genommen. Die mess- und steuerungstechnischen Komponenten wurden ebenfalls erfolgreich installiert und in das System integriert.

2.4.3 AP 4.3 Mess- und Kommunikationstechnik

Beitrag von IG-CP

Im Projektzeitraum wurde das Messkonzept entwickelt und mit dem Energieversorger rückgesprochen. Die technische Umsetzung wurde definiert, notwendige Komponenten wurden in Abstimmung mit den Projektpartnern abhängig von den individuellen Anforderungen bestimmt und bestellt. Es erfolgte die Spezifikation der Sensorik zur messtechnischen Aufnahme der elektrischen und thermischen Energieströme. Diesbezüglich wurde mit allen Projektpartnern Rücksprache gehalten, die Anforderungen bestimmt sowie diverse Unternehmen kontaktiert. Es wurden Angebote für Sensorik (elektrisch und thermisch) eingeholt und mit den Partnern besprochen.

Die Umsetzung umfasste auch die Einholung von Angeboten für Messtechnik und Sensorik, die Auswertung dieser Angebote hinsichtlich der notwendigen Anforderungen im Forschungskontext, die Rücksprache mit der RPTU KL zur Definition von Schnittstellen sowie die Erstellung einer Materialliste für Messtechnik und Wetterstation. Die Bestellung der Komponenten erfolgte über DaLi.

Im Demonstrator wurden Internet- und Datenleitungen verlegt, standardisierte Schnittstellen eingerichtet, um die Übertragbarkeit zu wahren, und Zwischenzähler in den Ferienwohnungen installiert. Des Weiteren wurde eine Wetterstation installiert und Wärmemengenzähler für die Wärmepumpe.

Nachdem die Sensorik und Messtechnik im Objekt implementiert wurden, konnte das Monitoring der elektrischen und thermischen Energieflüsse erfolgreich gestartet werden.

Aufgrund der bereits genannten Verzögerung des Forschungsprojektes wurden zusätzlich Messdaten eines Referenzobjektes aufgearbeitet und ausgewertet. Das Referenzhaus wurde sensorisch mit Eigenmitteln erschlossen. Es wurden folgende Komponenten überwacht: Wärmepumpe, Schichtwasserspeicher 850 l (3 Schichten), wassergeführter Scheitholzbrenner, Einsatz Holz, Zeit, Raumtemperaturen, Trinkwasser- und Heizkreise. Die Daten werden sukzessive aktualisiert und erweitert. Die daraus gewonnenen Ergebnisse wurden präsentiert und direkt im Demonstrator implementiert.

Beitrag von RPTU/LRS

Die Arbeiten in diesem Arbeitspaket beinhalten die Konzeption, Installation und Inbetriebnahme der lokalen Messtechnik und der Kommunikationsanbindung. Abbildung 60 zeigt das Mess- und Kommunikationskonzept für das Demonstrationsgebäude.

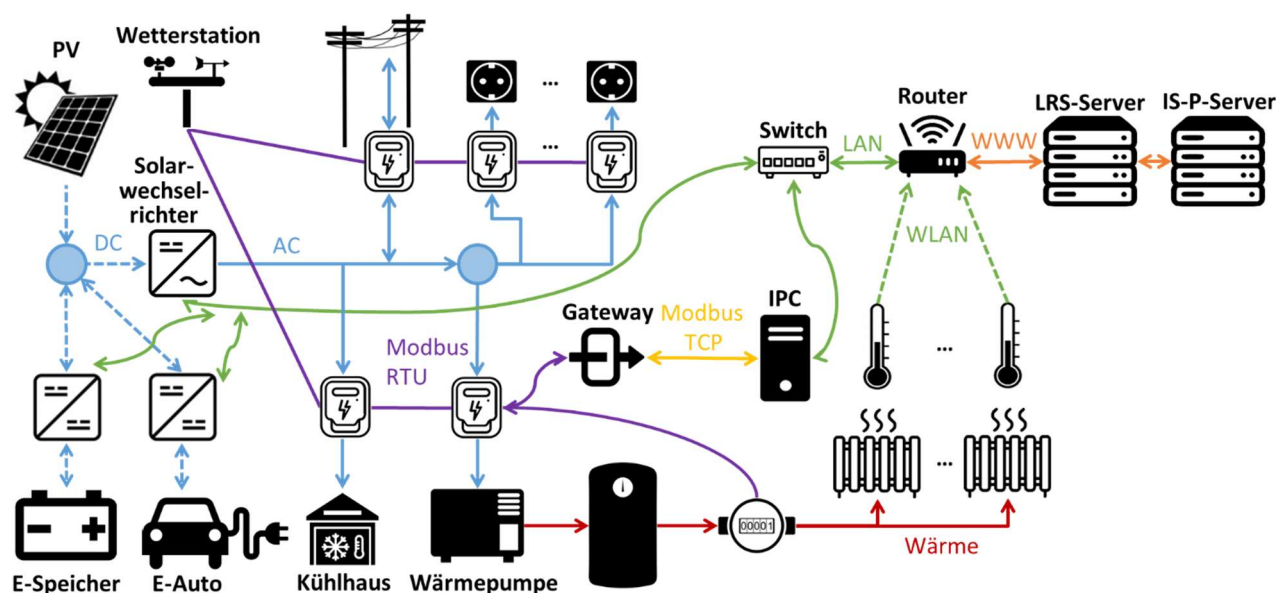


Abbildung 60: Mess- und Kommunikationskonzept

Messtechnisch werden alle wesentlichen elektrischen und thermischen Energieflüsse und Zustände für einzelne Wohnungen (Verbrauch, Temperaturen, Feuchtigkeit), Wärmepumpe, Gastrobereich (nur geringe Leistungen), Kühlhaus sowie Netzbezug erfasst. Erzeugungsseitig werden alle PV-Leistungen gemessen, ebenso die Batteriezustände. Außerdem wurde eine Wetterstation installiert, um somit Wetterdaten für die Erzeugungs- und Verbrauchsprognose zu erhalten. Die Anbindung der Messdaten an den IPC erfolgt mittels Modbus und WLAN sowie Ethernet. Die wesentlichen Energieflüsse werden zur visuellen Darstellung und Überwachung auch grafisch auf dem IPC dargestellt. Dazu wurde eine graphische Oberfläche erstellt, wo die gesammelten Messdaten der verschiedenen Geräte und Sensoren gebündelt visualisiert werden. Diese ist in Abbildung 61 dargestellt.

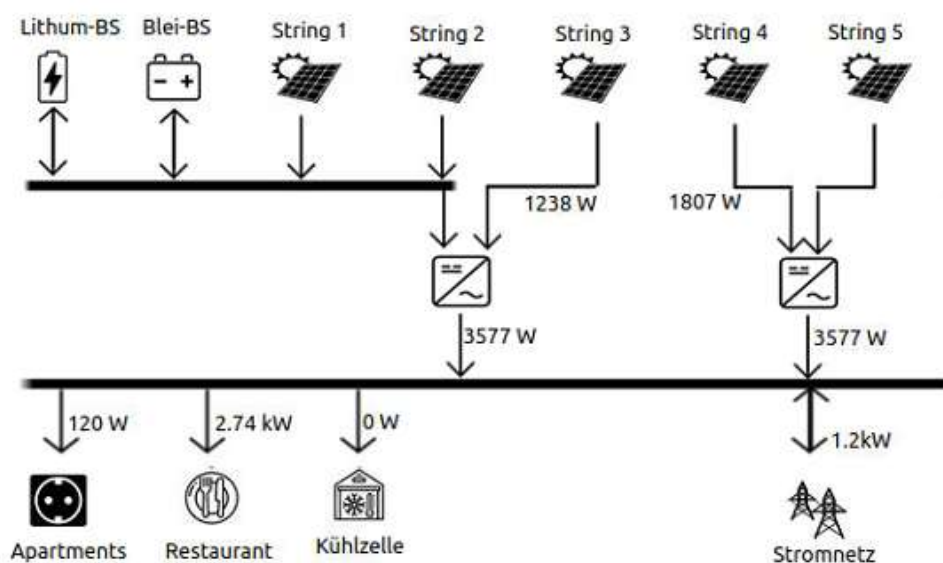


Abbildung 61: Graphische Oberfläche zur Übersicht aller Energieflüsse im ioBroker

Im Bereich der externen Kommunikationsanbindung wurde der Zugang zur lokalen Datenbank mit allen Messdaten für den Partner IS Predict bereitgestellt. Außerdem wurde ein Export aller relevanten thermischen Messdaten manuell durchgeführt und dieser Datensatz für die Validierung des thermischen Gebäudemodells in AP 1.1 zur Verfügung gestellt

Beitrag von Dali Solarpower

Planung und Einbau von AC- und DC-Leitungen, sowie Cat Kabel zur Datenverarbeitung und Weiterleitung. Den dazu realisierten Verbindungsplan zeigt Abbildung 62.

