



Aggregationsplattform zur gebäudeübergreifenden Optimierung der Energieeffizienz

Teilvorhaben: Modellierung, Optimierung und Simulation Energiesysteme

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Schlussbericht

der Technischen Universität München (TUM)
Teil I (spezifisch) & Teil II (Gesamtkonsortium)



Zuwendungsempfänger:	Technisch Universität München - Munich School of Engineering	Förderkennzeichen: 03ET1413B
Vorhabenbezeichnung:	Aggregationsplattform zur gebäudeübergreifenden Optimierung der Energieeffizienz	
	Teilvorhaben: Modellierung, Optimierung und Simulation Energiesysteme	
Laufzeit des Vorhabens:	01.06.2017 bis 30.09.2021	
Berichtszeitraum:	01.06.2017 bis 30.09.2021	

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren / Beteiligte (Gesamtkonsortium):

Licklederer, Thomas ; *thomas.lickleder@tum.de*

Mayer, Jan ; *mayer@fortiss.org*

Bytschkow, Denis ;

Ahuir, Virginia ;

Birkeneder, Daniel ;

Capone, Alexandre ;

Dagn, Magdalena ;

Holsten, Elena ;

Irlbeck, Maximilian ;

Kramer, Michael ;

Malinowsky, Detlef ;

Miedl, Nicole ;

Nebel, Ralf ;

Oji, Ardan ;

Reiser, Claudius ;

Schumacher, Lea ;

Täubrich, Patrick ;

Wieland, Christoph ;

Agudelo Sanabria, Saitel Daniela ;
Beißwenger, Lino ;
Bröcker, Stephan-Arved ;
Burger, Johannes ;
Elizarov, Ilya ;
Freiesleben, Timo ;
Heidemann, Lena ;
Kainz, Jonas ;
Krüger, Adrian ;
Thut, Andreas ;
Duchon, Markus ; *duchon@fortiss.org*
Hamacher, Thomas . *thomas.hamacher@tum.de*

Autoren / Beteiligte der TUM:

Licklederer, Thomas ; *thomas.lickleder@tum.de*
Kramer, Michael ;
Capone, Alexandre ;
Beißwenger, Lino ;
Burger, Johannes ;
Elizarov, Ilya ;
Wieland, Christoph ;
Hamacher, Thomas . *thomas.hamacher@tum.de*

Technische Universität München

Munich School of Engineering
Prof. Dr. rer. nat. Thomas Hamacher
Lichtenbergstraße 4a
85748 Garching bei München

Garching bei München, März 2022

1 Inhaltsverzeichnis

0	<i>Allgemeine Hinweise zum Schlussbericht</i>	13
1	<i>Teil I: Kurze Darstellung des Vorhabens (TUM-spezifisch)</i>	14
1.1	<u>Aufgabenstellung</u>	14
	Aufgabenstellung des Verbundprojekts	14
	Aufgabenstellung des Teilvorhabens	16
1.2	<u>Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde</u>	19
1.3	<u>Planung und Ablauf des Vorhabens</u>	21
1.4	<u>Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde</u>	22
	Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden	25
	Verwendete Fachliteratur, sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste	25
1.5	<u>Zusammenarbeit mit anderen Stellen</u>	27
	Projektkonsortium	27
	Externe Stellen	28
1.6	<u>Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises</u>	30
1.7	<u>Darstellung des wissenschaftlich-technischen Ergebnisses des Vorhabens, der erreichten Nebenergebnisse und der gesammelten wesentlichen Erfahrungen</u>	31
	Hauptergebnisse	31
	Nebenergebnisse	31
	Wesentliche Erkenntnisse	32
1.8	<u>Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans</u>	34
	Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte	34
	Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	34
	Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende	35
	Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit	35
2	<i>Teil II: Eingehende Darstellung der Projektergebnisse (Gesamtkonsortium)</i>	37
2.1	<u>Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele</u>	37
	(E0) Hintergrund und Technische Grundannahmen	41
	(E1) MEMAP-Plattform, Modelle und Optimierungskern	56
	(E2) Interaktion mit System für Benutzer / Benutzeroberflächen / Frontend	75
	(E3) Feldtest	80
	(E4) Building Information Model (BIM)	107
	(E5) Planungswerkzeug und Simulationen	115
	(E6) Fallstudie / Wirtschaftlichkeitsanalyse	132
	(E7) Akzeptanz und Verwertung	157
	(E8) Key-Findings und Handlungsempfehlungen	160
2.2	<u>Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit</u>	164
2.3	<u>Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen</u>	164
2.4	<u>Erfolgte und geplanten Veröffentlichungen von Projektergebnissen</u>	164
	Studentische Arbeiten	164
	Publikationen	165
	Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen	167
	Homepage	169

3	ANHANG	170
	(A1) Energiebedarf und Lastgänge für die Wirtschaftlichkeitsberechnung	170
	(A2) Rohrnetzberechnung	187
	(A3) Wärmeverlustrechnung der Fernwärmeleitung	188
	(A4) Investitionskostenrechnung der Fernwärmeleitung	190
	(A5) Interne Berichte zu Grundlagen und Rahmenbedingungen	192
	(A6) Beispiel Szenariobeschreibung	195

Abkürzungsverzeichnis

AEC	Architecture, Engineering, Construction
AP	Arbeitspaket
BHKW	Blockheizkraftwerk (Stromgenerator mit Abwärmenutzung)
BIM	Building Information Modeling (Bauinformationsmodell)
BMS	Building Management System / Software
CAD	Computer-Aided Design (Rechnergestützte Konstruktion)
CoSES	Combined Smart Energy System
DSM	Demand Side Management
EMS	Energiemanagementsystem
FEMS	FENECON Energiemanagementsystem
GEG	Gebäudeenergiegesetz
HLZF	Hochlastzeitfenster
HMI	Human Machine Interface
IBDM	Ingenieurbüro Detlef Malinowsky (IBDM GmbH)
IKT	Informations- und Kommunikationstechnologie
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LV	LabVIEW (Software von National Instruments)
MEMAP	Multi-Energie-Management- und Aggregations-Plattform
MSE	Munich School of Engineering
OPC UA	Open Plattform Communication Unified Architecture
SCADA	Supervisory Control and Data Acquisition
TUM	Technischen Universität München
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient (W/m^2K)
VI	Virtual Instrument (Programm in LV)
VPN	Virtual Private Network
VS	VeriStand (Software von National Instruments)
ZD.B	Zentrum Digitalisierung.Bayern

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Zusammenhänge zwischen den Arbeitspaketen im Verbundprojekt.....	22
Abbildung 2: Zuordnung der technischen Arbeitsergebnisse zu den einzelnen Aufgabengebieten im Projekt.....	40
Abbildung 3: Typische Ebenen der Gebäudeautomation (Quelle: Baunetz (si), Berlin)	42
Abbildung 4: Systemarchitektur der Gebäudeautomation der Sauter-Cumulus GmbH.....	42
Abbildung 5: Stakeholder im MEMAP-Kontext und deren Wertschöpfungsflüsse.....	51
Abbildung 6: Business Model Canvas "Energiehandel".....	54
Abbildung 7: Business Model Canvas „Hochlastzeitfenster und Primärregelleistung“	55
Abbildung 8: Überblick MEMAP-Konzept mit der Plattform im Zentrum	56
Abbildung 9 Verbundelement (Composite) und Endglied (Leaf) in einer Hierarchie (links) und die gegenseitige Beziehung der Komponenten (rechts) aus D. Bytschkow (2020).....	58
Abbildung 10: Vereinfachtes UML-Diagramm des verwendeten Aktor-Framework mit verschiedenen in MEMAP verwendeten BehaviourModels.....	59
Abbildung 11: Elemente des Aktor System und die Realisierung in MEMAP mit den Anlagen als Aktoren.....	59
Abbildung 12 MEMAP Framework zur Komposition der Topologie (links) und die internen Abläufe zur Datenaggregation für den Optimierungsalgorithmus (rechts).....	60
Abbildung 13: Generische Anlagenklassen eines lokalen EMS für die gebäudeübergreifende Optimierung in MEMAP	62
Abbildung 14: Zusätzliche Namenskonvention für Datenpunkte in MEMAP	65
Abbildung 15: Die MEMAP-Plattform als Modellprädiktiver Regler des Quartiers.....	66
Abbildung 16: Veranschaulichung des beweglichen Horizonts und der Planung durch Optimierung bei modellprädiktiver Regelung	67
Abbildung 17: Prinzip der Modellierung von Energiewandlung in einem Energy Hub	69
Abbildung 18: Illustration des MEMAP-Systemmodells inkl. der verschiedenen Entscheidungsvariablen x und y	69
Abbildung 19: Exemplarische Illustration einer Iteration der Kommunikations-Ablaufsequenz zwischen MEMAP-Plattform, EMS und Drittanbietern	73
Abbildung 20: Ende-zu-Ende-Sicherheitskonzept der OPC-UA-Client-Server Architektur.	74
Abbildung 21: (Virtuell) Private Netzwerkinfrastruktur für die Funktionsdemonstration in den beiden Testgebieten und die Verbindung zum webbasierten bzw. lokalen Benutzerinterface.	74
Abbildung 22: Beispiel einer verteilten Installation von OpenVisu in zwei Gebäuden und ein übergeordneter Zugriff auf die Dienste von OpenVisu aus der Cloud.	78
Abbildung 23: Beispiel eines Dashboards innerhalb OpenVisu	79
Abbildung 24: Beispiel eines Charts innerhalb OpenVisu.....	79
Abbildung 25: Grundidee des CoSES-Labors mit einer Nachbarschaft aus fünf Gebäuden und der 3-Schichten-Architektur	80
Abbildung 26: Im Aufbau befindliche Hardware-Module der Wärmeseite des CoSES-Labors in der Werkstatt der MSE; das MEMAP-Team der TUM hat am Aufbau der Hardware mitgewirkt... 81	81
Abbildung 27: Basis-Kommunikationspfad der CoSES-Laborumgebung.....	82

Abbildung 28: Einbindung der MEMAP-Plattform in das CoSES-Laborumfeld; Datenströme zwischen den verschiedenen Entitäten.....	83
Abbildung 29: Bestandteile der CoSES-EMS für die MEMAP Experimente: Kommunikationspfad von der MEMAP-Plattform über die lokalen EMS hin zur Feldebene des CoSES-Labors.....	84
Abbildung 30: Veranschaulichung des Szenarios für die Tests der MEMAP-Plattform in CoSES..	86
Abbildung 31: Lastgänge der thermischen und elektrischen Verbräuche als Randbedingungen der Labortests	88
Abbildung 32: Zeitliche Verläufe der Preisprofile als Randbedingungen der Labortests	89
Abbildung 33: Simulationsergebnisse des Szenarios für die Laborexperimente unter Annahme perfekter Vorhersagen, Modelle und perfekter Umsetzung der Setpoints durch die Anlagen.	95
Abbildung 34: (Mess-)Ergebnisse des MEMAP-Experiments im CoSES-Labor	96
Abbildung 35: Technische Daten des Laborexperiments von MEMAP in CoSES: Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmesenken zur Emulation des Heizsystems, Speichertemperaturen auf verschiedenen Höhen und Ladezustände der Wärmespeicher	97
Abbildung 36: MEMAP-Experiment in CoSES: Vergleich der Simulationsergebnisse (rechts) mit den MEMAP-Setpoints (mitte) und den Messwerten (links) von Haus 1	98
Abbildung 37: MEMAP-Experiment in CoSES: Vergleich MEMAP-Setpoints mit Messergebnissen des BHKWs, incl. zoom für An- und Abfahrt des BHKWS	99
Abbildung 38: MEMAP-Experiment in CoSES: Vergleich MEMAP-Setpoints mit Messergebnissen des Gaskessels, incl. Zoom für An- und Abfahrt des Kessels.....	100
Abbildung 39: MEMAP-Experiment in CoSES: Vergleich MEMAP-Setpoints mit Messergebnissen des Speichers	100
Abbildung 40: Schematischer Aufbau der Datenerfassung aus den Objekten über das lokale EMS zu MEMAP	102
Abbildung 41: Schema eines beispielhaften bidirektionalen Prosumer-Wärmenetzes mit den Wärmeübergabestationen	104
Abbildung 42: Die aufgenommenen 3D-Punktwolken für das BIM Modell.	109
Abbildung 43: Bestandsaufnahme der Heizzentrale eines Teilnehmers – Teil 1	110
Abbildung 44: Bestandsaufnahme der Heizzentrale eines Teilnehmers – Teil 2	110
Abbildung 45: Eine Sicht auf die final verfügbare MEMAP BIM-Modell Version, welche ins Allplan BIMPlus Werkzeug exportiert wurde. Neben den Gebäuden sind auch die energetisch relevanten Komponenten wie Kessel, Leitungen etc. im Modell verfügbar.	111
Abbildung 46: Ein beispielhafter Datenauszug für die hinterlegten Daten im BIM-Modell.....	112
Abbildung 47: Datentransfer für die Live Daten Visualisierung	113
Abbildung 48: Sensoren im Modell, Live-Daten und Historie.....	114
Abbildung 49: Übersicht Projektbereiche	115
Abbildung 50: Startbildschirm der Benutzeroberfläche des MEMAP Planungstools	116
Abbildung 51: Simulation eines vernetzten Quartiers mit dem MEMAP-Planungswerkzeug.....	117
Abbildung 52: Einstellung der Simulationsparameter über die Benutzeroberfläche	118
Abbildung 53: Übersicht-Ergebnisdarstellung der Planungstool-Simulation	119
Abbildung 54: Details Ergebnisdarstellung der Planungstool-Simulation.....	120
Abbildung 55: Anlagenkonfiguration und Setting für das Zwei Häuser Modell	121

Abbildung 56: Simulationsergebnisse eines Gebäudes über einen Tag. Zeitliche Darstellung der Stromsenken (linke Abbildung): Verbrauch (blau), Wärmepumpe (orange) Batterie laden (grau), sowie der Stromquellen (rechte Abbildung): PV (blau), Batterie entladen (orange), Netzbezug (grau).	122
Abbildung 57: Ergebnisse der Zwei-Gebäude-Simulation über 48 Stunden a) für beide Gebäude einzeln ohne die Möglichkeit Energie zu Tauschen und b) im MEMAP Anwendungsfall Quartiersoptimierung mit Energietausch.....	122
Abbildung 58: Optimierung nach CO ₂ -Emissionen	123
Abbildung 59: Virtualisierung des Zwei-Häuser-Szenarios auf einem Raspberry Pi Computer, der mit der MEMAP-Plattform kommuniziert und die Optimierungsergebnisse auf den virtuellen EMS umsetzt.	124
Abbildung 60: a) Energieverbund aus fünf Gebäuden mit einem bidirektionalen Nahwärmenetz. b) Der bilanzierte Energietausch zwischen den Gebäuden wählt stets die kosteneffizienteste Anlage zur Versorgung des Quartiers.	125
Abbildung 61: Summe der Einzelkosten nach Optimierung auf Gebäude-Ebene verglichen mit den Kosten im Energieverbund mit Optimierung durch MEMAP (relative Änderungen in grau). .	125
Abbildung 62: Visualisierung des Beispielszenarios HLZF in der MEMAP-Anwendung. Blau: Verbrauch, Grün: Netzbezug, Rot: Verhalten Speichersystem.	130
Abbildung 63: Ausgelegtes Wärmenetz für Testgebiet Riemerling mit angepassten Nennweiten	138
Abbildung 64: Anteilig abgegebene Wärmemenge im Verbundbetrieb.....	140
Abbildung 65: Jahresdauerlinie Wärmebedarf.....	141
Abbildung 66: Anteilige Wärmeversorgung im Verbundbetrieb mit BHKW	143
Abbildung 67: Verfügbare Dachflächen im Quartier	144
Abbildung 68: Vergleich der Investitionskosten	147
Abbildung 69: Vergleich der Energiekosten.....	147
Abbildung 70: Vergleich der CO ₂ -Emissionen	148
Abbildung 71: CO ₂ -Kosten für den Ist-Zustand.....	149
Abbildung 72: CO ₂ -Kosten im Vergleich.....	150
Abbildung 73: Poster zu den Key-Findings des Projektes	160
Abbildung 74: Stromlastgang Montessori Schule (Jahresansicht)	171
Abbildung 75: Stromlastgang Montessori-Schule (Monatsansicht).....	172
Abbildung 76: Stromlastgang Hotel am Wald (Jahresansicht).....	172
Abbildung 77: Stromlastgang Hotel am Wald (Wochenansicht).....	173
Abbildung 78: Stromlastgang Kotter (Jahresansicht).....	174
Abbildung 79: Stromlastgang Kotter (Monatsansicht).....	174
Abbildung 80: Stromlastgang Hackl 19 (Jahresansicht)	175
Abbildung 81: Stromlastgang Hackl 23/25 (Jahresansicht)	176
Abbildung 82: Stromlastgang Hackl 23/25 (Monatsansicht)	177
Abbildung 83: Stromlastgang Hackl 27 (Jahresansicht)	178
Abbildung 84: Stromlastgang Hackl 27 (Monatsansicht)	178
Abbildung 85: Original Wärme-Lastgang Hackl 23/25 (Jan. - Juni 20).....	180

Abbildung 86: Korrigierter Wärme-Lastgang Hackl 23/25 (Jan. - Juni 20)	180
Abbildung 87: Wärmelastgang Montessori (Jahresansicht)	181
Abbildung 88: Wärmelastgang Montessori (Wochenansicht)	182
Abbildung 89: Wärmelastgang Hotel am Wald (Jahresansicht)	182
Abbildung 90: Wärmelastgang Kotter (Jahresansicht)	183
Abbildung 91: Wärmelastgang Kotter (Wochenansicht)	183
Abbildung 92: Wärmelastgang Hackl 19 (Jahresansicht)	184
Abbildung 93: Wärmelastgang Hackl 19 (Wochenansicht)	184
Abbildung 94: Wärmelastgang Hackl 23/25 (Jahresansicht)	185
Abbildung 95: Wärmelastgang Hackl 23/25 (Wochenansicht)	185
Abbildung 96: Wärmelastgang Hackl 27 (Jahresansicht)	186
Abbildung 97: Rohrnetzberechnung	187
Abbildung 98: Wärmeverlustrechnung der Fernwärmeleitung	188

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Darstellung verwandter nationaler und internationaler Projekte auf welche aufgebaut wurde.....	23
Tabelle 2: Zuordnung der thematischen Ergebnisfelder E0 – E8 zu den durchgeführten Arbeitspaketen AP1 – AP9 laut Antrag im Projekt. Die dunkelblauen Quadrate zeigen einen direkten Bezug, die hellblauen Quadrate repräsentieren einen Bezug aus Synergieeffekten.	39
Tabelle 3: Methoden zur Identifikation von Anwendungsfällen	46
Tabelle 4: User Stories für den Nutzer	46
Tabelle 5: Use Case Energiehandel.....	47
Tabelle 6: Stakeholder, welche die Rolle Plattformbetreiber übernehmen können	50
Tabelle 7: Nutzerversprechen, Wertschöpfungsarchitektur, Erlösmodell.....	51
Tabelle 8: Herausforderungen und Anforderungen bei der Konzipierung der Software-Plattform..	56
Tabelle 9: Datenmodell - Übersicht über die Parameter nach Anlagenklassen	62
Tabelle 10: Datenmodell - Übersicht über Prognosen nach Anlagenklassen.....	64
Tabelle 11: Datenmodell – Übersicht über Setpoints nach Anlagenklassen	64
Tabelle 12: Datenmodell – Übersicht über Messwerte nach Anlagenklassen.....	64
Tabelle 13: Parameter für die simulative Ermittlung von Lastprofilen für die Laborexperimente mit MEMAP in CoSES	88
Tabelle 14: Tabelle mit allen globale Optimierungsparameter für den MEMAP Optimierungskern.	118
Tabelle 15: Hochlastzeitfenster Bayernwerk 2020.....	127
Tabelle 16: Erheblichkeitsschwellen.....	128
Tabelle 17: Allgemeine Datengrundlage: Heißwasserkessel.....	132
Tabelle 18: Allgemeine Datengrundlage: Photovoltaik-Anlage Hackl 27	133
Tabelle 19: Allgemeine Datengrundlage: CO2-Emissionsfaktoren	133
Tabelle 20: Allgemeine Datengrundlage: Primärenergiefaktoren.....	134
Tabelle 21: Allgemeine Datengrundlage: Vertragliche Stromlieferpreise (Angaben inkl. MwSt.)..	134
Tabelle 22: Allgemeine Datengrundlage: Brennstoffpreise (Angaben inkl. MwSt.)	135
Tabelle 23: Allgemeine Datengrundlage: Wartungskosten	135
Tabelle 24: Allgemeine Datengrundlage: Preissteigerungsfaktoren pro Jahr.....	136
Tabelle 25: Simulationsergebnisse: Riemerling Ist-Zustand.....	137
Tabelle 26: Eingabeparameter für die Simulation des Gebäudeverbundes	137
Tabelle 27: Simulationsergebnisse: Gebäudeverbund	139
Tabelle 28: Neue Eingabeparameter für den Gebäudeverbund mit BHKW	140
Tabelle 29: Preisbestandteile bei KWK-Anlagen	141
Tabelle 30: Simulationsergebnisse: Gebäudeverbund mit BHKW	142
Tabelle 31: Eingabeparameter für zusätzliche PV-Anlage.....	144
Tabelle 32: Simulationsergebnisse: Gebäudeverbund mit BHKW und PV	145
Tabelle 33: Vergleich der Simulationsergebnisse.....	146

Tabelle 34: CO ₂ -Preise gem. Brennstoffemissionshandelsgesetz	148
Tabelle 35: CO ₂ -Emissionen der verschiedenen Energiekonzepte.....	149
Tabelle 36: Vor- und Nachteile des Gebäudeverbundes	150
Tabelle 37: Vor- und Nachteile des Gebäudeverbundes mit BHKW	152
Tabelle 38: Vor- und Nachteile des Gebäudeverbundes mit BHKW und PV	153
Tabelle 39: Ergebnisse der Umfrage an potenzielle MEMAP-Plattformbetreiber	158
Tabelle 40: Allgemeine Datengrundlage: Strombedarf	170
Tabelle 41: Allgemeine Datengrundlage: Grundlagen der Strom-Lastgänge	170
Tabelle 42: Vergleich des Strombedarfes	173
Tabelle 43: Hackl 19: Ermittlung Strombedarf	175
Tabelle 44: Original Strom-Messwerte der KEW im Hackl 23/25-Gebäude	176
Tabelle 45: Original Strom-Messwerte der KEW im Hackl 27-Gebäude	177
Tabelle 46: Allgemeine Datengrundlage: Wärmebedarf	180
Tabelle 47: Allgemeine Datengrundlage: Grundlagen der Wärme-Lastgänge	180
Tabelle 48: Investitionskostenrechnung der Fernwärmeleitung	190
Tabelle 49: Inhalt des internen Berichts L2.1	192
Tabelle 50: Inhalt des internen Berichts L2.2	192
Tabelle 51: Inhalt des internen Berichts L2.3	193

0 Allgemeine Hinweise zum Schlussbericht

Dies ist der öffentliche Schlussbericht der Technischen Universität München (TUM) zum Forschungsprojekt „Aggregationsplattform zur gebäudeübergreifenden Optimierung der Energieeffizienz“ (FKZ: 03ET1413). Der Aufbau des Berichts folgt größtenteils dem Muster des Fördermittelgebers.

Teil I ist eine kurze Darstellung des Vorhabens. Dieser Teil I des öffentlichen Schlussberichts ist spezifisch für das Teilvorhaben „Modellierung, Optimierung und Simulation Energiesysteme“ (FKZ: 03ET1413B), sowie dessen ausführende Stelle, die Munich School of Engineering (MSE) der Technischen Universität München (TUM).

In Teil II werden die Projektergebnisse präsentiert. Da während des Projektes eine enge Zusammenarbeit zwischen den beteiligten Projektpartnern stattgefunden hat und die Ergebnisse stark ineinandergreifen, werden in diesem Teil II die Ergebnisse des gesamten Projektkonsortiums und aller Teilvorhaben thematisch strukturiert dargelegt. Darin enthalten sind auch die Ergebnisse der Technischen Universität München (TUM) zu ihrem Teilvorhaben „Modellierung, Optimierung und Simulation Energiesysteme“ (FKZ: 03ET1413B). Welche Projektaufgaben der TUM zuzuordnen waren ist unter „Aufgabenstellung des Teilvorhabens“ in Abschnitt 1.1 dargelegt. Hier wird auch auf die entsprechenden Ergebnisabschnitte in Teil II des Schlussberichts verwiesen. Die wichtigsten Ergebnisse und Erkenntnisse des Teilprojektes der TUM sind in Teil I des Schlussberichts unter Abschnitt 1.7 nochmals zusammengefasst.

Die Abschnitte 1.6 und 1.8 in Teil I sind gemäß der Mustervorlage eigentlich dem Teil II zuzuordnen. In diesem Bericht wurden die betreffenden Abschnitte allerdings mit in Teil I aufgenommen, da sie spezifisch sind für die Technische Universität München (TUM) und das zugehörige Teilvorhaben „Modellierung, Optimierung und Simulation Energiesysteme“ (FKZ: 03ET1413B).

1 Teil I: Kurze Darstellung des Vorhabens (TUM-spezifisch)

1.1 Aufgabenstellung

Aufgabenstellung des Verbundprojekts

Im Zusammenhang mit der laufenden Energiewende in Deutschland erhält der Gebäudebereich im Hinblick auf die Erschließung von Effizienzpotenzialen und die Integration erneuerbarer Energien große Aufmerksamkeit. Durch die Integration von Speichertechnologien und erneuerbaren Energien, unter anderem im Wärmesektor, sollen Gebäude in Zukunft einen wachsenden Anteil an der bedarfsnahen, dezentralen Bereitstellung von Strom, Wärme und Kälte übernehmen. Aktuell benötigen Gebäude mit ihrer Anlagentechnik Energie - meist in Form von Wärme und Strom. Dabei haben viele Gebäude überdimensionierte Anlagentechnik wie Heizkessel, die im Teillastbetrieb unwirtschaftlich betrieben werden. Teilweise befinden sich Photovoltaik Anlagen auf dem Dach, die durch zu geringen Eigenstrombedarf unwirtschaftlich Energie ins öffentliche Netz einspeisen oder stromgeführte Blockheizkraftwerke, die zwar wirtschaftlich den Eigenbedarf an Strom sichern, deren erzeugte Wärmeenergie aber nur zu einem gewissen Grad genutzt werden kann. Existierende Energie Management Systeme (EMS) arbeiten bisher vorrangig auf Gebäudeebene und stehen vor der Herausforderung die unterschiedlichen und erneuerbaren Energien zu integrieren und intelligent zu kombinieren, um das vorhandene Potenzial zur Energieoptimierung und Effizienzsteigerung besser zu nutzen. Ein Problem hierbei resultiert bereits aus der Planung von Gebäuden und Quartieren, bei der die unterschiedlichen Gewerke oft unabhängig voneinander betrachtet, geplant und integriert werden. Dies führt zu der zuvor erwähnten Über- oder Unterdimensionierung von Anlagen und somit zu einem unwirtschaftlichen Betrieb. Eine weitere Herausforderung liegt in der Optimierung der Anlagentechnik durch das EMS, welches neben der Kombination unterschiedlicher Energien auch dynamisch auf die schwankende Verfügbarkeit von Energie und volatile Energiepreise reagieren muss. Aktuell werden bei der Planung und dem Betrieb die einzelnen Gebäude isoliert voneinander betrachtet, wodurch mögliche Synergieeffekte nicht genutzt werden und das verfügbare Potenzial nicht ausgeschöpft wird.