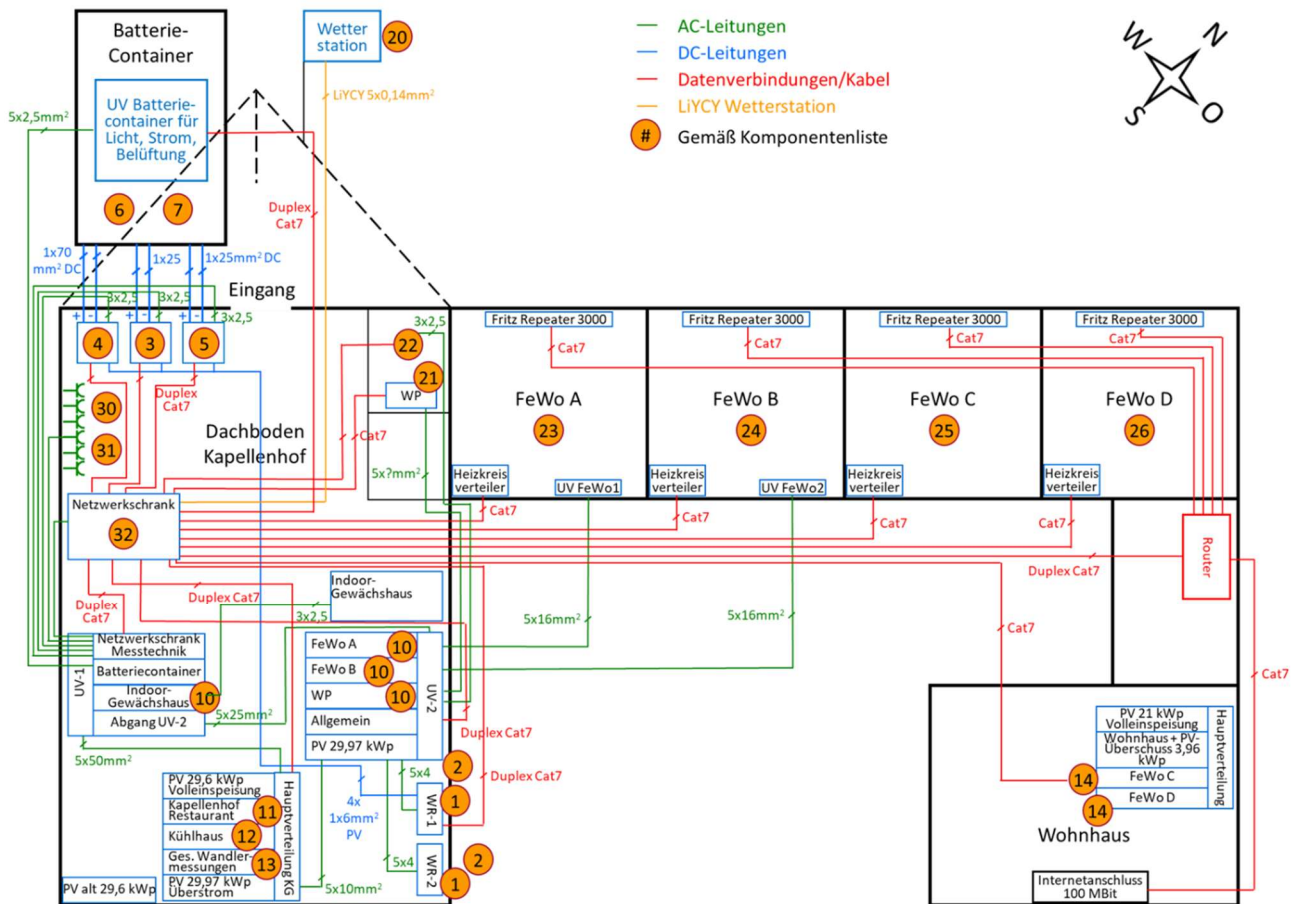


Abbildung 62: Verbindungsplan für Mess- und Kommunikationstechnik

2.4.4 AP 4.4 Inbetriebnahme und Validierung

Beitrag von RPTU/LRS

Die prinzipielle technische Struktur des im Demonstrationsgebäude implementierten MPC-basierten EMS zeigt Abbildung 63. Als zentrale Steuereinheit dient ein Industrie-PC (IPC) mit entsprechenden Kommunikationsfähigkeiten (WiFi, Ethernet, Modbus-Gateway). Mehrere Funktionen wurden auf dem IPC realisiert: zum einen sammelt er im Echtzeit-Dauerbetrieb Messdaten im Gebäude. Weiterhin transferiert er diese Daten übers Internet zur Weiterverarbeitung und Archivierung zu einem Server an der RPTU/LRS. Von dort werden diese Daten wiederum für die laufende Generierung der Erzeugungs- und Verbrauchsprognose auf einen Rechnerserver von IS Predict gesendet. Die Prognosedaten werden dann wieder über den RPTU-Server auf den IPC übertragen und online in die MPC-Algorithmen eingespielt. Die Abarbeitung des MPC-EMS erfolgt auf dem IPC in einer einstellbaren Abtastzeit von 5 - 15 Minuten. Der Prädiktionshorizont des MPC kann ebenfalls variabel eingestellt werden zwischen einem Tag und einer Woche. Die berechneten Stellbefehle für die steuerbaren Aktuatoren werden vom IPC über den Modbus an die Geräte (z. B. Ladegeräte der Speicher) online versendet. Eine weitere Aufgabe des IPC ist der Betrieb einer grafischen ioBroker-Oberfläche, die in Echtzeit die Zustände der von den Sensoren erfassten Energieflüsse anzeigt.

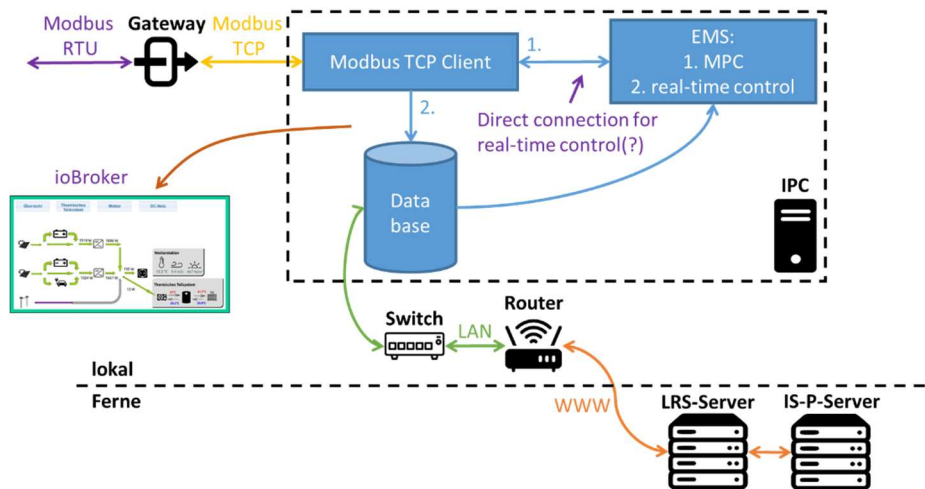


Abbildung 63: Implementiertes EMS im Demonstrationsgebäude

Aufgrund einer Lieferverzögerung von ca. einem Jahr durch einen Unterauftragnehmer zur Herstellung der in den Ladegeräten eingesetzten Mittelfrequenztransformatoren hat sich leider die Inbetriebnahme der Demonstrationstechnik erheblich verspätet (um ca. 8 Monate). Durch die kostenneutrale Projektverlängerung konnten zwar alle technischen Komponenten noch realisiert und erfolgreich getestet werden, die möglichen Betriebsszenarien für die reale Demonstration waren allerdings weiter eingeschränkt. So konnte z. B. in der Inbetriebnahme-Phase (Spätsommer) kein Heiz- bzw. Wärmepumpenbetrieb gefahren werden, so dass lediglich die Steuerung der elektrischen Energieflüsse praktisch getestet werden konnte. Es stellte sich weiterhin heraus, dass der im Solarwechselrichter der Fa. SMA festprogrammierte Betriebsmodus MPPT (Maximum Power Point Tracking) einen vom MPC-EMS gesteuerten Energiefluss vom Batteriespeicher zum Hausnetz verhindert. Dieser lässt sich zwar über das SMA-Webportal auf einen Konstant-Spannungsmodus umschalten und ermöglicht somit die gesteuerte Einspeisung ins Hausnetz, dazu ist allerdings ein manueller Eingriff notwendig und damit kein automatisierter MPC-Regelungsbetrieb möglich. Eine grundsätzliche Veränderung im Wechselrichter hierzu wäre technisch durchaus denkbar, würde aber zum Verlust der Gerätegarantie führen und ist daher in der Praxis nicht realisierbar. Daher wurde die reale Demonstration hinsichtlich der Energieflussrichtung vom DC-Netz ins AC-Netz nur mit Hilfe der manuellen Umschaltung realisiert.

Wie bereits zuvor erläutert, besteht die Demonstration aus zwei Komponenten: die HiL-simulative Demonstration mit erweiterten Betriebsszenarien und die reale Demonstration mit reduzierten Szenarien.

HiL-simulative Demonstration

Ziele der HiL-simulativen Demonstration sind

- Validierung des MPC-basierten EMS
 - zur Optimierung der elektrischen und thermischen Energieflüsse

- zur Betrachtung der Mischnutzung mit Gastronomie und Weingut
- Überprüfung der Übertragbarkeit des entwickelten Konzeptes
 - für verschiedene Lastprofile (Restaurant, Weinproduktion, ...)
 - für verschiedene Jahreszeiten
- Datengenerierung für betriebswirtschaftliche Analyse
 - Betrachtung des Betriebsmodells
 - Betrachtung des Geschäftsmodells

Abbildung 64 zeigt die Struktur der simulativen Demonstration.

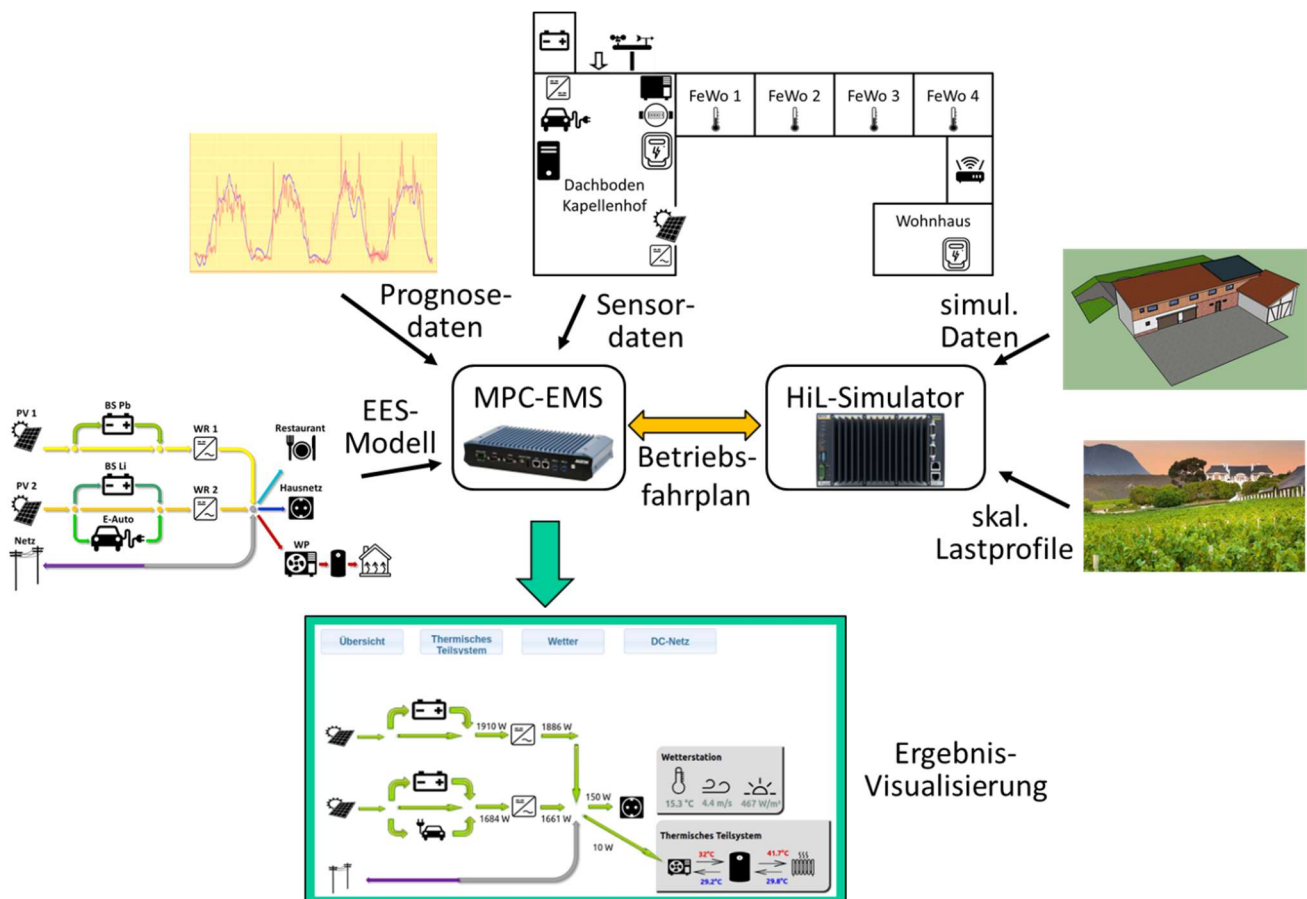


Abbildung 64: Struktur der HiL-simulativen Demonstration

Für die HiL-Simulation wurden folgende Szenarien und Parameter verwendet:

- Demonstrationsgebäude in Erfenbach als Basis (MPC-Prädiktionsmodell)
- Elektrische und thermische Modellierung der Energieflüsse
- Einbeziehung der Wärmepumpe und des Warmwasserspeichers
- Einbeziehung der Wetter- und Sensordaten
- Zusätzliche Abbildung des Gastronomiebetriebs mit skalierten realen Referenzdaten
- Zusätzliche Abbildung der Weinbauproduktion mit skalierten realen Referenzdaten
- Zusätzliche Abbildung der Lasten des privaten Wohnens mit skalierten realen Referenzdaten
- Zusätzliche Abbildung der Nutzung von E-Auto

- für drei typische Nutzungsperioden (Sommer, Herbst, Winter)

Die Referenzdaten stammen von zwei Mischnutzungsgebäuden in Weisenheim.

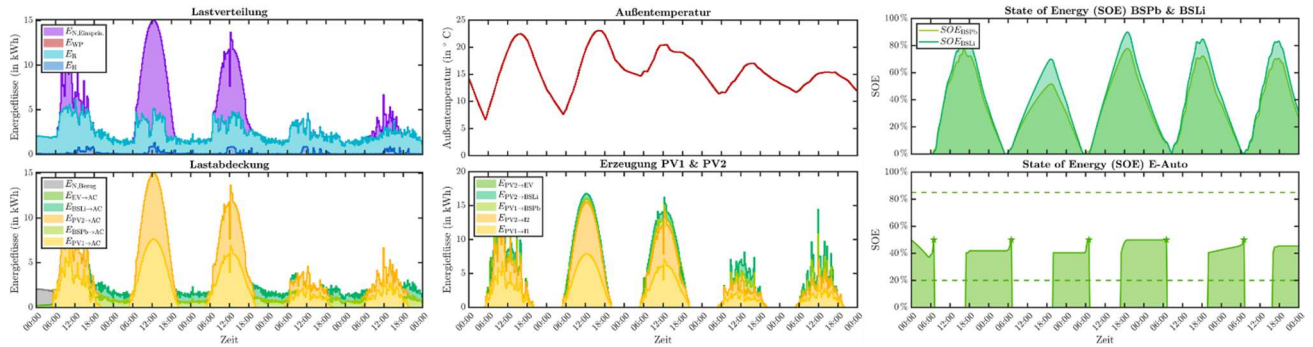


Abbildung 65: Sommertage (1.7. – 5.7.2023)

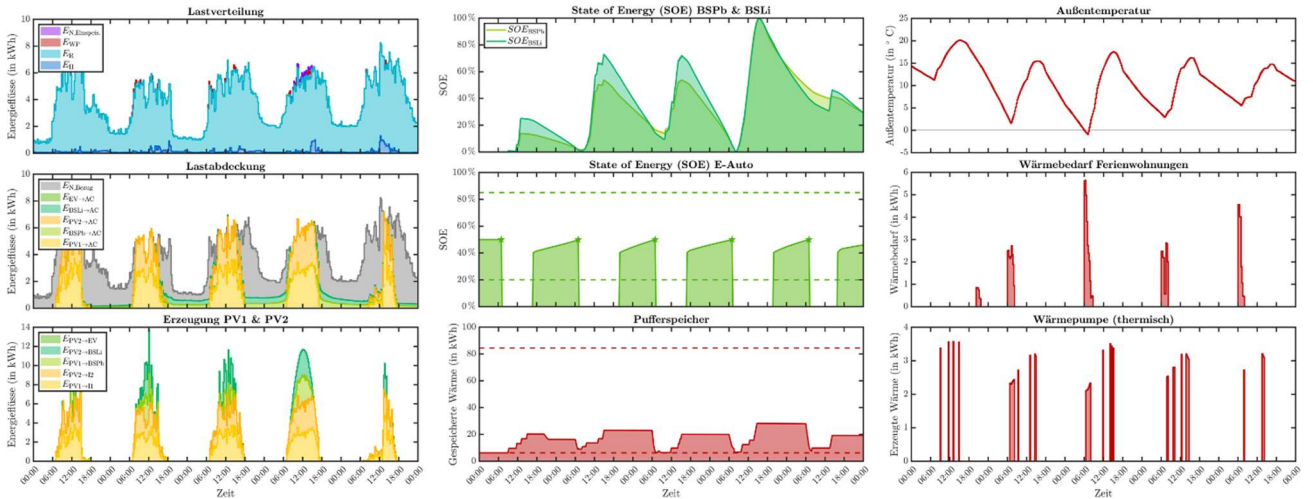


Abbildung 66: Herbsttage (30.9. – 4.10.2023)

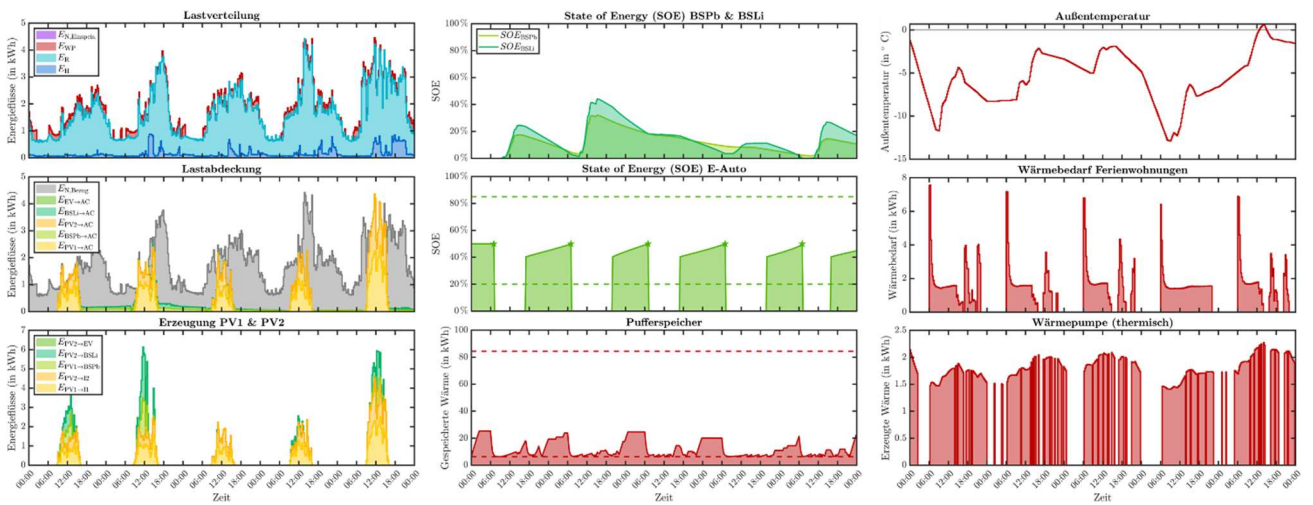


Abbildung 67: Wintertage (12.1. – 16.1.2024)

Abbildung 65 bis Abbildung 67 stellen exemplarische Simulationsergebnisse für Energieflüsse in verschiedenen Nutzungsperioden dar ($E_{N,Einspeis}$ = Einspeisung ins öffentliche Netz, E_{Bezug} = Bezug aus öffentlichem Netz, E_{WP} = Wärmepumpe, E_R = Restaurantbetrieb, E_H = Heizung, E_{PV1} = PV-Anlage 1, E_{PV2} = PV-Anlage 2, E_{BSPb} = Batteriespeicher aus Bleibatterien, E_{BSLi} = Batteriespeicher aus Li-Batterien, E_{EV} = E-Auto). In der Sommerperiode (hier mit Daten vom 1.7. – 5.7.2023) sind die hohen PV-Erträge deutlich erkennbar. Die Herbstperiode enthält an einzelnen Tagen die Weinproduktion (allerdings kaum ins Gewicht fallend). Im Winter sind dann die thermischen Energieflüsse deutlich sichtbar. Insgesamt bestätigen die Simulationsergebnisse, dass das entwickelte Konzept erfolgreich angewendet werden kann.

Zur Generierung der Daten für die betriebswirtschaftliche Analyse der gesamten Anlageneffizienz werden Daten über einen längeren Zeitraum (z. B. ein Jahr) benötigt. Dazu wurden ebenfalls diverse Simulationen durchgeführt. Abbildung 68 zeigt die dabei verwendete reduzierte Struktur (wegen der Datenmenge).

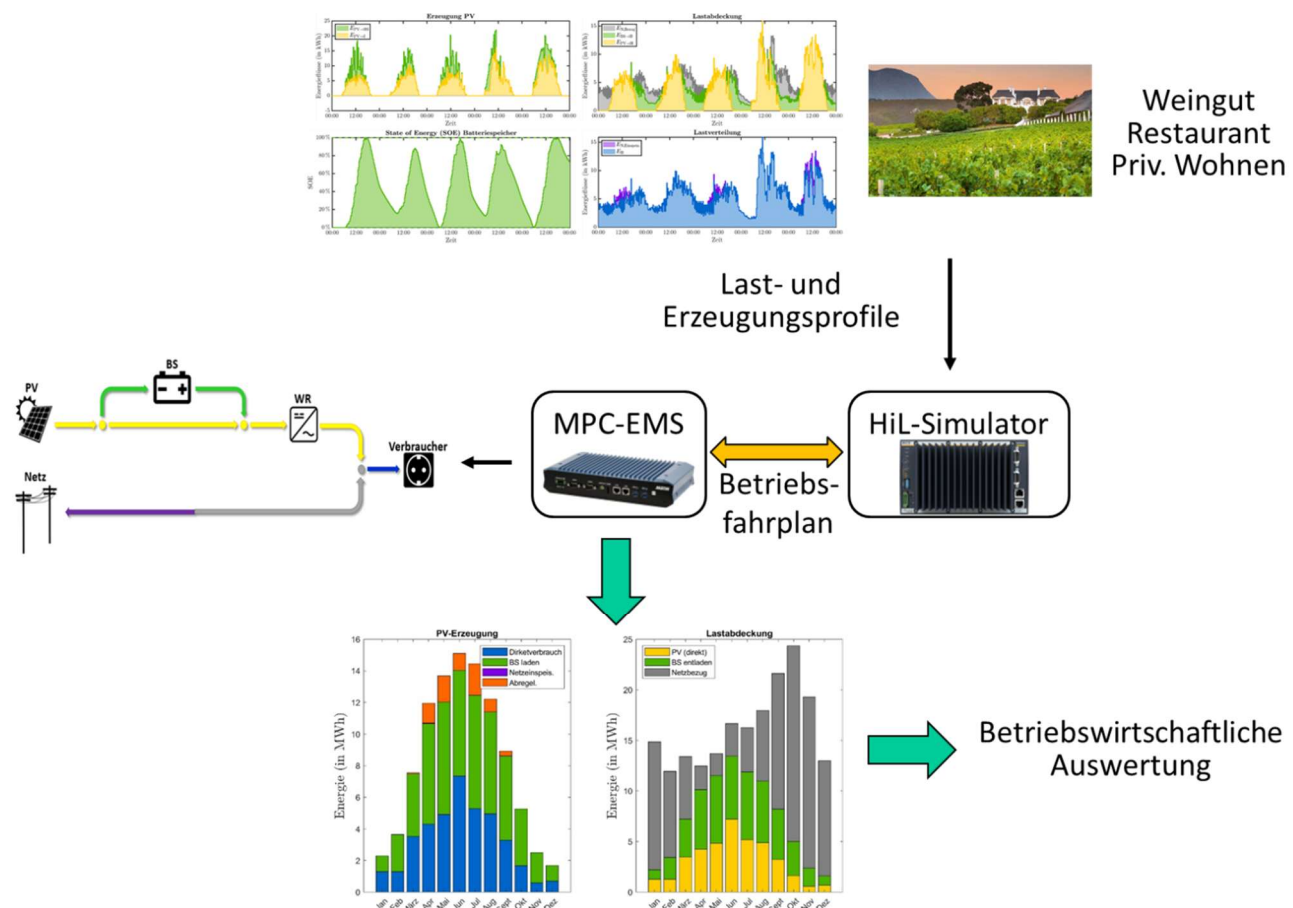


Abbildung 68: Simulation ganzjährigen Betriebs mit reduzierter Struktur

Entsprechende Daten wurden an Kafitz Immobilien weitergegeben, wo die betriebswirtschaftlichen Auswertungen durchgeführt wurden.