Im Rahmen des Projektes „Multi-Energie Management und Aggregations-Plattform (MEMAP)“ wurden die genannten Herausforderungen aufgegriffen. Das Kernziel des MEMAP Projekts war die Entwicklung und Erprobung einer offenen Aggregationsplattform um den angesprochenen Herausforderungen, von der Planung über die Integration von neuen Komponenten bis hin zum energieeffizienten Betrieb im Verbund, zu begegnen. Die Plattform sollte bestehende, in unabhängigen Gebäuden arbeitende, EMS kombinieren und einen bereichsübergreifenden und sicheren Informationsaustausch erlauben. Die Ebene der lokalen EMS sollte weiterhin die Ansteuerung der Anlagen auf technischer Ebene übernehmen, damit möglichst wenig Detailinformationen an die übergeordnete Plattform kommuniziert werden müssen. Der Einsatz geeigneter Optimierungsverfahren sollte dabei eine sinnvolle Einbindung der Einzelsysteme als Energiesenke, Energiequelle oder Energiespeicher im lokalen Energieversorgungssystem ermöglichen. Bei der Optimierung sollten neben den unterschiedlichen Energieträgern (Strom, Wärme, Kälte) auch entsprechende Prognosen bezüglich des Energiebedarfs und der Energieproduktion und Energiepreise berücksichtigt werden, um einen energieeffizienteren Betrieb durch Ausnutzung von Synergieeffekten der verschiedenen Bedarfs- und Produktionsprofile zu erzielen. Insgesamt sollte dadurch neben geringeren Kosten für den einzelnen Benutzer auch eine Reduzierung des Primärenergiebedarfs und des Ausstoßes von Treibhausgasen erreicht werden. Die entwickelte Aggregationsplattform sollte in einem Feldtest implementiert, getestet und evaluiert werden. Das durch Aggregation und Zusammenwirken der einzelnen Managementsysteme erschlossene Potenzial sollte genutzt werden, um mittels Demand-Side Management bzw. Demand Response Diensten einen Beitrag zur Netzstabilität zu leisten. Bezogen auf die Akzeptanz dieser Systeme sollten hierbei die Präferenzen der Benutzer bei der Dienstleistung berücksichtigt werden. Im Rahmen dieses Projekts sollte die BIM Methode in die Aggregationsplattform, die Simulation sowie die angestrebten Feldtests einfließen. Nach dem US National BIM Standards Committee (NBIMS) ist BIM die digitale Darstellung physischer und funktioneller Merkmale einer

Anlage und schafft durch einen gemeinsam nutzbaren Pool relevanter Daten eine zuverlässige Entscheidungsgrundlage während des gesamten Lebenszyklus des Bauwerks, von der frühesten Idee bis hin zum Rückbau. Weitere Ziele, die im Rahmen dieses Projekts verfolgt wurden, sind die Schaffung eines Marktzugangs für Speichersysteme in lokale (elektrische und thermische) Energiesysteme, da diese bisher auf die Optimierung von Photovoltaikanlagen (Eigenverbrauchsoptimierung) spezialisiert sind und bisher keine Kombination mit thermischen Anlagen vorgesehen ist. Zusätzlich zu der Entwicklung und Analyse von Geschäftsmodellen auf lokaler Ebene sollte eine Potenzialanalyse bezüglich eines netzdienlichen Betriebs durch den Einsatz von Demand Response Mechanismen auf der Quartiersebene durchgeführt werden. Hierbei sollte auch die Akzeptanz der Anwender solcher Systeme im Hinblick auf die Mensch-Maschine-Interaktion berücksichtigt werden. Bezogen auf die Interaktion mit den Benutzern war ein weiteres Ziel, neben der Entwicklung geeigneter Anwendungen und die Anbindung geeigneter Oberflächen an das lokale EMS, die Weiterentwicklung eines Systems zur Generierung von Visualisierungen. Hierfür mussten geeignete Protokolle (z.B. OPC UA, VHP-Ready, OpenADR) identifiziert und bezüglich deren Nutzbarkeit analysiert werden. Darüber sollten mobile Anwendungen bzw. deren Oberfläche generiert und den Benutzern beispielsweise auf Basis von Rollen über ein externes Portal verfügbar gemacht werden. Im Zusammenhang mit der Implementierung in Form eines Pilotprojekts stand die Planung eines intelligenten und energieeffizienten Konzepts im Vordergrund. Mit Hilfe des angestrebten integralen Planungswerkzeugs sollte das entwickelte Konzept zunächst über Simulationen evaluiert werden, bevor diese Ergebnisse in einem Feldtest überprüft werden sollten. Gleichzeitig wurde beabsichtigt durch die Aggregationsplattform und die damit verbundenen Geschäftsmodelle die Attraktivität der Vor-Ort-Erzeugung erneuerbarer Energien zu steigern und einen lokalen Energieaustausch zu etablieren. Basierend auf den Ergebnissen sollte der energietechnische, ökologische und ökonomische Nutzen bewertet werden. Zusätzlich sollten basierend auf den Ergebnissen und Erfahrungen Handlungsempfehlungen für Politik und Wirtschaft erarbeitet werden.

Wie im Aufstockungs- und Verlängerungsantrag formuliert haben sich einige Zielsetzungen im Projektverlauf leicht verändert: Der Sektor Kälte entfällt, da in den ausgewählten Testgebieten die technischen Voraussetzungen nicht gegeben sind. Außerdem war im Erstantrag angedeutet, dass ein Wärmenetz in einem der Testgebiete geplant und dessen Betrieb untersucht wird. Aufgrund der geänderten Rahmenbedingungen hinsichtlich der Testgebiete wurde dieses Ziel leicht angepasst. Das Testgebiet in Riemerling sollte genutzt werden für die Akquise von Verbrauchs- und Anlagendaten aus dem Feld, sowie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Für den Test der Software im Zusammenspiel mit realer Hardware sollte das Forschungslabor für Combined Smart Energy Systems (CoSES) der Technischen Universität München eingesetzt werden (siehe auch Teil II, Abschnitt 2.1 (E3).A.i). Die Bedeutung geeigneter Wärmenetzinfrastrukturen zum bidirektionalen Austausch von Wärme zwischen Gebäuden wurde erkannt als ein Faktor für den Erfolg der Idee hinter MEMAP. Daher sollte untersucht werden, wie solche geeigneten Infrastrukturen aussehen können, wie sie sich verhalten und wie dies vereinbar ist mit der entwickelten MEMAP-Plattform. Durch das Ausscheiden des ZD.B wurde gegenüber dem Erstantrag die Evaluierung der Akzeptanz der Systeme auf Anwender- und Käuferseite in ihrem Umfang reduziert. Untersuchungen zu Anwendungen des Demand-SideManagements sind als Ziele entfallen.

Die wesentlichen Projektziele des Forschungsvorhabens MEMAP sind in nachfolgender Aufzählung nochmals zusammengefasst.

- Entwicklung und Validierung einer Aggregationsplattform zur Steuerung und Optimierung des lokalen Energieaustausches und zum Anbieten interner und externer Energiedienste auf Quartiersebene
- Integration und Anbindung von Speichern, Verbrauchern und Erzeugeranlagen in lokalen EMS über eine geeignete Software-Architektur
- Integration von intelligenten Optimierungsverfahren auf Plattform- und EMS-Ebene

- Entwicklung eines integralen offenen Planungswerkzeugs basierend auf dem BIM-Standard zur energietechnischen Projektierung und der Simulation von Gebäudeverbänden, Liegenschaften und Produktionsstätten
- Beispielhafte Monitoring-Anwendungen und Benutzerschnittstellen zur Interaktion mit lokalen Energiemanagement Systemen
- Analyse und Bewertung des Nutzens (energie technisch und ökonomisch) einer Aggregationsplattform
- Entwicklung und Analyse von Geschäftsmodellen für den lokalen Austausch von Energie (Strom, Wärme, Kälte)

Eine generelle Beschreibung der einzelnen Arbeitspakete und deren Zusammenhang im Verbundvorhaben ist im Abschnitt „Planung und Ablauf des Vorhabens“ zu finden.

Aufgabenstellung des Teilvorhabens

Die wichtigsten Zielsetzungen des Teilvorhabens und damit die Hauptaufgabe der Technischen Universitäten München im Projekt, lassen sich wie folgt zusammenfassen

- Entwicklung der Kernfunktionalitäten durch Umsetzung geeigneter Modelle und Algorithmen für den optimalen, sektorgekoppelten Quartiersbetrieb
- (Mit-)Entwicklung eines geeigneten Daten- sowie Kommunikationskonzeptes für die Plattform als Regler im Live-Betrieb des Quartiers
- Einbindung von MEMAP in das CoSES-Labor als Feldtestgebiet zur Validierung der Interoperabilität der Plattform und Konzepte mit realen Anlagen
- Mitwirkung bei simulativen Untersuchungen zur Performance des optimierten Verbundbetriebs gegenüber dem konventionellen Betrieb
- Einbringung wissenschaftlicher Expertise und des aktuellen Standes von Forschung und Entwicklung in das Verbundprojekt

Nachfolgend werden die detaillierteren Aufgaben der Technischen Universität München im Rahmen des Teilvorhabens gegliedert nach Arbeitspaketen (APs) gemäß der Vorhabensbeschreibungen aufgeführt. Neben den Überschriften der Arbeitspakete ist aufgeführt in welchem Abschnitt des Schlussberichts die Ergebnisse zu den jeweiligen Aufgaben des Arbeitspaketes zu finden sind (vgl. hierzu auch Tabelle 2). Die Angabe der Abschnitte beziehen sich auf die Abschnitte zu den Ergebnisfelder in Teil II, Abschnitt 2.1. Die wichtigsten Ergebnisse sind komprimiert in Abschnitt 1.7 umrissen.

Es ist anzumerken, dass ein Teil der Aufgaben, insbesondere aus den Arbeitspaketen 8 und 9, vom Konsortialpartner Zentrum Digitalisierung Bayern (ZD.B) nach dessen Ausscheiden übernommen und im Rahmen der Aufstockung und Projektverlängerung als Unterauftrag an Bayern Innovativ vergeben wurde.

AP1 - Management und Organisation

- Koordination und Kommunikation mit den Projektpartnern und interne Koordination mit anderen Forschungsgruppen (insbesondere CoSES-Gruppe im Kontext der Labortests)
- (Mit-)Organisation von und Teilnahme an Projekttreffen
- Organisation von Präsentationen und Veranstaltungen zur Kommunikation der Projektergebnisse an externe Dritte
- Erstellen von Projektfortschrittsberichten und Kommunikation mit dem Fördermittelgeber
- Internes administratives und finanzielles Management

- Koordination von Unteraufträgen

AP2 - Anwendungsfälle und Anforderungen - (E0)

- Recherche zum Stand der Wissenschaft und Technik bzgl. der Energieoptimierung im Quartier
- Erarbeitung von Grundlagen und Anforderungen zur Optimierung thermischer und elektrischer Energieströme im Quartier
- Mitwirkung bei der Abgrenzung des Projekthorizonts durch Definition der Grundannahmen und Rahmenbedingungen
- Mitwirkung bei der Zusammenstellung von technischen Anforderungen für den Datenaustausch, Kommunikationsprotokolle und entsprechende Formatierungen
- Recherche zu geeigneten Regelungsstrategien im Anwendungsrahmen der MEMAP-Plattform: Optimierungsmethoden, Echtzeit-Anwendung, Kontrollhierarchien, Datenkommunikation
- Erarbeitung von Grundlagen zur Abbildung des netzdienlichen Verhaltens über die Modelle und Optimierung

AP3 - Systemanalyse und Bewertung – (E0), (E3)

- Unterstützung bei generellen technischen Fragen zu thermischen und elektrischen Komponenten der technischen Gebäudeausrüstung
- Mitwirkung und Bewertung bei der Auswahl geeigneter Testgebiete
- Systemanalyse der CoSES-Laborumgebung als Vorbereitung der Einbindung der MEMAP-Plattform und zur Festlegung geeigneter Untersuchungsszenarien

AP4 - Entwicklung der Softwareplattform – (E1)

- Auswahl, Entwicklung und Integration geeigneter Optimierungsverfahren und Komponentenmodelle in den Plattformkern
 - Berücksichtigung von Vorherhersagen zu
 - Verbrauchsprofilen
 - Volatiler erneuerbarer Erzeugung
 - Zeitlich variablen Energiepreise- und Vergütungen
 - Abbildung aller relevanten Anlagenklassen
 - Berücksichtigung von Wärmenetztopologien
 - Sicherheitsaspekte
 - Universalität, Skalierbarkeit und Transferierbarkeit der Ansätze
- Mitwirkung bei der Erarbeitung und Abstimmung eines geeigneten Datenmodells, angepasst auf die Algorithmen des Plattformkerns
- (Mit-)Entwicklung eines geeigneten Kommunikationsmodells für die Nutzung mit realen Anlagen und die Einbindung externer Forecasts
- Softwaretests, sowie darauf basierend iterative Beurteilung und Weiterentwicklung der Funktionalitäten des Plattformkerns

AP5 - Benutzerschnittstellen und mobile Anwendungen – (E2)

- Feedback zur Entwicklung von Anwendungen für die Mensch-Maschine-Kommunikation

AP6 - Simulation und Funktionsvalidierung – (E5), (E4), (E3)