Reale Demonstration

Ziele der realen Demonstration sind

- Überprüfung der Funktionalität des bidirektionalen Ladens der Energiespeicher
 - Laden der Batteriespeicher durch PV-Anlage
 - Entladen der Batteriespeicher zur Einspeisung ins Hausnetz
- Überprüfung der Funktionalität des Second-Life-Batteriespeichers
 - Batteriecontainer
 - Lademanagement zur Balancierung der SoCs der unterschiedlichen Bleibatterien
 - Batteriemanagement
- Mess- und Kommunikationsnetzwerk
 - Einbindung der Sensoren und Aktuatoren über Modbus, WLAN und Ethernet
 - Industrie-PC als Mess- und Kommunikationszentrale (ioBroker zur Visualisierung)
- MPC-basiertes Echtzeit-Energiemanagement
 - Echtzeit-Messdatenverarbeitung
 - Laufende Einbindung der Wetterprognose
 - Steuerung der elektrischen Komponenten

Bevor die Demonstrationsmessungen präsentiert werden, werden im Folgenden alle wesentlichen technischen Komponenten, die für die reale Demonstration eingesetzt wurden, im Detail erklärt.

DC-Netz

Das für die Demonstration der Batteriespeicherung verwendete elektrische Teilsystem (DC-Netz) ist in Abbildung 69 schematisch dargestellt. Es wurden zwei Solarmodulstränge mit jeweils 14 Modulen und einem offenen Stromkreis von ca. 650 V verwendet. Die Module gehören zur Serie JAM72S10 von JA Solar. Zur Energiespeicherung wurden zwei Batteriebanken verwendet - eine bestehend aus 18 langlebigen Bleibatterien (12x Hoppecke „5 OPzV 250“ mit je 6 V und 250 Ah und 6x Banner „740 17“ mit je 12 V und 240 Ah) und einem im Rahmen des Projekts entwickelten Batteriemanagementsystem (BMS), wie in Abbildung 32 zu sehen ist, und eine bestehend aus einem handelsüblichen Lithium-Batteriepaket mit integriertem BMS von Hangzhou Huasu Technology Co. Das Bleibatteriepaket hat eine maximale Kapazität von 35 kWh (berechnet für fabrikneue Batterien) und das Lithium-Batteriepaket von 12,4 kWh. Für die bidirektionale Steuerung des Leistungsflusses zu und von den Batterien wurden zwei DC/DC-Wandler mit doppelter aktiver Brücke (DAB) entwickelt und gebaut. Als Schnittstelle zum Wechselstromnetz wurde ein Frequenzumrichter der Serie Sunny Tripower von SMA verwendet.

Um die beiden Solarstrings miteinander zu verbinden sowie auch Spannung und Strom zu messen, die von den Solarmodulen in das Gleichstromnetz eingespeist werden, wurde eine Gleichstrommessbox gebaut. Sie besteht aus einem Gehäuse, in dem ein Diodenblock, eine Stromversorgung und die Messplatine mit ihren Sensoren untergebracht sind (siehe Abbildung 69). Die beiden Solarstrings werden durch die Dioden miteinander verbunden und dann über einen Stromsensor an den Ausgang gesendet. Die Spannungen beider Strings werden gemessen und über die Platine auf Basis eines Raspberry Pi Pico über Modbus sowie Ethernet an das EMS gesendet.

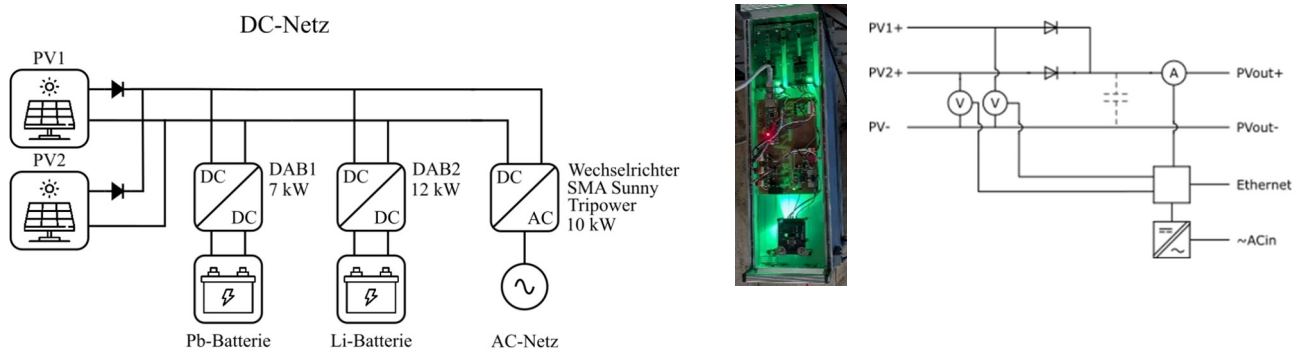


Abbildung 69: Struktur zur realen Demonstration der Energieerzeugung und -speicherung (links) und DC-Messbox (rechts)

Kommunikation

Ein Industrie-PC wird als zentrale Bedieneinheit für das Energiemanagementsystem verwendet. Die Kommunikation zwischen den einzelnen Geräten und dem zentralen Rechner erfolgt über MODBUS/TCP. Am zentralen Rechner läuft ein ioBroker-Server, der als MODBUS-Master und zur Datenerfassung dient. Abbildung 70 zeigt unterschiedliche MODBUS-Geräte, auf die das EMS in Echtzeit Zugriff für Steuerung und Datenerfassung hat.

Instanz	Status	Gerät	Speicher
modbus.0	●	Modbus_Gateway_1	988.48 MB
modbus.1	●	Modbus_Serial	
modbus.2	●	Modbus_WP	600.79 MB
modbus.3	●	Modbus_Gateway_2	701.13 MB
modbus.4	●	Modbus_WR_links	150.87 MB
modbus.5	●	Modbus_WR_rechts	409.2 MB
modbus.6	●	Modbus PV Sensor	358.45 MB
modbus.7	●	Modbus Tempsensor Kueh...	78.25 MB
modbus.8	●	Modbus BMS	70.14 MB
modbus.9	●	Modbus DC/DC	71.77 MB
modbus.10	●	Modbus SMA Data Manager	598.68 MB
modbus.11	●	ModBus	
modbus.12	●	BMS Lithium-Batterie	41.95 MB
modbus.13	●	Modbus LI DC/DC	66.8 MB
shelly.0	●	Shelly	129.95 MB
sql.0	●	SQL-Protokollierung	101.39 MB
vis.0	●	Visualisierung	

Abbildung 70: Screenshot des webbasierten Datenbrokers ioBroker

DC/DC-Wandler

Ein zentrales Element des aktiven Energiemanagementsystems ist die Nutzung der Batteriespeicher, wofür von der Zentraleinheit aus frei ansteuerbare DC/DC-Wandler im DC-Netz benötigt werden. Es wurden zwei galvanisch isolierte bidirektionale DC/DC-Wandler (IBDC) entworfen und gebaut, einer für jeden Batteriesatz. Die gewählte Topologie ist die Dual Active Bridge (DAB), die eine präzise Steuerung des Leistungsflusses ermöglicht und gleichzeitig große Spannungsunterschiede zwischen Eingang und Ausgang zulässt. Die beiden DABs haben das gleiche Design, dessen Blockschaltbild in Abbildung 71 zu sehen ist. Ein zentraler Controller mit der Mikroprozessoreinheit (MCU) TMS320F28379D von Texas Instruments steuert den Regelalgorithmus (zur Steuerung des Leistungsflusses und der Spannung), die Zustandsmaschine (für Vorladung, Entladung, Schutz usw.), einen MODBUS-Slave (für Fernsteuerung, Datenerfassung und Grenzwerteinstellung) und einen Request-Processor-Server, ein im Lehrstuhl LRS entwickeltes Framework für Remote Procedure Calls, das zur Ausgabe von Befehlen und zum Abrufen von Messwerten über Ethernet verwendet wird. Die wichtigsten Spezifikationen und Parameter der beiden DABs sind in Tabelle 10 aufgeführt.

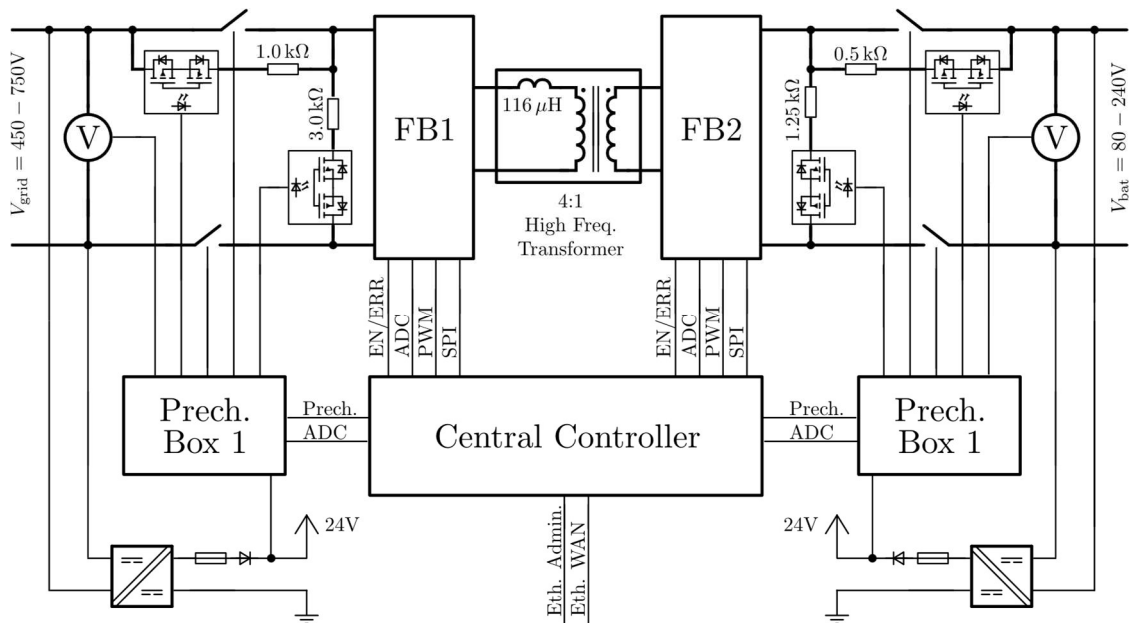


Abbildung 71: Blockschaltbild des DAB-Wandlers für den Blei-Batteriespeicher. Mit Ausnahme der geänderten Werte gemäß Tabelle 10 ist der DAB-Wandler für den Lithium-Batteriespeicher identisch.

Der DAB kann in zwei Modi betrieben werden: „Grid following“ und „Grid forming“. Im ersten Fall arbeitet der DAB als Leistungsflussregler zwischen Bus und Batterie, wobei er einfach die Spannung verwendet, die auf dem Bus und der Batterie anliegt (mit Ausnahme von Spannungen, die außerhalb der Grenzwerte liegen). Im zweiten Fall regelt der DAB die Spannung auf dem Bus und speist oder entnimmt dem Bus die dafür erforderliche Leistung (wiederum innerhalb der zulässigen Grenzen). Die Steuerung und der dynamische Regler wurden im Simulationssystem PLECS der Fa. Plexim entworfen und simuliert, mit anschließender C-Code-Generierung für den Einsatz auf der TI-MCU.

Tabelle 10: Parameter des DAB-Wandlers

	Demonstrator 1 Second-Life Lead Acid	Demonstrator 2 Lithium Battery
DC Grid Voltage	450 – 750 V	450 – 750 V
Battery Voltage	80 – 240 V	300 – 345 V
Rated Power	7 kW	12 kW
Max battery current	30 A	35 A
Transformer Ratio	4:1	12:7
Leakage Inductance	116 μ H	49 μ H
Switching Frequency	50 kHz	50 kHz

Der vollständig montierte DAB-Demonstrator 1 ist in Abbildung 72 zu sehen. Das Gehäuse wurde aus Aluminiumprofilen gebaut, mit Seitenwänden aus Acrylglas und einer Frontplatte aus gebogenem Stahl, durch die die Schnittstellen geführt werden.



Abbildung 72: Vollständig montierter DAB-Demonstrator 1 a), Abmessungen: 90 x 71 x 51 cm, mit entwickelten und getesteten internen Komponenten b) – m).

Das Vollbrückenmodul ist in Abbildung 72b) dargestellt. Diese Platine enthält die 4 MOSFETs der Vollbrücke, ihren Kühlkörper mit aktiver Kühlung, die Zwischenkreiskondensatoren, Sensoren zur Messung von Gleich- und Wechselstrom und Gleichspannung, ein Netzteilmodul (siehe Abbildung 72h), ein Motortreibermodul für den Lüfter auf dem Kühlkörper (siehe Abbildung 72i), ein Temperaturmessmodul zur Erfassung der Kühlkörper- und Umgebungstemperatur (siehe Abbildung 72j) und 4 MOSFET-Treibermodule (siehe Abbildung 72g). Diese Platine wird von der zentralen Reglerbaugruppe in Abbildung 72c) gesteuert.

Die in Abbildung 72c) gezeigte Controller-Baugruppe besteht aus der Schnittstellenplatine (unten auf der Baugruppe) mit Puffern für die Signale (analog und digital) und RJ45-Steckverbindern zur Verbindung mit den beiden Vollbrückenmodulen. Auf der Schnittstellenplatine befindet sich die Controller-Platine (Platine mit den Elektrolytkondensatoren, der Sicherung und der Blockklemme), die über eine Stromversorgung und Verbindungen für die Prozessoren verfügt. Auf der Controller-Platine befinden sich die TMS320F28379D-MCU-Evaluierungsplatine von Texas Instruments (rote Platine) und die W5500-Platine ETH WIZ CLICK von MikroE für die Ethernet-Schnittstelle (kleine, grüne Platine mit dem RJ45).

Das Vorladen, Entladen und die Spannungsmessung werden vom Vorladungssteuerungsmodul durchgeführt, das in Abbildung 72d) zu sehen ist. Diese Platine verfügt über 24-V-Ausgänge für Hochleistungsrelais und Glasfaserausgänge zur Steuerung der Halbleiterrelais.

Die Messung der Spannung vor den Relais erfolgt mit dem in Abbildung 72e) gezeigten Spannungsmessmodul. Diese Platine verwendet einen LEM LV25-P-Spannungssensor und ist mit dem Vorladungssteuerungsmodul aus Abbildung 72d) verbunden.

Das Solid-State-Relais in Abbildung 72f) wird zum Vor- und Entladen verwendet. Diese Platine kann je nach bestückten MOSFETs bis zu 900 V schalten und akzeptiert als Eingang Glasfaser, Koaxialkabel oder einfache Drahtverbindung.

Die in den Vollbrückenmodulen verwendeten MOSFET-Treiber sind in Abbildung 72g) zu sehen. Die Platine wurde um den SiC-Treiber-IC 1ED3124MU12FXUMA1 von Infineon und das RKZ-242025D-Netzteilmodul von Recom mit einer Isolationskapazität von 15 pF (wichtig für die Ansteuerung von SiC-MOSFETs) entworfen.

Die in Abbildung 72h) gezeigte Stromversorgungseinheit wird in fast allen Modulen des DAB verwendet. Sie akzeptiert einen 24-V-Eingang, der gefiltert und mit einer Crowbar-Schaltung, einer rückstellbaren Sicherung und einer TVS-Diode geschützt ist und am Ausgang über 2,54-mm-Stiftleisten bereitgestellt wird. Sie gibt außerdem 3,3 V und 5 V an Schienen aus, die gefiltert und durch TVS-Dioden geschützt sind.

Abbildung 72i) zeigt das Motortreibermodul, das zur Steuerung des Lüfters auf dem Kühlkörper des Vollbrückenmoduls verwendet wird. Es unterstützt die PWM-Modulation der Ausgangsspannung und kann Motoren mit bis zu 2 W antreiben.

Abbildung 72j) zeigt das Temperaturmessmodul, das auf dem Vollbrückenmodul verwendet wird. Es verwendet zwei NTC-Sensoren zur Messung der Kühlkörper- und Umgebungstemperatur und verfügt über zwei ADCs, auf die der zentrale Controller über SPI zugreift.

Das DAB wird direkt vom Bus oder von der Batterie versorgt, ohne dass eine zusätzliche Stromversorgung zur Verfügung steht. Um es von der Batterieseite aus zu versorgen und gleichzeitig den weiten Spannungsbereich der Bleibatterie von 80 bis 240 V zu unterstützen, wurde ein Netzteilmodul mit dem isolierten DC/DC-Wandler BPM2417SJ von Tamura entwickelt. Diese Platine ist in Abbildung 72k) zu sehen und liefert 24 V bei bis zu 40 W.

Die Transformatoren wurden von der Schmiedbauer Transformatoren und Gerätebau GmbH nach Maß mit integrierten Induktoren gebaut. Es wurden zwei Modelle gebaut, deren Spulenverhältnis und Streuinduktivität Tabelle 10 entsprechen, deren Leistung jedoch reduziert wurde: 12 kVA für den 7-kW-DAB und 20 kVA für den 12-kVA-DAB. Ein Beispiel ist in Abbildung 72l) zu sehen.

Während des Betriebs wurde die Notwendigkeit einer EMI-Filterung offensichtlich, für die der in Abbildung 72m) gezeigte Filter entworfen und gebaut wurde. Der Entwurf ist ein Π -Filter mit einer gemeinsamen Drossel, mit einer Dämpfung von 40 dB bei der Schaltfrequenz von 50 kHz.

Für den Einsatz der DAB-Wandler im EMS muss zunächst auf einer höheren Ebene eine remote-einstellbare Steuerung realisiert werden. Bei der entwickelten Steuerung für den DAB-Wandler handelt es sich um einen Endlichen Zustandsautomaten (FSM), siehe Abbildung 73, der notwendig ist, um die von der Zentraleinheit (MPC) gesendeten Messungen und Befehle, entweder von MODBUS oder vom Request Processor, zu interpretieren und den DAB-Wandler in den gewünschten Betriebsmodus zu bringen (Reset, Netzverfolgung, Netzbildung, Leerlauf usw.), wobei bei Bedarf spezifische Verfahren durchlaufen werden (Vorladung, Hochfahren von Sollwerten oder Arbeitszyklen, Warten auf das Erreichen eines bestimmten Messwerts usw.). Eine weitere wichtige Aufgabe ist die Fehlererkennung, nach der das System in einen sicheren Zustand gebracht werden muss. Auch dieser FSM wurde mit Simulation in PLECS entworfen und validiert. Anschließend wurde C-Code generiert, der auf der MCU implementiert wurde. Das Ablaufdiagramm des FSM ist in Abbildung 23 zu sehen. Obwohl es viele Unterzustände gibt, wurden einige Schlüsselzustände identifiziert, gekennzeichnet und an die Überwachungsebene weitergeleitet, um dem Benutzer den aktuellen Status des Zustandsautomaten zu übermitteln (siehe Tabelle 11).

Tabelle 11: Hauptzustände des FSM, die für den Benutzer verfügbar sind

State Name	#	Description
eStateReset	0	Reset state, discharged, waiting for enable command
eStateError	1	Measurements out of limits or pre-charge failed. To clear the errors, the converter must be disabled and enabled again.
eStateDisch	2	Discharging capacitors.
eStateGFollPrech	3	Pre-charging to enter grid following mode.
eStateGFollIdle	4	Idling in grid following mode. Waiting for reference tracking command.
eStateGFollRefTrack	5	Tracking (power) reference in grid following mode.
eStateGFormPrechBatt	6	Pre-charging the battery side to enter grid forming mode.
eStateGFormPrechIdle	7	Pre-charged on the battery side, but not on the grid side in grid forming mode.
eStateGFormingPrechGrid	8	Pre-charging the grid side to enter grid forming mode.

eStateGFormingDischGrid	9	Discharging the grid side to enter idle in grid forming mode.
eStateGFormingRefTrack	10	Tracking (voltage) reference in grid forming mode.

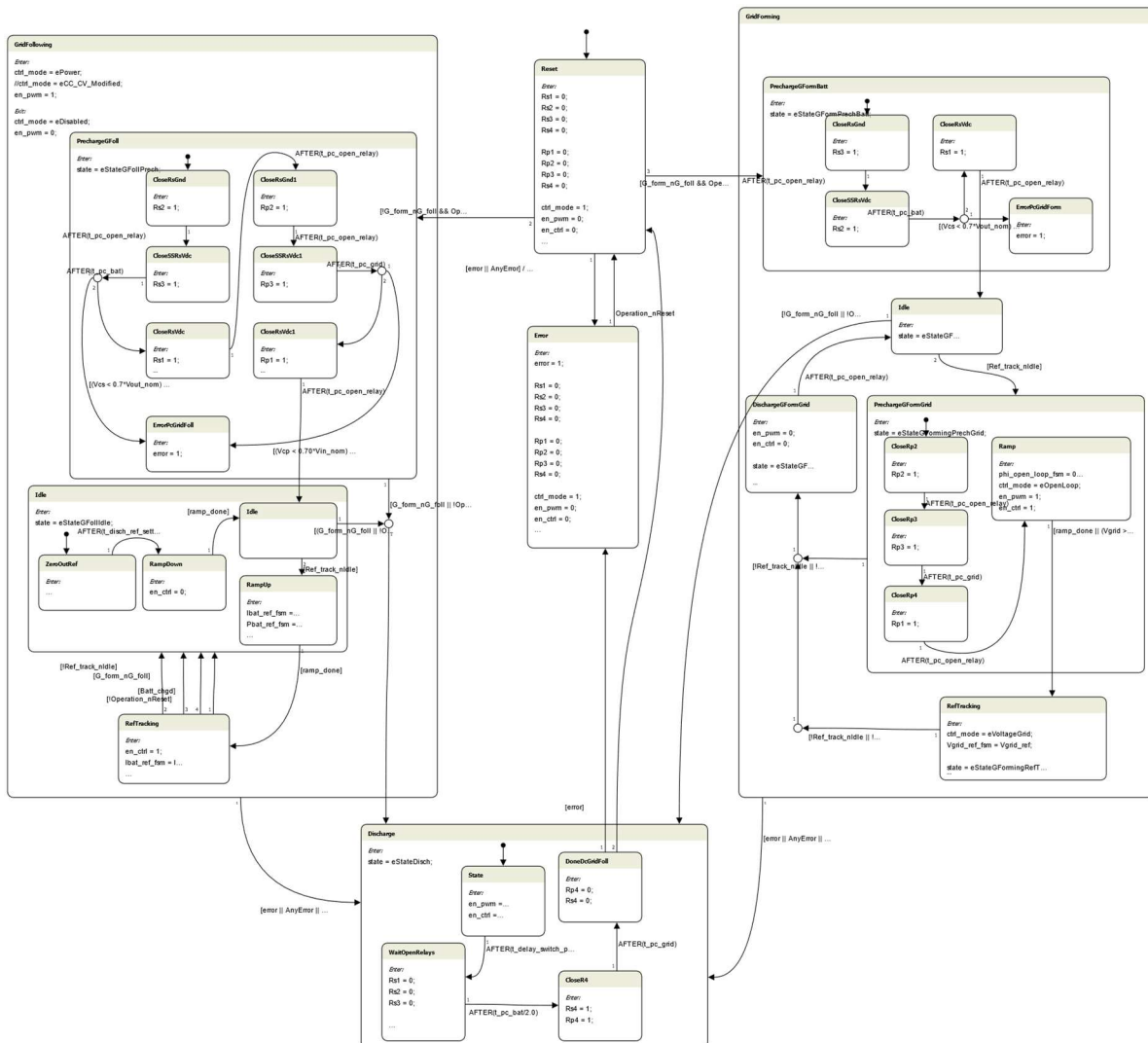


Abbildung 73: Struktur des FSM des DAB in PLECS.