- Mitwirkung beim Ausbau der Kernalgorithmen zu einer Simulationsumgebung für Planungs- und Evaluierungszwecke
- Funktionsvalidierung der Kernalgorithmen anhand von Simulationen
- Mitwirkung bei simulativen Fallstudien zur Demonstration der Vorzüge des Betriebs mit MEMAP bezogen auf einige definierten Anwendungsfälle und gegenüber herkömmlichen Betriebsweisen
- Simulative Untersuchungen zur technischen Umsetzung von bidirektionalem Wärmeaustausch im Quartier
- Mitwirkung bei der Aufbereitung von Messdaten aus dem Testgebiet Riemerling für Simulationen

AP7 - Implementierung und Feldteststudien – (E3)

- Erarbeiten von geeigneten Szenarien für Experimente mit Steuerung realer Anlagentechnik im CoSES-Labor
- Einbindung der MEMAP-Plattform in die CoSES-Laborumgebung
 - Mitwirkung bei der Vorbereitung der Laborumgebung
 - Konfiguration und Einstellung der MEMAP-Plattform
 - Herstellen der Datenkommunikation zwischen Plattform und Anlagen: lokales EMS
 - Setup des Systems im Laborumfeld: Mess- und Regelkonzept auf Feldebene
 - Einbindung weiterer Komponenten, wie der Benutzerschnittstelle
- Inbetriebnahme und Tests der MEMAP-Plattform im Labor und abschnittsweise der gesamten Kommunikations- und Regelstrecke zwischen der Plattform und den Anlagen
- Evaluierung der Funktionsweise der Optimierungsverfahren und des Daten- sowie Kommunikationskonzeptes
- Komplettest der zusammengeführten Komponenten im realen Szenario in CoSES (openVisu, Erweiterung der lokalen EMS, Plattform, Optimierung, Planungswerkzeug)
- On-The-Fly Start von MEMAP in CoSES: Aktivierung im Live-Betrieb über die HMI
- Durchführung von Experimenten zur Validierung der Operabilität der MEMAP-Plattform mit realer Anlagentechnik, Aufzeichnung der Messdaten und deren Auswertung

AP8 - Analyse und Bewertung der wirtschaftlichen, sozialen und umweltspezifischen Aspekte – (E6), (E7)

- Untersuchungen zu Vergütungskonzepten für den Energietausch im Verbund
- Bewertung der Ergebnisse aus Simulationsstudien mit Bezug auf Aussagekraft der erzielten wirtschaftlichen und ökonomischen Ersparnisse
- Vergleich zwischen Ergebnissen aus der CoSES Simulation mittels historischer und synthetischer Daten und dem Feldtest, um Erkenntnisse über die Transferierbarkeit der Laborergebnisse zu gewinnen
- Durchführung und Evaluierung von Umfragen im Testgebiet zur Akzeptanz der Plattform bei potenziellen Nutzern, sowie auf Anwender- und Käuferseite, (inkl. Durchführung, Evaluierung und Aufbereitung der Ergebnisse)

AP9 – Verwertung, Verbreitung und Kommunikation der Ergebnisse – (E8), 2.4

- Publikation von Projektergebnissen in wissenschaftlichen Papern und Fachzeitschriften
- Austausch mit anderen, vergleichbaren Projekten, anderen Forschern und Netzwerken
- Transparente Kommunikation der Projektergebnisse im Fachbereich und darüber hinaus auf Konferenzen, Tagungen und anderen Veranstaltungen
- Mitwirkung bei der Organisation und Durchführung von Workshops des Projektes zum Zwecke des Austauschs und der Verbreitung der Ergebnisse
- Verwertung der Forschungsergebnisse und Erkenntnisse, ggf. in Anschlussprojekten
- Mitwirkung bei der Konsolidierung der wichtigsten Ergebnisse des Projekts, Identifikation zu Anknüpfungspunkten zur Begleitforschung und Informationsaustausch
- Mitwirken bei der Adressierung von Hindernissen und Barrieren, um Handlungsempfehlungen für Wirtschaft und Politik aufzuzeigen und die Replizierbarkeit zu erleichtern

1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Teilvorhaben „Modellierung, Optimierung und Simulation Energiesysteme“ des Verbundprojektes MEMAP wurde von der Munich School of Engineering (MSE) der Technischen Universität München ausgeführt. Die MSE ist ein Integrative Research Center der Universität, welches Wissenschaftler aus unterschiedlichen Fachbereichen für die Bearbeitung von interdisziplinären Fragestellungen zusammenbringt. Unter Leitung von Professor Dr. Thomas Hamacher konzentrierte sich die Forschung auf Energie und Nachhaltigkeit mit den Schwerpunkten Energiesysteme der Zukunft, Sektorenkopplung, Erneuerbare Energien, Elektromobilität, Energieerzeugung, Energiespeicherung, Kraftwerkstechnologien, sowie Energieeffizienz im Bauwesen.

Die Bearbeitung des MEMAP-Forschungsprojektes oblag einem Team der Forschungsgruppe „Energy Efficient and Smart Cities“. Das Team bestand im Verlauf der Projektlaufzeit aus bis zu drei wissenschaftlichen Mitarbeitern und wurde zeitweise unterstützt durch zwei studentische Hilfskräfte, sowie durch weitere Studenten im Rahmen von Abschlussarbeiten und Praktika. Als universitärer Projektpartner brachte das Team dabei seine Kompetenzen in der mathematischen Modellierung und Optimierung, sowie der Simulation und Regelung intelligenter Energiesysteme und Infrastrukturen in das Projekt ein. Neben der Entwicklung des zentralen Regelungsalgorithmus der Plattform forschte die Gruppe zu innovativen Betriebsstrategien für Wärmenetze und Lernverfahren für dynamische Systeme. Darüber hinaus wurden energiewirtschaftliche Analysen zu Marktmechanismen für Quartierlösungen durchgeführt. Die MSE als Projektpartner hatte als universitäres Forschungsinstitut Einblick in die neuesten wissenschaftlichen Entwicklungen und Erkenntnisse auf den relevanten Feldern, sowie ein starkes Netzwerk im Bereich der Forschung und Entwicklung.

Teil der TUM MSE war das Center for Combined Smart Energy Systems (CoSES) mit zugehörigem gleichnamigem Labor und Forschungsgruppe. Das Labor ist ausführlicher in Teil II, Abschnitt 2.1 (E3).A.i beschrieben. Die Beteiligung der MSE am MEMAP-Projekt ermöglichte die Nutzung dieses Labors als Feldtestgebiet für die Validierung der Plattform mit realer Anlagentechnik. Da das MEMAP-Projekt als eines der ersten Projekte ausführlichere Experimente im CoSES-Labor durchführte, war das MEMAP-Team der TUM am Ausbau und der Finalisierung der Laborumgebung aktiv beteiligt. Es bedarf einer engen Abstimmung mit dem CoSES-Team, welches das Labor geplant und errichtet hatte. Im Projektverlauf verkleinerte sich das MEMAP-Team der TUM und die verbleibenden Mitarbeiter wurden in die CoSES-Forschungsgruppe integriert.

Das Konsortium von MEMAP setzte sich über die Projektlaufzeit hinweg aus folgenden beteiligten Partnern zusammen: fortiss GmbH (Konsortialführer), FENECON GmbH, Holsten Systems GmbH,

IBDM GmbH, Sauter-Cumulus GmbH, Zentrum Digitalisierung.Bayern und Technische Universität München. Dadurch, dass fast alle Projektpartner relativ lokal im Großraum München verortet waren, bot sich die Möglichkeit zahlreiche Konsortial- und Projekttreffen persönlich abzuhalten.

Bedingt durch die Umfirmierung des Projektpartners Zentrum Digitalisierung Bayern (ZD.B) zu Bayern Innovativ hat der Fördermittelgeber mit Bescheid vom 24.08.2020 die Förderung des Teilvorhabens 03ET1413G rückwirkend zum 01.04.2020 widerrufen. Durch diesen Widerruf schied der Konsortialpartner am 01.04.2020 aus dem Konsortium aus. Um den regulären Projektbetrieb aufrechterhalten zu können wurde nach Absprache mit dem Fördermittelgeber ein Teil der ehemaligen Projektaufgaben von der TUM übernommen. Hierfür erfolgte eine Aufstockung des Budgets der TUM und eine Verlängerung der Projektlaufzeit um 4 Monate. Die übernommenen Aufgaben wurden größtenteils über Unteraufträge an Bayern Innovativ abgedeckt.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Inhalte, Arbeitsschritte und Abläufe des Forschungsvorhabens MEMAP definierten sich über Arbeitspakete 1 bis 9. Die Arbeitspakete werden im Nachfolgenden kurz beschrieben. Die Aufgaben der Technischen Universität München (TUM) innerhalb der Arbeitspakete im Rahmen des Teilvorhabens „Modellierung, Optimierung und Simulation Energiesysteme“ (FKZ: 03ET1413B) sind im vorangehenden Abschnitt „Aufgabenstellung des Teilvorhabens“ näher definiert.

Das Arbeitspaket (AP) 1 - Management und Organisation umfasst die gesamte Projektlaufzeit. Es subsumiert interne und externe Informations- und Kommunikationsflüsse sowie Qualitäts- und Entscheidungsmechanismen, die genügend Flexibilität für die Projektentwicklung erhalten.

AP 2 - Anwendungsfälle und Anforderungen befasst sich mit der Definition von Szenarien zusammen mit den notwendigen Grundlagen und Anforderungen, sowohl aus technischer als auch aus rechtlicher und gesellschaftlicher Sicht.

In *AP 3 - Systemanalyse und Bewertung* wird eine Bestandsaufnahme der vorhandenen Infrastruktur durchgeführt. Diese Informationen stellen die Basis für die Analyse des Potenzials eines solchen Systems dar und erlaubten einen späteren Vergleich der Energieoptimierung unter Einsatz der zu entwickelnden Aggregationsplattform.

AP 4 - Entwicklung der Softwareplattform befasst sich mit dem Design und der Implementierung der Aggregationsplattform sowie der Anpassung und Einbindung der lokalen EMS. Im Rahmen dieses Arbeitspakets werden auch Sicherheitsaspekte, Optimierungsverfahren, notwendige Schnittstellen für externe und interne Dienste umgesetzt und die jeweiligen Komponenten getestet.

In *AP 5 - Benutzerschnittstellen und mobile Anwendungen* wird neben den eigentlichen Benutzerschnittstellen auch ein geeigneter Mechanismus zur dynamischen Generierung, Anpassung und Verteilung der HMIs für unterschiedliche Rollen entwickelt und in die Plattform integriert.

AP 6 - Simulation und Funktionsvalidierung befasst sich mit der Erweiterung der Plattform für den Live-Betrieb zu einer Simulationsumgebung, welche als Planungs- und Evaluierungswerkzeug für energieoptimierte Gebäude und Quartiere genutzt werden kann. Diese Simulationsumgebung soll mit dem BIM Standard integriert werden.

In *AP 7 - Implementierung und Feldteststudien* werden die entwickelten Komponenten für den Feldtest verfügbar gemacht, das Feldtestgebiet entsprechend vorbereitet und die Aggregationsplattform in Betrieb genommen, so dass der Anschluss der lokalen EMS möglich ist.

In *AP 8 - Analyse und Bewertung der wirtschaftlichen, sozialen und umweltspezifischen Aspekte* werden Kriterien zur Bewertung der effizienzsteigernden Maßnahmen aufgestellt, die für eine Energieoptimierung von Bedeutung sind. Zudem werden Umfragen zur Akzeptanz vor und während des Feldtests durchgeführt.

In *AP 9 - Verwertung, Verbreitung und Kommunikation der Ergebnisse* wird der Internetauftritt realisiert und das Projekt bzw. Teilergebnisse mittels Präsentation auf Messen, Ausstellungen, wissenschaftlichen Konferenzen und Papern vorgestellt. Die Ergebnisse und Analysen der einzelnen Arbeitspakete werden hier zusammengeführt und über unterschiedliche Kanäle der Öffentlichkeit vorgestellt.

Nachfolgend werden die Zusammenhänge zwischen den Arbeitspaketen und die Synergien grafisch dargestellt:

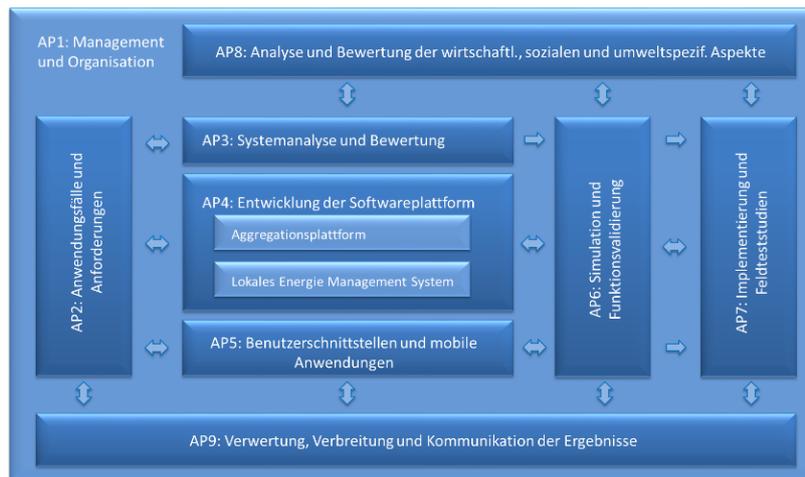


Abbildung 1: Zusammenhänge zwischen den Arbeitspaketen im Verbundprojekt

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Das Zusammenwirken von benachbarten Gebäuden über eine effiziente Energieinfrastruktur spielt eine Schlüsselrolle in der Optimierung der bedarfsnahen, dezentralen Energiebereitstellung und der Integration von fluktuierenden, erneuerbaren Energien.

Bei bisherigen Projekten waren im Gegensatz zu MEMAP unabhängige, einzelne Gebäude im Vordergrund gestanden. Dies hatte unmittelbare Auswirkungen auf Architekturentscheidungen, als auch auf die Gestaltung der Digitalisierung über Gebäude hinweg. Daher hebt dieser Punkt unser Vorhaben von bisher angestrebten Projekten deutlich ab, was sich auch in der Laufzeit des Projekts verstärkt gezeigt hat.

Weiter wurde bisher die Integration der dezentralen Energieerzeugung vor allem auf der Versorgungs- und Verteilnetzebene optimiert. Insbesondere der Austausch von Energie und die Interaktion von mehreren Gebäuden mit unterschiedlichen Bedarfsmustern waren stärker in den Fokus der Forschungsaktivitäten gerückt. MEMAP konnte sich hier als Vorreiter sehen, der die Interaktion von Gebäuden denkt, in Softwarearchitektur-Muster umsetzt und diese in der Realität erprobt. Eine Besonderheit war dabei, dass die Vernetzung nicht nur über Gebäude hinweg, sondern auch über unterschiedliche Technologien aus den Sektoren Strom und Wärme hinweg berücksichtigt wird.

Eine detailliertere Beschreibung des wissenschaftlichen und technischen Standes, an welchen im Projekt angeknüpft wurde, findet sich als Ergebnis der Recherchen zu Projektbeginn in Teil II des Abschlussberichts unter Abschnitt 2.1 (E0) A und B.

Im Folgenden sind in Tabelle 1 zusätzlich nationale und europäische Projekte aufgeführt, die im Zusammenhang mit dem Vorhaben stehen und deren Ausrichtung, sowie Ergebnisse als Ausgangsbasis verwendet wurden.

Tabelle 1: Darstellung verwandter nationaler und internationaler Projekte auf welche aufgebaut wurde.

Kurzbezeichnungen	Projektname	Räumliche Auflösung	Forschungsschwerpunkt
HeiPhoss, OpenMUC, Fellbach, Verschiedene LivingLabs (fortiss, KIT, TU Berlin)	Energie, Automatisierung und Anlagensteuerung	Gebäude	Fokus auf individuelle EMS-Lösungen zur Steuerung, Automatisierung, Optimierung stromverbrauchender Anlagen und Betriebsmittel zur Verbesserung der Energiebilanz. Ziele waren u.a. neue und standardisierte Schnittstellen, algorithmische Optimierung, Kommunikationsmittel und IKT-Architekturen.
OGEMA 2.0	Open-Source-Plattform für dezentrales Energiemanagement	Gebäude	Entwickelt wurde hier ein „Open Gateway Energy Management“ Software zur Optimierung der Energienutzung im Gebäude durch Funktionen wie Preis-basierten Management, Effizienzanalyse oder Wärmepumpenmanagement.
Projekthaus Ulm,	Energieoptimierung mittels Monitorings und intelligenter Steuerung	Gebäude	Monitoring und Betrieb von energieoptimierten Häusern, insbesondere unter Berücksichtigung von multi-energie Kriterien verschiedener Erzeugungs- und Verbrauchsanlagen.
E-Energy Modellstadt	Entwicklung und Test von intelligenten Energiesystem in sechs Modellregionen	Region bzw. Stadt	Das Kernziel war es, ein integriertes, alle Modellvorhaben überspannendes Architekturbild der eingesetzten und entwickelten IT-Systeme zu gewinnen. Schwerpunkt war dabei die dezentral erzeugte Energie sowie die wirtschaftlichen Aspekte des zukünftigen Marktdesigns. Forschungsbedarf besteht noch in den Bereichen Flexibilitätspotenziale, IKT-Infrastruktur und Sicherheit (System, Datenschutz, ...).
RegModHarz, STRAtEGy	Virtuelle Kraftwerke als Aggregationsplattform	Region bzw. Stadt	Fokus auf günstige Integration regenerativer Energien. Dabei standen bisher nur Erzeugungsanlagen im Vordergrund. Ein weiterer Forschungsbedarf liegt in der Optimierung des technischen Systems hinsichtlich des Lastmanagements (Schnittstellen und Kommunikation zwischen den Einheiten)

Energienetz Berlin Adlershof, Berlin Adlershof 2020+, EnEff: Stadt – Bottrop, Welheimer Mark	Energiestrategien städtischer Gebiete, Quartiere und Ensembles	Stadtquartiere bzw. Gebäudeblocks	Fokus auf Energiekonzepten für Gebiete, Blöcke und Quartiere zur Erhöhung der Energieeffizienz, Reduktion von CO ₂ und Dimensionierung von Energieerzeugern, Speichern und Lastmanagement um neue Energienutzungsmöglichkeiten als Verbund zu ermöglichen.
OPTIMUS (EU)	Optimierung der Energienutzung in Städten mit intelligenten Entscheidungsunterstützungssystem	Gebäude	Im Vordergrund stand das Aufzeichnen und Strukturieren von Daten, um diese für ein Entscheidungsunterstützungssystem zu verwenden. Basierend auf den Aufzeichnungen können Einsparungspotenziale identifiziert werden, wobei lediglich isolierte Gebäude betrachtet wurden.
CITYOPT (EU)	Ganzheitliche Simulation und Optimierung der Energiesysteme in Smart Cities	Gebäude bzw. Haushalt	Dieses Projekt befasst sich mit Langzeitoptimierungsstrategien. Demand Response Dienste richten sich vorrangig an einzelne Haushalte und nicht an einen komplexeren Zusammenschluss unterschiedlicher Entitäten.
LionGrid	Netzintegration dezentraler Energieerzeugungslagen mit Hilfe von Lithium-Ionen-Batteriespeichern	Region bzw. Stadt	In diesem Projekt werden Lithium-Ionen-Batteriespeicher bei der Einbindung dezentraler Energieerzeuger im Netz zur effizienteren Energienutzung berücksichtigt. Dabei liegt der Fokus auf der Erzeuger- und Versorgerseite
HOLISTEEC (EU)	Ganzheitliche und optimierte Lebenszyklus integrierte Unterstützung für die Konzeption und den Bau energieeffizienter Gebäude	Gebäude	Der Fokus liegt auf der energieeffizienten Planung einzelner Gebäude mit dem BIM Standard, wobei zahlreiche Faktoren, beispielsweise der Einfluss der direkten Umgebung mit berücksichtigt werden.
EVE - Effiziente VerbraucherEinbindung	Entwicklung einer Mensch-Maschine-Schnittstelle zur aktiven Einbindung des Verbrauchers in die elektrischen Energieversorgungssysteme zur optimierten Ausnutzung regenerativer Energiequellen	Gebäude	Der Fokus liegt auf der Verbrauchereinbindung und der daraus resultierenden Verhaltensänderung die bei der Energieeinsparung und der Verlagerung des Verbrauchs hilfreich ist.

Im Hinblick auf die vorgestellten Projekte lässt sich festhalten, dass das aggregierte Energiemanagement in dezentralen Energienetzen im Zusammenhang mit Forschungsaktivitäten zur Steigerung der Energieeffizienz im Vorfeld von MEMAP immer mehr an Bedeutung gewann. Die Optimierung der Energienutzung mittels Anlagensteuerung, Automatisierung und Monitoring (wie z.B. in OGEMA 2.0, HeiPhoss, Projekthaus Ulm oder OpenMUC) hatte sich bis dato auf einzelne Entitäten gerichtet. Durch die Aggregation der einzelnen EMS wurde in MEMAP eine erhöhte Ausschöpfung der Synergieeffekte zwischen benachbarten Gebäuden angestrebt.

Insbesondere auf europäischer Ebene hatten sich aktuelle Vorhaben (wie z.B. OPTIMUS, CityOPT, HOLISTEEC) auf eine ganzheitliche Untersuchung der energieeffizienten Planung in der Stadt fokussiert, wobei hier vorrangig isolierte Gebäude bzw. Haushalte betrachtet wurden.

Die Problematik des Zusammenschlusses und des energetischen Zusammenwirkens von einzelnen Gebäuden in einem Verbund wurde vor MEMAP, wenn auch selten, unter anderem in den Projekten E-Energy und RegModHarz angesprochen. Diese erkannten einen weiteren Forschungsbedarf in den Aspekten Flexibilität, IKT-Infrastruktur und Systemsicherheit vor allem hinsichtlich des Lastmanagements. Diese Herausforderungen wurden in MEMAP angegangen.

Während der Projektlaufzeit starteten das Forschungsprojekt TransUrban.NRW¹, welches verwandt zum MEMAP-Projekt ist. Im Unterschied zum Forschungsprojekt TransUrban.NRW, wo eine detaillierte und komplexe Co-Simulation der betrachteten Quartiere verwendet wird, soll MEMAP abstraktere und allgemeingültigere Modelle nutzen, welche den Parametrisierungsaufwand reduzieren und eine leichte Übertragbarkeit auf verschiedene Quartiere und Szenarien garantieren. Das Software-Framework TOP-Energy² weist Ähnlichkeit zur Zielsetzung des Planungstools im MEMAP-Projekt auf. Es ist für die Simulation, Analyse und Bewertung von komplexen Energiesystemen gedacht. Allerdings bietet das MEMAP-Projekt darüber hinaus die MEMAP-Plattform, welche für den Live-Betrieb von Quartieren entwickelt wurde.

Bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte, die für die Durchführung des Vorhabens benutzt wurden

Es wurden durch die Munich School of Engineering der Technischen Universität München im Projekt keine bekannten Konstruktionen, Verfahren oder Schutzrechte für die Durchführung des Vorhabens benutzt.

Verwendete Fachliteratur, sowie benutzte Informations- und Dokumentationsdienste

A. Fachliteratur

Die folgende Haupt-Fachliteratur (Auswahl) wurde durch die TUM im Projektverlauf konsolidiert.

i. Paper zu mathematischer Modellierung und Optimal Control von Multi-Energieströmen im Quartier

Beispielsweise Folgende:

- Geidl, M., & Andersson, G. (2007). Optimal power flow of multiple energy carriers. IEEE Transactions on Power Systems, 22(1), 145–155.
<https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.888988>

¹ <https://www.reallabor-transurban-nrw.de/>

² <https://www.top-energy.de/>

- Geidl, M., & Andersson, G. (2005). Operational and topological optimization of multi-carrier energy systems. 2005 International Conference on Future Power Systems, C, 6 pp. – 6. <https://doi.org/10.1109/FPS.2005.204199>
- Favre-Perrod, P. (2005). A vision of future energy networks. Proceedings of the Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa, 2005(July), 13–17. <https://doi.org/10.1109/PESAFR.2005.1611778>
- Nazar, M. S., & Haghifam, M. R. (2009). Multiobjective electric distribution system expansion planning using hybrid energy hub concept. Electric Power Systems Research, 79(6), 899–911. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.12.002>
- Benonysson, A., Bøhm, B., & Ravn, H. F. (1995). Operational optimization in a district heating system. Energy Conversion and Management, 36(5), 297–314. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(95\)98895-T](https://doi.org/10.1016/0196-8904(95)98895-T)
- Postnikov, I., & Stennikov, V. (2017). Methods and models of ensuring reliability of district heating systems with prosumers. E3S Web of Conferences, 25, 02009. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172502009>

ii. Paper zu Wärmenetzen (mit Prosumern) und deren Modellierung, sowie prädiktive Regelung

Beispielsweise Folgende:

- Sandou, G., Font, S., Tebbani, S., Hiret, A., & Mondon, C. (2005). Predictive Control of a Complex District Heating Network Qk. 7372–7377. <https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1583351>
- Lund, H., Werner, S., Wiltshire, R., Svendsen, S., Thorsen, J. E., Hvelplund, F., & Mathiesen, B. V. (2014). 4th Generation District Heating (4GDH). Energy, 68, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.02.089>
- Wang, H., Wang, H., Haijian, Z., & Zhu, T. (2017). Optimization modeling for smart operation of multi-source district heating with distributed variable-speed pumps. Energy, 138, 1247–1262. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.08.009>

iii. Paper zur Modellierung von Wärmespeichern

Beispielsweise Folgendes:

- Schütz, T., Streblov, R., & Müller, D. (2015). A comparison of thermal energy storage models for building energy system optimization. Energy and Buildings, 93, 23–31. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.02.031>

B. Informationsdienste

Als Informationsdienste dienen der TUM Suchmaschinen im Internet, wie beispielsweise Google oder spezifische wissenschaftliche Suchmaschinen, wie Google Scholar und Scopus oder wissenschaftliche Netzwerke, wie ResearchGate. Des Weiteren wurden Informationen bezogen aus besuchten Veranstaltungen (siehe Teil II des Berichts, Abschnitt 2.12.4) und zugehörigen Materialien, dem Austausch mit anderen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, sowie aus dem Kontakt mit Industrieunternehmen aus der Branche.

C. Dokumentationsdienste

Im Rahmen des Forschungsvorhabens MEMAP wurden die nachfolgenden Dokumentationsdienste eingesetzt.

GitLab – Wiki: Das Wiki diente zur Dokumentation und dem Informationsaustausch unter den Projektpartnern. Es ermöglichte die gemeinsame Bearbeitung von Dateien und Diskussion im Rahmen von MEMAP. Die Einsatzbereiche unterteilten sich in die folgenden Bereiche: Übersicht über Termine, Telefonkonferenz-Protokolle, Übersicht über Projekt-Meetings, Übersicht zu An-/Abwesenheiten, Organisation der Arbeitsgruppen, zentrale Sammlung und Austausch von Informationen, Konsolidierung und Zusammenfassung von Zwischenergebnissen, Verweise auf Dateiablageorte im Repository.

GitLab – Repository: Das Repository diente zur Ablage von Daten, Dokumenten und Objekten. Insbesondere handelt es sich hierbei um: Berichte, Zwischenberichte, Informationen zu den Arbeitspaketen, Dokumente der Arbeitsgruppen, Messwerten aus den Testgebieten, Informationen zu Projekttreffen, Wissensbasis, Dateien zur Außendarstellung des Projekts, Präsentationen.

Microsoft OneDrive: Ein gemeinsamer Microsoft OneDrive-Ordner wurde genutzt für das kollaborative Bearbeiten von Dokumenten, wie Fachpublikationen oder internen Deliverables.