Neben der beschriebenen Steuerung muss auf der unteren Ebene auch eine Regelung des Lade- bzw. Entladebetriebs implementiert werden, die die Leistungselektronik der DAB-Wandler direkt ansteuert. Wie bereits vorher erwähnt, verfügt die DAB-Regelung über zwei Betriebsmodi: Netzfolgebetrieb (Grid-following control) und Netzbildetrieb (Grid-forming control). Beim Grid-following-Betrieb wird die Leistungsübertragung zwischen Batterie und Bus geregelt, wobei positive Leistung die Batterie lädt und negative Leistung den Bus speist. Beim Grid-forming-Betrieb wird die Spannung am Bus geregelt. Während der Inbetriebnahme hat sich allerdings gezeigt, dass der ebenfalls am DC-Netz operierende Solarwechselrichter SMA Tripower einen Betriebsfehler generiert, wenn die DABs im Grid-forming-Betrieb arbeiten, da die interne MPPT-Regelung des Solarwechselrichters dann nicht mehr richtig funktioniert. Aus diesem Grund müssen die DAB-Wandler im Grid-following-Modus betrieben werden, der im Folgenden kurz beschrieben wird.

Für das Laden bzw. Entladen der Batterien wird in der DAB-Steuerung dann der Regelungsalgorithmus „CC/CV Control of Battery Current“ aktiviert. In diesem Modus wird die Leistungsreferenz durch Division durch die Batteriespannung in eine Stromreferenz umgewandelt. Anschließend wird eine Zustandsregelung verwendet, um den Controlled Current (CC) Modus zu realisieren. Ein Vorteil der Zustandsregelung besteht darin, dass sie keine Reglernullstelle einführt, wie dies bei einem regulären PI-Regler der Fall wäre.

Bei der geregelten Spannung (CV) wurde anstelle des herkömmlichen überlagerten Spannungsregelkreises mit einem internen Stromregelkreis, der normalerweise in Batterieladegeräten zu finden ist, die Spannungsbegrenzung auf eine Weise erreicht, die einem Anti-Windup mit Rückführung für einen Integrator ähnelt. Das heißt, die Batteriespannung wurde durch einen Sättigungsblock geleitet und vom Sättigungswert abgezogen. Wenn die Spannung innerhalb des Bereichs liegt, hat dieser Zweig keine Auswirkung. Wenn die Spannung über den Grenzwert steigt, tritt Sättigung auf und der Stromreferenzwert wird abgezogen. Um Drift zu verhindern und die Einheiten anzupassen, wird die überschüssige Spannung durch eine Verstärkung und einen Integrator geleitet. Die Regelungsstruktur ist in Abbildung 74 dargestellt.

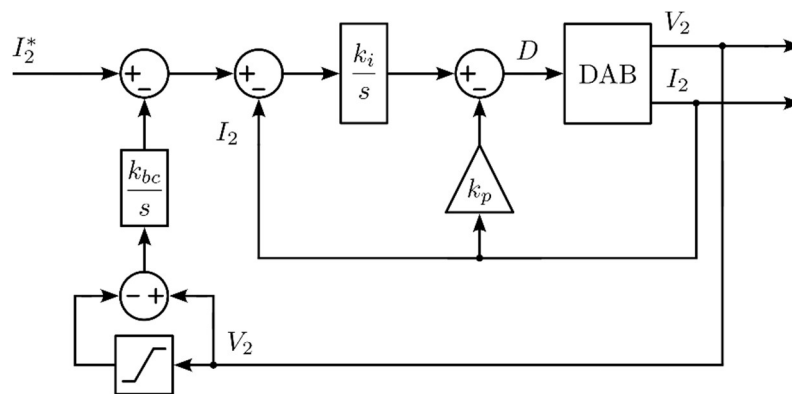


Abbildung 74: Struktur für die modifizierte CC/CV-Regelung von I_2 .

Das DAB verwendet Ethernet, um Befehle zu empfangen und Alarmer und Messungen auszugeben. Zu diesem Zweck werden zwei Schnittstellen implementiert und verwendet: der Industriestandard MODBUS/TCP oder der selbst entwickelte Request Processor, eine Befehlszeilenanwendung und ein Server auf der MCU-Seite, der für den Remote Procedure Call verwendet wird. Während die MODBUS/TCP-Variante direkt in die ioBroker-Anwendung eingebettet werden kann, die webbasiert ist und auf dem zentralen Industrie-PC läuft, bietet das entwickelte Request Processor-Framework einen Python-basierten Client und wird vorzugsweise für das Debugging verwendet und ermöglicht dem Benutzer den Zugriff auf Low-Level-Befehle. Eine ausführlichere Beschreibung der Details zur Kommunikation würde den Rahmen des vorliegenden Berichtes sprengen und wird daher nicht weiter verfolgt.

Solar-Wechselrichter

Grundsätzlich kann der SMA-Solar-Wechselrichter in das Energiemanagementsystem eingebunden werden und Diagnosedaten können über den SMA Data Manager, der eine webbasierte Schnittstelle bietet, verifiziert werden. Beispiele hierfür sind in Abbildung 75 zu sehen.

Allerdings hat sich bei der Inbetriebnahme gezeigt, dass leider einige Konfigurationen nicht über MODBUS verfügbar sind und nur über den SMA Data Manager aufgerufen werden können. Unter anderem ist der für den automatisierten Betrieb des MPC-basierten EMS wichtige Modus der Energieeinspeisung ins Hausnetz leider nur über den SMA Data Manager möglich. Da dieser Modus dann nur manuell über das SMA-Portal eingestellt werden kann, ist ein automatisiertes Umschalten vom EMS aus nicht möglich, wodurch eine Demonstration des Online-Betriebs des EMS für diesen Modus auch nicht realisiert werden kann. Somit konnte der automatisierte Betrieb des MPC-EMS nur für die Steuerung des DC-Netzes, d.h. das Laden und Entladen von Batteriespeichern, demonstriert werden.

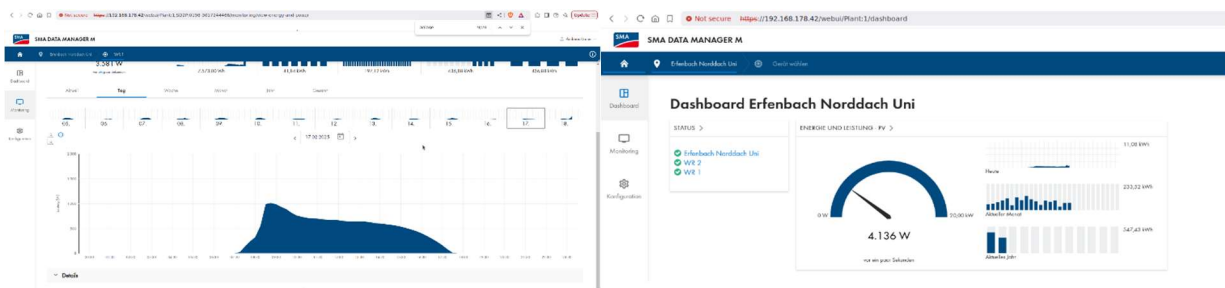


Abbildung 75: Leistungsfluss im Betriebsmodus 1 an einem normalen Wintertag (links) und Echtzeit-Leistungsfluss im Betriebsmodus 1 an einem sonnigen Wintertag (rechts)

Bleibatterie-BMS

Wie in Abschnitt 2.3.2 erläutert, besteht das Batteriemanagementsystem BMS für den Blei-Batteriespeicher in einer hierarchischen Regelungsstruktur: jede einzelne Batterie wird lokal mit einem Slave-Board sowie einem Spannungsbalancierungsblock ausgestattet. Damit werden der Ladezustand sowie Ladestrom jeder Batterie fortlaufend erfasst, Fehlersituation detektiert und entsprechende Meldungen über einen lokalen Bus an die Master-Einheit gemeldet. Diese erhält Befehle vom bidirektionalen DC/DC-Wandler, verarbeitet in einem Regelungsalgorithmus die von den Slaves gemeldeten Batteriezustände und sorgt für eine stetige Balancierung innerhalb des gesamten Batteriespeichers. Die zur Demonstration verwendete Beschaltung des BMS zeigt Abbildung 76.



Abbildung 76: Blei-Batteriebank mit BMS. Links: Master-Schaltung, rechts: Slave-Schaltung mit Spannungsbalancierung

Messungen der realen Demonstration

Nachdem nun alle in der realen Demonstration verwendeten Komponenten erklärt worden sind, werden im Folgenden die Demonstrationsmessungen vorgestellt. Fünf verschiedene Betriebsmodi werden durch das EMS gesteuert in einer zeitlichen Reihe hintereinander demonstriert. In Betriebsmodus 1 wird die gesamte Solarleistung direkt über den Solarwechselrichter ins Hausnetz gespeist, um den Bedarf dort zu decken (oder ggf. auch ins öffentliche Netz zu transferieren). Die Energiespeicher bleiben unbeteiligt. Betriebsmodus 2 zeigt die Situation, wenn ein Teil der Solarleistung in den Blei-Batteriespeicher gespeist wird. Da die Aufnahmefähigkeit des Batteriespeichers abhängig vom Batterie-SOC begrenzt ist, erfolgt die Einspeisung der restlich verfügbaren Solarleistung ins Hausnetz. In Betriebsmodus 3 wird neben der gesamten Solarleistung auch ein Teil der Pd-Batterieleistung ins Haus zur Deckung des Bedarfs gespeist. Betriebsmodus 4 zeigt das Laden der Li-Batterie mit einer konstanten Leistung von zunächst ca. 2,5 kW (fast die komplette Solarleistung zu diesem Zeitpunkt) im CC-Betrieb (constant current operation). Nach einigen Minuten wird die maximale erlaubte Ladespannung des Li-Batteriespeichers erreicht. Das Ladegerät schaltet daher zum weiteren Laden in den CV-Betrieb (constant voltage operation) mit eingeschränkter Ladeleistung. Die nun übriggebliebene Solarleistung wird ins Hausnetz gespeist. Betriebsmodus 5 stellt das Entladen vom Li-Batteriespeicher (mit einer vom EMS vorgegebenen Leistung von 1 kW) dar. Zusammen mit der Solarleistung wird nun die Energie ins Haus geliefert.