NAS-Laufwerk: Für die interne Dokumentenablage an der TUM wurde ein gemeinsames NAS-Laufwerk der Forschungsgruppe verwendet, welches gehostet war auf den Servern des Leibniz-Rechenzentrums (LRZ) als zentrales Rechenzentrum der beiden Münchner Landesuniversitäten und der Akademie der Wissenschaften.

Projekthomepage: Eine Projekthomepage wurde gehostet vom Partner ZD.B (später Bayern Innovativ als Unterauftragnehmer der TUM). Über die Projekthomepage wurden während der Projektlaufzeit Neuigkeiten zum Projekt veröffentlicht und Projektveranstaltungen beworben. Die Homepage war / ist zu erreichen unter <https://memap-projekt.de/> .

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Projektkonsortium

Die von der Technischen Universität München durchgeführten Tätigkeiten im Forschungsvorhaben MEMAP waren u.a. Querschnittsaufgaben, die die inhaltlichen Arbeiten im Verbundvorhaben umschließen. Somit arbeitete die Technische Universität München direkt mit allen Partnern im Konsortium zusammen. Nachfolgend sind die einzelnen Partner der Konsortiums kurz beschrieben.

fortiss GmbH: Wir gestalten die digitale Transformation für Wirtschaft und Verwaltung in Bayern fortiss ist seit über zehn Jahren ein anerkannter und wichtiger Forschungspartner von Wirtschaft und öffentlicher Verwaltung in Bayern bei zukunftsweisenden Technologien des Software- und Systems-Engineering im Dienst der Zukunftsinitiative BAYERN DIGITAL. Damit werden wir dem Anspruch gerecht, wonach Vorsprung bei technologischen Schlüsselthemen im globalen Wettbewerb nur möglich ist, wenn sowohl die Grundlagenforschung als auch die Ausrichtung auf angewandte Forschung in der Entwicklung innovativer Produkte und Dienstleistungen mitberücksichtigt wird. Als Landesforschungsinstitut des Freistaats Bayern für softwareintensive Systeme und nichtkommerzielle, wissenschaftliche, rechtlich unabhängige, Forschungseinrichtung sind wir in der Rechtsform einer gemeinnützigen GmbH organisiert. Unsere Gesellschafter sind der Freistaat Bayern (2/3) und die Fraunhofer-Gesellschaft (1/3).

Sauter FM GmbH: Die weltweit tätige SAUTER Gruppe mit Hauptsitz in Basel (Schweiz) und Entwicklungs- und Produktionsstandort in Freiburg i. Br. (Deutschland) bietet seit über 100 Jahren Produkte, Kompetenz und Lösungen für Gebäudemanagement und Raumautomation während des gesamten Gebäude-Lebenszyklus an. Wir sind in den letzten Jahren stark gewachsen und zählen heute mit 2'400 Mitarbeitern weltweit und einem Umsatz von ca. 400 Mio € zu den führenden Anbietern in der Gebäudeautomation. Unser Angebot zeichnet sich durch Schweizer Produktqualität aus und umfasst die Dienstleistungen, Projekte, Services und Facility Management. Unsere flache und flexible Organisation erlaubt es uns als Hersteller schnell auf neue Marktbedürfnisse zu reagieren.

Zentrum Digitalisierung Bayern: Das Zentrum Digitalisierung.Bayern (ZD.B) ist eine deutschlandweit einzigartige Forschungs-, Kooperations- und Gründungsplattform, die als Impulsgeber in Zusammenarbeit mit Wirtschaft, Wissenschaft, Verbänden und öffentlichen Maßnahmen wirkt. Die ZD.B Themenplattform Energie beschäftigt sich mit der Gestaltung der Digitalisierung in der Energiewende und der Transformation der Energiesysteme, u.a. in der Beherrschung von Netzengpässen und dem effizienten Ausbau von Netzen, der regionalen Nutzung von Flexibilität, bei Energieeffizienz, der Sektorenkopplung, der Integration Erneuerbarer Energien und der Mobilitäts- und Wärmewende. Die Ziele der Aktivitäten der Themenplattform sind die Vermittlung von Kompetenz in digitalen Schlüsseltechnologien, die Gestaltung der regionalen Energiezukunft, die Stärkung von digitalen Innovationen im Energiebereich und die Schaffung von zukunftsfähigen Rahmenbedingungen und vernetzten, so dass die digitale Energiewende zu einem Erfolg gemacht werden kann.

Holsten Systems GmbH: Holsten Systems ist ein Ingenieurbüro für Automatisierungstechnik, wir planen und programmieren MSR und Gebäudeautomation mit Werk- und Montageplanung der Schaltschränke, quelloffener Programmierung und softwareseitige Einbindung von Datenanalyse. Unser Team spezialisiert sich auf Industrie- und Sonderbauprojekte, wo Energieeffizienz vor allem durch Wechselwirkung zwischen Produktion und technischer Gebäudeausrüstung möglich wird. Dabei setzen wir verstärkt auf innovative HW-/SW-Lösungen und Maschinendaten-Analyse.

IBDM GmbH: Wir sind seit 1997 Dienstleister in der technischen Gebäudeausrüstung (TGA), mit folgenden Schwerpunkten:

- Lösungen für fast alle messtechnischen Aufgaben in der Raumluft-, Heizungs-, Kältetechnik und Bauphysik
- Freie Sachverständige in den Gewerken (Klima, Lüftung, Heizung, Kälte, Elektro, Brandschutz) aus München
- Simulationsberechnungen, Wirkungsgradbestimmungen, Leistungsnachweise technischer Komponenten (Ventilator, Wärmetauscher, ...)
- Beratung, Verkauf und Vermietung von Messtechnik
- Qualifizierungsmessungen in der Reinraumtechnik
- Servicedienstleistung von elektrischen und pneumatischen Volumenstromreglern, auch Reparatur, Lieferung und Umrüstung auf alle gängigen Systeme
- Inbetriebnahme, Einregulierung, Vollständigkeits-, Abnahmeprüfungen, Abnahmemessungen der Gewerke Heizung, Kälte, Lüftung

FENECON GmbH: FENECON ist Systemintegrator von Stromspeichersystem und bekennt sich zum Ziel einer 100%-Energiewende. Um unser Ziel und unsere Vision zu verwirklichen, setzen wir auf eine dezentrale und erneuerbare Energieversorgung. Wir integrieren dazu Energiespeicher, E-Mobilität und Photovoltaik zu einem sinnvollen Gesamtkonzept. Neben Stromspeichern, Ladesäulen und PV-Modulen, bieten wir auch eine kompetente Beratung für die Energiewirtschaft an. Zudem betreiben wir intensive Forschungen mit Bezug zum Energiemarkt und realisieren erfolgreich Second Life Projekte mit der Automobilindustrie.

Externe Stellen

Insofern das Forschungslabor CoSES (Combined Smart Energy System) der Technischen Universität München nicht im ursprünglichen Projektantrag erwähnt wurde, ist dieses als externe Stelle zu nennen, mit welcher eng zusammengearbeitet wurde (siehe auch vorangegangener Abschnitt 1.2).

Darüber hinaus hat ein Austausch bzw. eine Zusammenarbeit mit weiteren Netzwerken, wie beispielsweise das Innovationsnetzwerk SmartQ³ und dem Forschungsnetzwerk EnergieWendeBauen⁴ stattgefunden. Mit dem SmartQ-Netzwerk gab es u.a. ein gemeinsames Webinar. Neben der regelmäßigen Teilnahme an Veranstaltungen des Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen, richtete das MEMAP-Konsortium als Gastgeber das 7. Projektleitertreffen des Forschungsnetzwerks im Jahr 2019 an der TUM aus (siehe auch Teil II des Berichts, Abschnitt 2.4 „Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen“). Auch gab es einen Austauschworkshop mit den Betreibern der GFal Gesellschaft zur Förderung angewandter Informatik e. V., den Entwicklern und Vertreibern der Softwarelösung TOP-Energy®⁵.

Im Rahmen der Aufstockung und Projektverlängerung hat die TUM Aufgaben des ausgeschiedenen Partner Zentrum Digitalisierung Bayern (ZD.B) übernommen. Die Bearbeitung der Aufgaben erfolgt über einen Unterauftrag der TUM an mit Bayern Innovativ. Hierbei konnte aufgrund der Umfirmierung mit demselben Personenteam zusammengearbeitet werden, das bereits aus der Arbeit mit Bayern Innovativ bekannt war. Nachfolgend eine kurze Beschreibung der Bayern Innovativ GmbH.

Bayern Innovativ GmbH: Die Bayern Innovativ GmbH ist die Gesellschaft für Innovation, Technologie- und Wissenstransfer in Bayern. Bayern Innovativ unterstützt Akteure aus Wirtschaft und Wissenschaft in allen Stufen der Wertschöpfungskette mit maßgeschneiderten Dienstleistungen, um ihre Innovationsdynamik zu erhöhen. Bayern Innovativ agiert dabei gezielt an den Schnittstellen unterschiedlichster Branchen und Technologien. Im Fokus der Aktivitäten stehen neben den eigenen Clustern Energietechnik, Automotive, Neue Werkstoffe und Mechatronik & Automation die Themen Gesundheit/Medizintechnik, Textil, Kultur- und Kreativwirtschaft sowie Digitalisierung. Zur Bayern Innovativ GmbH gehört seit 2020 auch die Themenplattform „Digitalisierung im Energiebereich“ im Zentrum Digitalisierung.Bayern (ZD.B). Große Bedeutung hat auch das „CrossClustering“ mit anderen bayerischen Clustern sowie die Vernetzung mit anderen wesentlichen Playern in der Innovationslandschaft Bayerns. Das von Bayern Innovativ betriebene ‚ThinkNet Bayern‘ verknüpft Experten und deren Wissen mit modernen Methoden des Innovationsmanagements. Ziel ist ein Ecosystem mit dynamischen Netzwerken für einen beschleunigten Innovationsprozess. Das vom Bayerischen Ministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie geförderte Unternehmen versteht sich als Wissensmanager, Impulsgeber und Beschleuniger für Innovationen

³ <https://www.smartq-netzwerk.de/>

⁴ <https://www.energiewendebauen.de/>

⁵ <https://www.top-energy.de/>

1.6 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Positionen	bewilligter Finanzierungsplan	tatsächliche Ausgaben und Zuwendungen
0812 Beschäftigte E12-E15	459.855,35 €	459.997,91 €
0817 Beschäftigte E1-E11	0,00 €	0,00 €
0820 Lohnempfänger(innen) MTArb	0,00 €	0,00 €
0822 Beschäftigungsentgelte	10.881,26 €	11.280,37 €
0824 Summe Personal (A)	470.736,61 €	471.278,28 €
0831 Gegenstände bis 410€	41,65 €	41,65 €
0834 Mieten und Rechnerkosten	0,00 €	0,00 €
0835 Vergabe von Aufträgen	47.750,61 €	47.750,61 €
0843 Sonstige allgemeine Verwaltungsausgaben	0,00 €	0,00 €
0846 Dienstreisen	4.804,01 €	2.158,52 €
0847 Summe sächliche Verwaltungsausgaben (B)	52.596,27 €	49.950,78 €
0850 Gegenstände > 410 €	1.729,10 €	1.729,10 €
0861 Gesamtausgaben	525.061,98 €	522.958,16 €
0862 Eigenmittel des Antragstellers	0,00 €	0,00 €
0863 Mittel Dritter / Einnahmen	2.400,00 €	2.400,00 €
0864 Zuwendung	522.661,98 €	520.024,32 €

1.7 Darstellung des wissenschaftlich-technischen Ergebnisses des Vorhabens, der erreichten Nebenergebnisse und der gesammelten wesentlichen Erfahrungen

In diesem Abschnitt erfolgt eine stark verkürzte Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisses des Teilvorhabens, der erreichten Nebenergebnisse und der gesammelten wesentlichen Erfahrungen. Die ausführlichen Projektergebnisse des Verbundvorhabens finden sich in Teil II des Schlussberichts unter Abschnitt 2.1 „Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele“. Darunter finden sich auch die Ergebnisse der Technischen Universität München. In Abschnitt 1.1 dieses Schlussberichts ist die konkrete Aufgabenstellung des Teilvorhabens näher erläutert.

Hauptergebnisse

- Ein Plattformkonzept für die Vernetzung von lokalen Energiemanagementsystemen im Quartier zum Zwecke des optimalen energetischen Betriebs im Verbund wurde mitentwickelt.
- Geeignete abstrakte und transferierbare Modelle für die Abbildung der relevantesten Anlagenklassen im Quartier wurden adaptiert und entwickelt.
- Ein modellprädiktiver Regler für die gekoppelte Optimierung von elektrischen und thermischen Energieströmen im Quartier wurde formuliert.
- Es wurde stark bei der Softwareimplementierung und dem Debugging des MPC mitgewirkt. Quellcode unter <https://git.fortiss.org/ASCI-public/memap>
- Ein Datenmodell und Kommunikationskonzept für den Einsatz der Regler wurde mitentwickelt und für den Einsatz im Livebetrieb angepasst.
- Die Praxistauglichkeit der entwickelten Konzepte und Schnittstellen wurde gezeigt durch Einbindung in ein realitätsnahes Laborumfeld mit realer Anlagentechnik.
- Die Funktionsvalidierung der entwickelten Konzepte und Software-Artefakte anhand von Experimenten in einer Laborumgebung mit realen Anlagen wurde vorbereitet, erfolgreich durchgeführt und ausgewertet.
- Ökonomische und ökologische Vorteile des optimierten Verbundbetriebs gegenüber dem optimierten Einzelbetrieb wurden anhand von Simulationsstudien gezeigt.

Nebenergebnisse

- Geeignete Vergütungsmodelle und die Allokation von Kosten für den optimierten Betrieb eines Energieverbundes wurden untersucht.
- Die technische Umsetzung der ermittelten Wärmeströme zwischen Prosumern im Quartier wurde untersucht. Der Fokus lag dabei auf der notwendigen Infrastruktur und deren Regelung.

- Die Akzeptanz des MEMAP-Konzeptes bei potenziellen Betreibern, Anwendern und Kunden wurde anhand von Umfragen untersucht, wobei insgesamt eine positive Resonanz festzustellen war.

Wesentliche Erkenntnisse

- Der Betrieb im Verbund ist aufgrund der Nutzung von Synergien fast immer vorteilhaft gegenüber dem Einzelbetrieb. Quantitative Aussagen sind schwer allgemeingültig zu treffen, da die Vorteile sehr sensitiv sind gegenüber dem gegebenen Szenario und Rahmenbedingungen.
- Energiespeicher sind das zentrale Element, um zeitvariable Rahmenbedingungen (wie schwankende Preise oder volatile Erzeugung) bei der Optimierung nutzen zu können, da Speichereinheiten die zeitliche Entkopplung von Erzeugung und Verbrauch ermöglichen.
- Modellprädiktive Regelungsansätze wie der gewählte sind mit geeigneten abstrakten Modellen sehr gut geeignet für das sektorenübergreifende Energiemanagement im Quartier. Diese Ansätze erlauben es Beschränkungen zu berücksichtigen, Prognosen einzubinden, und so proaktiv zeitvariable Rahmenbedingungen auszunutzen.
- Die lokalen Energiemanagementsysteme (EMS) sind ein zentraler Baustein für die Umsetzung von Energiemanagement im Quartier. Die diversen Anforderungen werden von heute verfügbaren EMS-Lösungen noch nicht alle erfüllt. Anforderungen sind u.a.:
 - Geeignete Kommunikationsschnittstellen (z.B. OPC UA)
 - Möglichkeit der Verarbeitung von abstrakten Leistungssollwerten aus der Plattform und deren Übersetzung in konkrete technische Sollwerte für die Anlagentechnik (z.B. Steuersignale für Pumpen und Ventile)
 - Eine interne Logik, welche die koordinierte Kommunikation mit der Plattform erlaubt (z.B. anhand eines Triggers)
 - Möglichkeit der Einbindung von externen Vorhersagen zu zeitvariablen Rahmenbedingungen (wie Verbräuchen, erneuerbaren Erzeugungspotenzialen, Preisen)
 - Möglichkeit der Weitergabe externer Vorhersagen an das Quartiersenergiemanagement in geeignetem Format und für den geeigneten Horizont
- Es gibt einen inhärenten Zweispart zwischen der Abstraktion auf der Managementebene und der technischen Umsetzung auf der Feldebene. Um eine möglichst breite Anschlussfähigkeit und Transferier- bzw. Erweiterbarkeit auf Managementebene (Plattform) zu garantieren, sind abstrakte Modelle mit geringem Parametrisierungsbedarf notwendig. Dies führt jedoch dazu, dass einige technische Details, nicht direkt im Management berücksichtigt werden können, wie z.B. Temperatur- und Spannungsniveaus, Frequenzen usw. Für die technische Umsetzung auf der Feldebene sind diese Größen jedoch höchst relevant, da z.B. ein

Wärmebedarf von 5 kW auf 70°C nicht mit 5 kW Wärme auf 40°C aus einem Speicher gedeckt werden kann. Eine Beachtung der technischen Größen bereits bei der Optimierung auf Managementebene führt jedoch zu komplexen und schwer handhabbaren Modellen. Für die Auflösung dieses Widerspruchs bedarf es weiterer Forschung und Entwicklung.

- Die Infrastruktur für die technische Umsetzung bidirektionaler Wärmeströme zwischen Prosumern im Quartier ist im Feld noch nicht vorhanden und befindet sich noch in der Forschung bzw. Entwicklungsebene. Viele wissenschaftliche Untersuchungen zum Energiemanagement im Quartier nehmen die Möglichkeiten der technischen Umsetzung jedoch fälschlicherweise als gegeben an. Erste Untersuchungen im Rahmen des Projektes zeigten, dass die Modellierung und Regelung bidirektionaler Wärmenetze aufgrund der dezentralen Akteure und deren gegenseitigen Abhängigkeiten sehr komplex sind. Hier herrscht weiterer Forschungsbedarf.
- Es fehlen praxistaugliche Business- oder Marktmodelle für lokale und gekoppelte thermische und elektrische Energiesysteme. Die Untersuchungen im Projekt ergaben, dass selbst unter Annahme eines gemeinnützigen Verhaltens aller Teilnehmer zum optimalen Energietausch die anschließende Allokation der Kosten und Gewinne sehr komplex ist und dafür noch keine praxistaugliche Lösung existiert.

1.8 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Es gab und gibt keine Erfindungen / Schutzrechtsanmeldungen oder erteilte Schutzrechte mit Bezug auf das betreffende Vorhaben. Solche sind derzeit auch nicht geplant durch die Technische Universität München oder deren Beschäftigten im Projekt.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

Durch das Forschungsprojekt konnte die Munich School of Engineering ihre Kompetenzen im Bereich der Multi-Energiesystemen erweitern. Dies betrifft nicht nur eine erhöhte Expertise in den wissenschaftlichen Disziplinen Modellierung und Optimierung und deren mitunter anspruchsvolle Anwendung in der Praxis, sondern schließt auch Wissen über Effizienzpotenziale in Quartieren und Synergieeffekte durch Gebäudeaggregation unter Speichereinsatz ein. Darüber hinaus konnten Erfahrungen in der praktischen Umsetzung und der dafür notwendigen Daten-, Kommunikations- und Regelungsstrukturen gewonnen werden. Diese Erfahrungen fließen in alle weiteren Forschungsvorhaben des Instituts mit ein.

Für die Labortests von MEMAP musste die CoSES-Laborumgebung entsprechend weiter in Betrieb genommen und ertüchtigt werden. Die hierfür notwendigen Anpassungen an Algorithmen und Schnittstellen, sowie gewonnene Erfahrungen erleichtern zukünftige Tests auch mit anderen externen Plattformen. Darüber hinaus können Algorithmen, Schnittstellen, Kommunikationsprotokolle und -infrastruktur des MEMAP-Projektes auch über das Projekt hinaus im Laborumfeld als Referenzsystem verwendet und erweitert werden.

Die gewonnenen Erfahrungen und Messdaten aus dem Feldtestgebiet Riemerling sind wesentlich und wertvoll für das anwendungsnahe Forschungsfeld mit starkem Bezug zu Use-Cases. Diese Daten können in weiteren Projekten z.B. als Grundlage für simulative Case-Studies verwendet werden.

Bereits während des Projektverlaufs bot das Forschungsprojekt dem Institut die Chance Studentinnen und Studenten einzubinden und diese so praxisnah an die Forschungsthemen heranzuführen. Auch über das Projekt hinaus können nun im Rahmen der Lehre Erfahrungen aus dem Projekt an die Studierenden weitergegeben werden. Zusätzlich werden die Ergebnisse auch zukünftig vom Institut auf Workshops und Konferenzen verbreitet und diskutiert. Die Veröffentlichung eines weiteren wissenschaftlichen Papers zum Projekt ist geplant. Dieses soll den Weg von der Modellierung von lokalen Multi-Energiesystemen, über die Plattformentwicklung und Implementierung bis hin zur Funktionsvalidierung im Laborumfeld beschreiben.

Wie bereits zu Beginn des Projektes zu erkennen war, geht der Trend in der Energieforschung weg von der Betrachtung einzelner Gebäude hin zur Betrachtung von Verbänden, wie Quartieren. Das MEMAP-Projekt hatte darauf bezogen eine Vorreiterrolle. Die Technische Universität München (TUM) hat im Projektverlauf weiteren Forschungsbedarf insbesondere auf der thermischen Seite urbaner Energiesysteme identifiziert. Dies betrifft die technische Umsetzung lokaler thermischer Netze für den Energietausch, deren Interaktion mit dem Energiesystem und geeignete Business Modelle, sowie lokale Marktansätze für deren Betrieb. Auch wurde die enorme Bedeutung der durchgängigen Kopplung von Marktebene, Managementebene und technischer Umsetzungsebene für die Anwendung im Feld mit realen Anlagen deutlich. Diese Themen wird die TUM auch im Zusammenhang mit dem CoSES-Labor zukünftig genauer untersuchen und dabei auf die Erkenntnisse aus MEMAP aufbauen. Ein thematisches Nachfolgeprojekt hierzu startete bereits mit dem Forschungsprojekt OSkit (FKZ: 03EN3032A). OSkit beschäftigt sich mehr auf technischer Ebene mit der Umsetzung eines optimierten Energietauschs wie er durch MEMAP berechnet wird

und berücksichtigt ebenfalls die Interaktion mit dem Stromsystem. Weitere Forschungsprojekte, Dissertationen und Paper zu den identifizierten Themen sollen folgen. Beispielsweise wäre ein Folgeprojekt zum Einsatz der MEMAP-Plattform in einem bewohnten Quartier im Sinne eines Reallabors ein logischer nächster Schritt.

Nicht zuletzt stand und steht die TUM der Begleitforschung des Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen zur Verfügung, um die Forschungsergebnisse innerhalb des Netzwerks zu verbreiten und so anderen Projekten zugänglich zu machen, damit diese darauf aufbauen können. Ein erstes entsprechendes Interview mit der Begleitforschung hat bereits stattgefunden.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

Die Munich School of Engineering (MSE) als Forschungseinrichtung an der Technischen Universität München sieht keine direkte Vermarktung und Verwertung entwickelter Lösungen vor. Allerdings wird durch das erlangte Know-how im Bereich des energieoptimierten und sektorengekoppelten Betriebs von Gebäudeverbänden mittelfristig eine Stärkung des Beratungsportfolios des Instituts angestrebt. Resultierende Studien und Beratungsprojekte, sowie drittmittelgeförderte Forschungsprojekte sind Teil des nachhaltigen Finanzierungskonzepts des Forschungsinstituts.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Aus den durchgeführten Aufgaben, den erarbeiteten Ergebnissen und den wesentlichen Erkenntnissen daraus, sind mögliche Anknüpfungspunkte für weitergehende Untersuchungen

- Einbindung weiterer Sektoren (wie Wärme oder Mobilität) und entsprechende Modelle dazu
- Einbindung technisch relevanter Größen (wie z.B. Temperaturniveaus) in die Kernalgorithmen und den Regler
- Untersuchungen zur Performance des Reglers unter fehlerbehafteter bzw. ungenauen Prognosen
- Untersuchungen zu Sicherheitsaspekten oder Notfall-Verhaltensweisen bzw. -Szenarien (z.B. Ausfall der Kommunikation, Ausfall einer Versorgungsanlage, kein Optimierungsergebnis)
- Entwicklung geeigneter lokaler Energiemanagement-Systeme, welche den Anforderungen im vorangegangenen Abschnitt entsprechen
- Weiterführende Forschung zur technischen Umsetzung von bidirektionalen Wärmeströmen zwischen Prosumern in einem lokalen Wärmenetz und die Regelung der entsprechenden Infrastruktur
- Entwicklung und Ausarbeitung von Business-, Vergütungs- oder Marktmodellen für lokale thermische Energiesysteme mit bidirektionalen Wärmeströmen zwischen Prosumern
- Entwicklung von Ansätzen zu dem unter 1.7 „Wesentliche Erkenntnisse“ dargelegten Widerspruch zwischen der Abstraktion auf der Managementebene und der technischen Umsetzung auf der Feldebene
- Weitergehende Untersuchungen zur Wirtschaftlichkeit lokaler Energie-Communities unter verschiedensten Rahmenbedingungen und unter Berücksichtigung von Einflussfaktoren, welche über den Betrieb hinaus gehen (z.B. Investitionskosten, LifeCycleAnalysis etc.)
- Anwendung der MEMAP-Plattform zur Steuerung von Anlagentechnik in einem bewohnten Quartier im Sinne eines Reallabors

2 Teil II: Eingehende Darstellung der Projektergebnisse (Gesamtkonsortium)

2.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

Das folgende Kapitel beschreibt die wichtigsten Ergebnisse im Projekt inklusive der gemachten Annahmen, den technischen Entwicklungen, den im Projekt untersuchten Szenarien die simulativ und in den Testgebieten durchgeführt wurden. Zusätzlich werden die daraus resultierenden Erkenntnisse und die damit verbundenen Herausforderungen aus technischer, organisatorischer und regulatorischer Sicht beschrieben. Dargelegt werden die Schritte zur Verwertung der Ergebnisse und schließlich die Anknüpfungspunkte mit externen Partnern damit die Ergebnisse möglichst bald im Feld verwirklicht werden können. Die Ergebnisse werden den geplanten Projektzielen gegenübergestellt, um die Verwendung der Zuwendung zu erläutern.