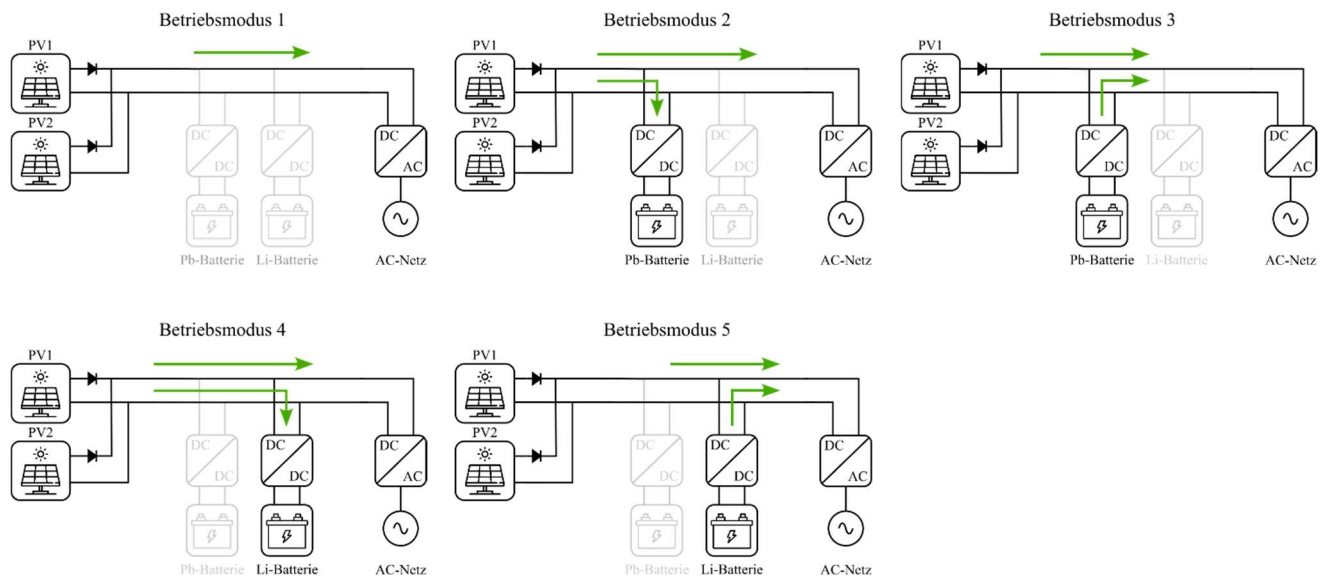


Abbildung 77: Demonstrierte Betriebsmodi mit zugehörigen Energieflussrichtungen

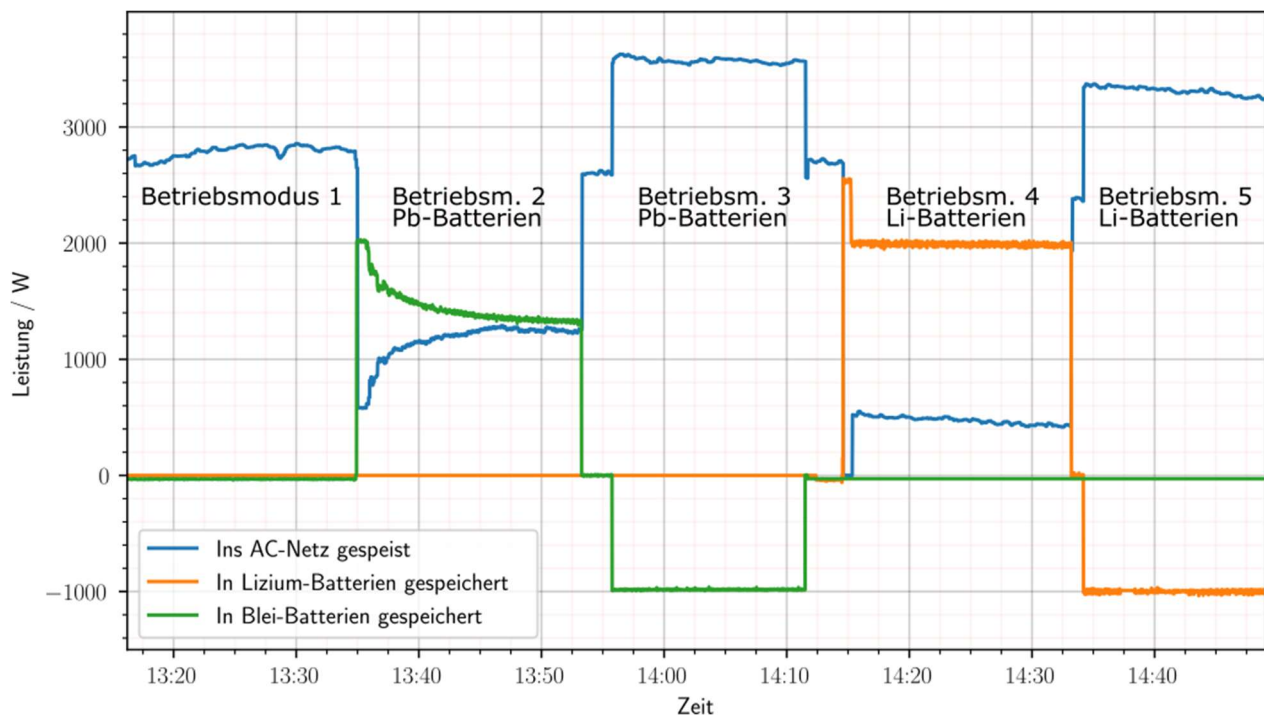


Abbildung 78: Gemessene elektrische Leistungen während der Demonstration

Alle vorgesehenen Komponenten und Systeme, einschließlich Photovoltaikanlage, Batteriespeicher, Wärmepumpen, Heiz- und Kühlsysteme sowie Elektrofahrzeug-Ladestationen, wurden erfolgreich implementiert und in Betrieb genommen. Die messtechnische Validierung umfasste verschiedene Messungen und Datenaufzeichnungen, um die Leistungsfähigkeit und Effizienz der Systeme zu überprüfen. Dabei wurden sowohl elektrische als auch thermische Energieflüsse sowie die

Integration der verschiedenen Energiesysteme berücksichtigt. Die erfassten Daten wurden umfassend ausgewertet, um die Ergebnisse der Demonstration zu analysieren und Optimierungspotenziale zu identifizieren.

Jedoch war das Objekt nicht vollständig im Sinne einer Mischnutzung im Betrieb, da die Ferienwohnungen nicht dauerhaft belegt bzw. bewohnt waren und die Gastronomie sowie die Brennerei aufgrund der aktuellen wirtschaftlichen Lage nach der Corona-Pandemie noch leer stehen.

Beitrag von IS Predict

Die KI-Prognoseservices für PV-Stromerzeugung für das Demogebäude (zwei PV-Anlagen) wurden in der Online-Architektur in Betrieb genommen, getestet und validiert.

- Genauigkeit
Die Genauigkeit belief sich auf über 90% (15-Minuten-Intervall; Abweichung berechnet mit mittlerer absoluter Abweichung in Prozent (PMAD)).
Diese Genauigkeit war mehr als ausreichend.
- Prognosehorizont
Benötigt wurden die 15-Minuten-Prognoseintervalle für die nächsten 24 Stunden. Aufgrund der vorhandenen Wettervorhersagedaten wurden die Prognosen für die nächsten 45 Stunden errechnet.
- Performance
Eine REST-Anfrage wurde in 2 Sekunden bearbeitet mit Long Short-Term Memory Models. Diese Performance war mehr als ausreichend.

Beitrag von Kafitz Immobilien

Eine Projekthomepage wurde durch eine Werbeagentur erstellt. Diese zeigt einen genauen Einblick in alle Bereiche des Projekts. Die Partner werden vorgestellt, ebenso die Arbeitspakete und die Zielsetzung. Das Budget für die Homepage hat nicht ausgereicht, da die Grafiken aus der Projektskizze nicht kompatibel mit dem Layout der Homepage waren und somit komplett neu erstellt werden mussten durch die Werbeagentur Antares. Dadurch ist der Aufwand und das Budget über die beantragte Summe gestiegen.

2.5 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Personalkosten wurden weitgehend wie geplant eingesetzt, um den Projekterfolg zu gewährleisten. Aufgrund der sich abzeichnenden Verzögerungen im Projektablauf wurden allerdings auch im geringen Umfang Mittel umgeschichtet (vor allem durch Verzicht auf Reisen-, Workshop- und teilweise auch Investitionsmittel), um die kostenneutrale Projektverlängerung zu ermöglichen. Weitere Auskünfte hierzu sind im Erfolgskontrollbericht und im Verwendungsnachweis aufgeführt.

IS Predict

Aufgrund der verzögerten Datenlieferung wurde erst später als geplant intensiv an dem AP 1.2 Predictive Intelligence gearbeitet. Aufgrund der Projektverlängerung konnten die relevanten Arbeiten abgeschlossen werden, so dass die Personalkosten sehr nah an der ursprünglichen Planung abgerufen wurden.

Dali Solarpower

Die Personalkosten sind etwas höher ausgefallen im letzten Halbjahr als geplant, da der Firma Immobilien Kafitz bei der Auswertung der PV-Daten und der folgenden Erstellung des Wirtschaftlichkeitsmodell geholfen wurde. Die größten Ausgaben während der Projektlaufzeit waren der Batteriecontainer mit einer Summe von 4822,95 € und die Wetterstation in Höhe von 2351,80 €.

Immobilien Kafitz

Die Personalkosten sind durch mehrere Faktoren geringer ausgefallen. Zum einen wurde die rechtliche Betrachtung des Mieterstrommodells ausgelassen, da hierzu die Gesetzeslage noch nicht klar ist. Außerdem wurde durch die Simulation des Projektpartners LRS viel Arbeit am Beispielobjekt und folglich auch Arbeitszeit zur Auswertung der Ergebnisse am Kapellenhof erspart. Die Homepage wurde teurer als zuvor beantragt, da es Probleme mit den Formatierungen gab. Vieles, was bereits an Grafiken und Unterlagen vorlag, musste neu erstellt werden, da das uns vorliegende Format nicht kompatibel war.

2.6 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

RPTU/LRS:

Das Hauptziel des gesamten Verbundprojektes war die Entwicklung eines MPC-basierten Energiemanagementsystems u. a. unter Nutzung von Elektrofahrzeugen und Second-Life-Batterien. Insofern waren die durchgeführten Arbeiten, nämlich die Entwicklung des MPC-Algorithmus und der bidirektionalen Ladegeräte inkl. Batteriemanagement für die Zielerreichung essentiell notwendig. Gegenüber der Projektplanung ergaben sich bei der praktischen Realisierung, teilweise auch in Folge der durch die Corona-Krise ausgelösten Materiallieferschwierigkeiten, deutliche zeitliche Verzögerungen und Mehraufwände. Die geleistete Forschungs- und Entwicklungsarbeit, insbesondere auch ermöglicht durch eine konstenneutrale Laufzeitverlängerung, war daher auch angemessen, um am Ende alle wesentlichen Projektziele zu erreichen.

RPTU/GST

Die innerhalb des Projekts durchgeführten Arbeiten waren zur Erreichung der vorher definierten Ziele notwendig. Mit dem Gebäudemodell und den weiteren thermischen Modellen konnten auf Simulationsebene erste Erkenntnisse über die Kennwerte des Gesamtsystems und zudem Zusammenhänge zwischen Innentemperatur, Energiebedarf und Effizienz gewonnen werden. Durch die anschließende Validierung des Gebäudemodells, die sich auf zahlreiche Messwerte bezieht, die vor Ort aufgezeichnet wurden, konnte zudem bestätigt werden, dass sich das thermische Modell zur Abbildung des realen Gebäudeverhaltens eignet. Die ursprünglich geplante Anbindung des

Regelungssystems aus AP 1.3 konnte aufgrund von Verzögerungen im entsprechenden Arbeitspaket nicht durchgeführt werden.

Dali Solarpower

Als Erbauer und Betreiber von PV-Anlagen ist das Ziel die produzierte Energie sinnvoll zu nutzen. Dies impliziert unter anderem die Steigerung der Eigenverbrauchsquote und die optimale Aufteilung des produzierten Stroms. Eine solch optimierte Nutzung steigert folglich die Rendite. Um ebenfalls Bauern bestmöglich zu beraten und das beste Produkt zu liefern, ist es nötig, neue Modelle zu erforschen und in die Beratung aufzunehmen. Neue Alternativen werden oftmals benötigt, da der Netzausbau in ländlichen Regionen nicht stark gefördert wird und häufig der Bau einer größeren PV-Anlage somit nicht möglich ist, da das Stromnetz bei zu großer Einspeisung überlastet wäre. Bisher gab es die Möglichkeit, ein Trafohaus zu kaufen. Diese sind jedoch teuer in der Anschaffung und haben eine lange Lieferzeit. EnerReg bietet eine neue Alternative, um größere PV-Anlagen attraktiver zu machen.

Kafitz Immobilien

Die Energiekosten sind in den letzten Jahren enorm gestiegen. Enpal, eines der größten deutschen Unternehmen im Bereich Solaranlagen und Wärmepumpen, berichtet über eine Steigerung der Strompreise von über 43 Prozent im Zeitraum 2021 bis 2023. Für Unternehmen mit hohem Stromverbrauch kann dies ein Grund zur Schließung sein. Die Rentabilität des Unternehmens ist durch so drastisch steigende Energiekosten viel geringer. Allerdings braucht ein Weinbauer zum Beispiel Strom zur Herstellung des Weins. Da er also nicht darauf verzichten kann und trotzdem wirtschaftlichen Erfolg verzeichnen will, ohne die Preise zu verdoppeln, braucht es eine Alternative. Ein Hof, welcher sich energetisch nahezu selbst versorgen kann und nur noch wenig Strom einkaufen muss, hat einen deutlichen Kostenvorteil. Die Verkaufspreise seiner Produkte bleiben folglich niedriger als bei anderen Anbietern. Der Endkunde wählt diese Variante, möglicherweise sogar aus dem Aspekt der umweltbewussten Herstellung des Produkts. Für Unternehmen im landwirtschaftlichen Bereich war es wirtschaftlich höchste Zeit, dass ein solches Projekt durchgeführt wurde.

IG-CP

Inhaltlich konnte trotz der Einschränkungen seitens der Energieversorgungsunternehmen, denen die Forschung immer vorausgeht, ein praxistaugliches Energiemanagementkonzept entwickelt und erfolgreich übertragen werden. Hinsichtlich des Finanzierungsbedarfs wurden keine Nachträge gestellt. Die Zuwendung wurde vollständig als Personalkosten eingesetzt. Andere Kosten, wie etwa für Softwarelizenzen und Reisekosten, wurden nicht bewilligt und stattdessen in Personalkosten umgewidmet.

IS Predict

Die Arbeiten zur prototypischen Entwicklung geeigneter Verfahren von KI-Prognosemodellen bedurften zeitaufwändiger und komplexer Aufgaben wie Auswahl potentiell best-geeigneter Verfahren für den Projektkontext, Erforschung der besten Konfiguration sowie Erreichung einer

hohen und stabilen Genauigkeit. In diesen Aufgaben war auch ein hohes Risiko, keine passenden Modelle zu entwickeln.

Bei der prototypischen Applikationsentwicklung (Aufbau Architektur und Demoumgebung, Entwicklung Schnittstellen, Betrieb Datentransfer und KI-Services) war das Risiko, keinen befriedigenden Prototypen zu entwickeln, bei entsprechender Expertise zwar nicht hoch, jedoch bleiben auch diese Arbeiten zeitaufwendig.

Daher lässt sich zusammenfassend bewerten, dass die Arbeiten im Projekt notwendig für die Gesamtzielerreichung waren und auch angemessen waren.

2.7 Nutzen und Verwertbarkeit

RPTU/LRS:

Die Verwertung der Projektergebnisse erfolgte bereits parallel zum Projektverlauf. Zum einen sind mehrere studentische Projekt- und Abschlussarbeiten (fünf Master-, zwei Bachelor- und weitere Projektarbeiten) thematisch direkt mit Bezug zum Projekt durchgeführt worden. Zum anderen sind Ideen und Verfahren, die im Zusammenhang mit dem Projekt untersucht wurden, auch in zwei Dissertationen eingeflossen. Es werden zurzeit zwei mögliche Realisierungsprojekte mit Partnern aus der Wirtschaft diskutiert, in denen Second-Life-Blei-Batteriespeicher mit der aus diesem Projekt entwickelten Technik eingesetzt werden können.

RPTU/GST

Die Erkenntnisse aus dem Projekt wurden bereits während der Laufzeit in der Lehre vermittelt und werden auch zukünftig einen zunehmend wichtigeren Bestandteil einnehmen. Weiterhin wurde während der Projektlaufzeit eine Dissertation angefertigt und veröffentlicht, die sich thematisch auf das Vorhaben bezieht und eine Masterarbeit durchgeführt.

Dali Solarpower

Die Ergebnisse der Forschung helfen den Kundenstamm zu erweitern, indem Bauern aufgenommen werden. Die Beratung sieht nun individueller und vielfältiger aus, da man neue Modelle vorstellen kann. Das Ziel ist es, einem Weinbauern, der eine PV-Anlage bauen lassen möchte, das Projekt EnerReg vorzustellen und somit ein neues Modell aufzuzeigen, um mehr Energie einzusparen und die Rendite des Hofes zu steigern. Dazu wäre eine Partnerschaft mit den anderen Unternehmen notwendig. Vorerst kann zumindest die Alternative vorgestellt werden und bei Interesse eine mögliche Umsetzung mit den Projektpartnern besprochen werden.

Kafitz Immobilien

Ohne Partner wird es schwer ein fertiges Produkt anzubieten. Jedoch kann man beim Verkauf von großen Hofanlagen in ländlichen Gegenden das erarbeitete Konzept vorstellen und mit der Wirtschaftlichkeitsberechnung auf die Variablen des vorhandenen Hofes projizieren. Somit wird den Interessenten an solchen Immobilien eine bisher unbekannte Variante der energetischen Vorteile vorgezeigt und die Höfe werden möglicherweise interessanter als Wertanlage, da man mehr Gewinn erzielen kann. Für die Verkäuferseite von solchen Höfen gibt es den Vorteil, dass eine geeignete

Anlage mit diesem Konzept möglicherweise einen höheren Verkaufspreis erzielt. Das Ziel ist es folglich, dieses Konzept auf Höfe aus unseren Verkäufen zu übertragen. Somit kann die Wirtschaftlichkeit an einem beispielhaften Standort dargestellt und den Interessenten eine Möglichkeit der energetischen Sanierung vorgezeigt werden, die ihnen bisher unbekannt war. Im Optimalfall können Partnerschaften mit Unternehmen entstehen, die bereits während der Projektlaufzeit kontaktiert wurden.

IG-CP

Durch die Anwendung der Forschungsergebnisse in Vorträgen und Kundengesprächen konnte ein Kundenzuwachs von ca. 10 % verzeichnet werden, insbesondere aufgrund des Mehrnutzens für Weingüter als klassische Mischnutzungsbetriebe mit saisonalen Herstellungsprozessen, Gastronomie, Hotellerie, Wohnungen für Arbeiter sowie Privatwohnungen mit unterschiedlichen Bedarfen und starker Nutzerabhängigkeit. Dadurch konnte in den letzten drei Jahren eine Umsatzsteigerung von etwa 20 % erreicht werden.

Die Entwicklung eines technisch umsetzbaren und rechtlich abgesicherten Energiemanagementkonzepts, das restriktionsfrei adaptiert werden kann, ist derzeit noch nicht möglich, da es keine einheitlichen Vorgaben der Netzbetreiber gibt. Ein stetiger Austausch und das Herbeiführen von umsetzbaren Lösungen mit den Energieversorgungsunternehmen (EVUs) hinsichtlich der Komplexität solcher Energiemanagementsysteme mit umfangreichen messtechnischen, steuerungstechnischen, kommunikationstechnischen und datentechnischen Anforderungen sollen jedoch mittelfristig zum Ziel führen.

Die Ergebnisse wurden im Landesamt für Umwelt, dem Umweltministerium sowie der Ingenieurkammer Rheinland-Pfalz vorgestellt. Es liegen Interessensbekundungen vom Weincampus Neustadt sowie mehreren Winzergenossenschaften vor, die im nächsten Jahr beraten werden sollen. Darüber hinaus gibt es Interessensbekundungen für den EffCheck des Landes Rheinland-Pfalz. Es sind mindestens 50 EffChecks für 2025 vorgesehen, da Weingüter sonst keine Förderungen für landwirtschaftliche Erzeugnisse erhalten würden. Des Weiteren wurde eine enge Kooperation mit dem Forschungsprojekt EnStadt:Pfaff2 angekündigt, um die Erkenntnisse Ortsnah in die Quartierentwicklung auf dem Pfaff-Gelände einbringen zu können.

IS Predict

IS Predict hat die gewonnenen Forschungserkenntnisse mit Schwerpunkt Onlinedaten-KI-Verfahren schon am Ende der Projektlaufzeit in die Vorentwicklung einfließen lassen. Ein Hauptaugenmerk wurde auf hohe Genauigkeit und Adaptivität gelegt. In 2025 werden die im Projekt prototypisch entwickelten Verfahren und grundlegenden Technologien technisch untermauert. Danach wird das Prognosemodul der Standardsoftware Predictive Intelligence um entsprechende Konfigurationsmöglichkeiten erweitert. Außerdem werden Maßnahmen zur Stabilisierung durchgeführt, sowie daran gearbeitet, die Performance (von derzeit 2 Sekunden) zu verbessern. Außerdem werden die in diesem Projekt erforschten Algorithmen zur Modelladaptivität und Selbstlernalgorithmik ebenfalls stabilisiert.

Es ist davon auszugehen, dass Ende 2025/Anfang 2026 das Prognosemodul der Predictive Intelligence entsprechend erweitert in einem neuen Release zur Verfügung stehen wird. In neuen Projekten wird

normalerweise immer mit der neuesten Version von Predictive Intelligence gearbeitet, so dass die aus diesem Projekt gewonnenen Erkenntnisse 2026 in neuen Projekten genutzt werden.

2.8 Fortschritt anderer Stellen während des Vorhabens

Während der Projektlaufzeit verfolgten wir auch stetig, so weit wie möglich, den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung auf diesem Gebiet. Fortschritte anderer Stellen zum von uns bearbeiteten Thema sind uns nicht bekannt geworden.

2.9 Veröffentlichungen der Ergebnisse

- Schmidt, Daniel. 2024. Prädiktive Optimierung von Energieflüssen in Wohngebäuden mit Photovoltaik-Eigenstromerzeugung unter Berücksichtigung von Power-To-Heat (Wärmepumpe), Power-To-Power (Stromspeicher) und Vehicle-To-Building (bidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen), RPTU Kaiserslautern-Landau, <https://doi.org/10.26204/KLUEDO/8439>