Zur Erarbeitung der Ergebnisse gab es im Projekt dezidierte Arbeitsgruppen. Jede Arbeitsgruppe bestand aus mehreren Projektpartnern und hatte einen speziellen Fokus. Damit wurden die Ziele auf kleinere Interessensgruppen runtergebrochen. Jeder Partner hatte, je nach Partnerschwerpunkt und Interesse, die Möglichkeit an jeder beliebigen Arbeitsgruppe teilzunehmen und auch die Möglichkeit eine Arbeitsgruppe zu etablieren, um ein für ihn wichtiges Thema zu treiben. So wurden im Laufe des Projektes mehrere Arbeitsgruppen gestartet, nach Abschluss des Themas beendet, neustrukturiert oder neue Gruppen etabliert. Die Arbeitsgruppen berichteten im Laufe des Projektes an alle Projektpartner ihre Ergebnisse, um den Fortschritt zu synchronisieren. Dies erfolgte bei den zweiwöchentlichen Telefonkonferenzen, themenspezifischen Abstimmungstreffen, sowie umfangreicheren halbjährlichen Konsortialtreffen. Im Projekt gab es folgende (temporäre) Arbeitsgruppen: AG Anforderungen, AG Modellierung, AG Geschäftsmodelle, AG Plattform, AG Simulation, AG Feldtest & AG CoSES, AG Visualisierung, AG Verwertung

Dieses Berichtskapitel ist im Folgenden unterteilt in mehrere Abschnitte, die den inhaltlichen und zeitlichen Verlauf des Projektes widerspiegeln. Die Abschnitte sind wie folgt gegliedert:

(E0) Hintergrund / Technische Grundannahmen

Beschreibung des Projekthintergrunds und der Grundannahmen hinsichtlich der technischen, ökonomischen, ökologischen und soziologischen Rahmenbedingungen. Damit einhergehend werden auch die Grenzen des Betrachtungshorizonts im Projekt abgesteckt und abgegrenzt unter welchen Voraussetzungen die Erkenntnisse des Projektes Gültigkeit besitzen bzw. wozu keine Aussage getroffen werden kann. Dieser Abschnitt basiert auf den Arbeiten, die in AP2 und AP3 durchgeführt wurden. Es wurde von den AG Anforderungen, AG Modellierung und AG Geschäftsmodellen von allen Projektpartnern gemeinsam erarbeitet und in den Deliverables L2.1 – L2.3 ausführlich dokumentiert.

(E1) Entwicklung der Plattform / Modelle / Backend

Dieser Abschnitt behandelt die technischen Entwicklungen im Projekt. Der Fokus liegt hier auf den Kernkomponenten von MEMAP. Dazu gehört die Softwarearchitektur, Datenkommunikation und -Aggregation inkl. zugehörigem Datenmodell und plattformfähigen Schnittstellen, sowie die Datenverarbeitung mittels Algorithmen im Softwarekern zur Optimierung der Energieströme im Live-Betrieb. Dieser Abschnitt basiert auf den Arbeiten in AP4 und wurde in der AG Modellierung und AG Plattform von fortiss, der TUM und dem Z.DB erarbeitet.

(E2) Interaktion mit System für Benutzern / Benutzeroberflächen / Frontend

Nutzer, wie der Systembetreiber oder einzelne Teilnehmer können durch eine Benutzeroberfläche ihr System interaktiv einbinden und Anlagen monitoren, auch wenn der tägliche Betrieb ohne Nutzereingriff erfolgen kann. Die Visualisierung basiert auf den Arbeiten in AP5 und wurde im Projekt von der AG Visualisierung, AG Geschäftsmodelle und AG Plattform konzipiert und von Holsten Systems erarbeitet. In diesem Abschnitt werden die wesentlichen Ergebnisse gezeigt.

(E3) Feldtests

Im Projekt dienen mehrere Feldtests zur Evaluierung des Ansatzes, der eingesetzten Technologien und zur Demonstration von systemischen Aussagen. In diesem Abschnitt beschreiben wir die zwei Testgebiete im Projekt (a) Riemerling – ein Quartier im Mischgebiet mit unterschiedlichen Stakeholdern als Bestandsgebiet zur Datenaufnahme; und (b) CoSES – das Center for Combined Smart Energy Systems der TUM als Laborumgebung zum Test der MEMAP-Plattform als Regler im Live-Betrieb mit realer Anlagentechnik. Die umfangreichen Arbeiten an den Feldtests erfolgten im Rahmen von AP7. Gleichzeitig dienten die Feldtests als Workshopumgebung auch für Arbeiten in AP8. Die Feldtests wurden von Sauter-Cumulus, IBDM und der TUM in der AG Feldtest & AG CoSES erarbeitet und wurden von der AG Verwertung durch das Z.DB (später im Unterauftrag von fortiss/TUM) stark unterstützt.

(E4) BIM – Integration des Building Information Models

Dieser Abschnitt beschreibt die bearbeiteten Aufgaben, bei denen BIM zum Einsatz kam. BIM Building Information Modeling (Bauinformationsmodell) ist eine gemeinschaftliche Arbeitsmethodik auf Basis digitaler Modelle eines Bauwerkes. Alle für seinen Lebenszyklus relevanten Informationen und Daten werden konsistent erfasst, verwaltet und in einer transparenten Kommunikation zwischen den Beteiligten ausgetauscht oder für die weitere Bearbeitung übergeben. BIM diente in diesem Projekt dazu die technologische Durchgängigkeit am Beispiel Riemerling durch alle digitalen Systeme zu eruieren. Datenerfassungen und deren Verarbeitung in einer Planung soll in diesem Modell erfasst werden. Die Arbeiten zu BIM waren vor allem in AP6 angesiedelt, es gab aber auch Vorarbeiten dazu im AP3 und AP4. Hieran beteiligte sich im Wesentlichen IBDM und fortiss im Rahmen der AG Simulation.

(E5) Planungswerkzeug

Das im Projekt entstandene Planungswerkzeug wird in diesem Abschnitt beschrieben. Das Planungswerkzeug war die technische Grundlage für Simulationen, diente dem Testen der grundlegenden Optimierungsalgorithmen und zur Berechnung von Fallstudien. Die Arbeiten waren AP6 zugeordnet und auf AG Ebene wurden die Themen durch die TUM, fortiss und Fenecon in der AG Modellierung und AG Simulation erarbeitet.

(E6) Fallstudie / Wirtschaftlichkeitsanalyse

Die Fallstudie wurde im Rahmen von AP6 und AP8 zur Evaluierung der Wirtschaftlichkeit des Konzepts und als Untersuchung einer möglichen Verwertbarkeit durchgeführt. In diesem Abschnitt beschreiben wir am Beispiel Riemerlings die Ergebnisse, aber auch die Grundannahmen für die Wirtschaftlichkeitsanalyse. An der Durchführung beteiligten sich insbesondere Sauter-Cumulus und IBDM im Rahmen der AG Simulation und die AG Verwertung.

(E7) Akzeptanz und Verwertung

In diesem Abschnitt werden alle Projektaktivitäten beschrieben, die im Rahmen von AP8 die Fragen der Akzeptanz und Verwertbarkeit betreffen. Es wird eine Übersicht über alle Workshops, Umfragen samt Ergebnissen und sonstige Aktivitäten gezeigt. Die Arbeiten wurden überwiegend durch Sauter-Cumulus, Holsten System und das Z.DB (später im Unterauftrag von fortiss/TUM) im Rahmen der AG Verwertung durchgeführt.

(E8) Key-Findings und Handlungsempfehlungen

Die wesentlichen Ergebnisse und Key-Findings aus dem Projekt werden in diesem Abschnitt noch einmal zusammengefasst. Aus den Key-Findings folgen schließlich Handlungsempfehlungen, die nicht nur MEMAP, sondern generell wichtige gesellschaftliche Ziele betreffen und einen hohen Beitrag zu den zwei Säulen Digitalisierung und Klimaschutz leisten. Die Key-Findings und Handlungsempfehlungen wurden von allen AGs, allen Projektpartnern und im Laufe aller APs gleichermaßen erarbeitet.

Tabelle 2: Zuordnung der thematischen Ergebnisfelder E0 – E8 zu den durchgeführten Arbeitspaketen AP1 – AP9 laut Antrag im Projekt. Die dunkelblauen Quadrate zeigen einen direkten Bezug, die hellblauen Quadrate repräsentieren einen Bezug aus Synergieeffekten.

Arbeitspakete laut Antrag	Zuordnung zu den Ergebnissen								
	E0	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8
AP1: Management & Organisation									
AP2: Anwendungsfälle & Anforderungen									
AP3: Systemanalyse & Bewertung									
AP4: Entwicklung der Softwareplattform									
AP5: Benutzerschn. & mobile Anwendungen									
AP6: Simulation & Funktionsvalidierung									
AP7: Implementierung & Feldteststudien									
AP8: Analyse & Bewertung wirtschaftlicher, sozialer und umweltspezifischer Aspekte									
AP9: Verwertung, Verbreitung & Komm.									

Die einzelnen Arbeitsergebnisse haben wir auch technisch in unsere Architektur eingearbeitet (dargestellt in Abbildung 1).

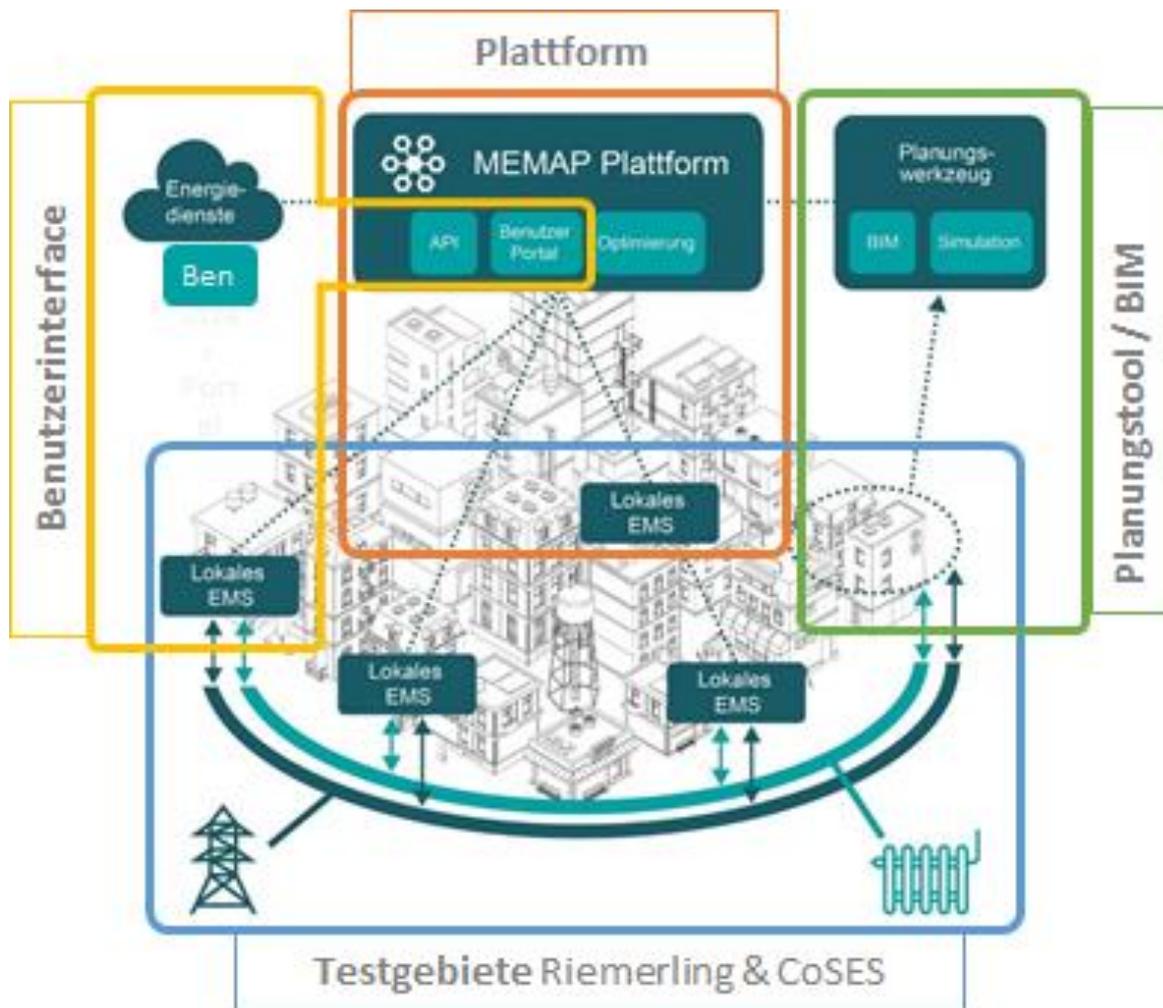


Abbildung 2: Zuordnung der technischen Arbeitsergebnisse zu den einzelnen Aufgabengebieten im Projekt.

(E0) Hintergrund und Technische Grundannahmen

Die ersten Projektschritte dienten uns dazu vorhandenen Erfahrungen zu sammeln und den Stand der Forschung und Praxis nochmal mit allen Partnern zu spiegeln. Es sollten fixe und allgemein gültige Annahmen für den weiteren Projektverlauf getroffen werden, die sich am aktuellen Stand der technischen Praxis orientieren. Die Annahmen schufen eine gemeinsame Arbeitsbasis, mit der alle Projektpartner einverstanden waren und auf die im Projektverlauf aufgebaut werden konnte, um neue innovative Anwendungsfälle und Optimierungen für einen Quartiersbetrieb der Zukunft umzusetzen. Im AP2 „Anwendungsfälle & Anforderungen“ wurde zunächst mit einer Recherche begonnen und basierend darauf die nächsten Schritte für AP3 „Systemanalyse & Bewertung“ festgelegt. Im Folgenden fassen wir unsere ersten Erkenntnisse und Arbeitsschritte aus den Arbeiten zusammen.

A. Recherchen und Vorarbeiten im Projekt

Die Ausgangsbasis für unser Projekt waren mehrere Beobachtungen im Quartier, vor allem im Bestand. Wir können die Beobachtungen kategorisieren in energietechnische Ausstattung, digitale Technologien, aktuelle Prozesse im Gebäudesektor bei Planung und Betrieb, neue Anwendungen und Geschäftsmodelle sowie die rechtlichen Rahmenbedingungen. Diese Beobachtungen wurden in drei internen Berichten festgehalten, deren Unterstruktur im Anhang „(A5) Interne Berichte zu Grundlagen und Rahmenbedingungen“ eingesehen werden kann:

- L2.1 Grundlagenkatalog für Energieoptimierte Gebäude
- L2.2 Anwendungsfälle und technische Anforderungen
- L2.3 Rechtliche Anforderungen und Geschäftsmodelle

B. Wo bewegen wir uns?

i. Technischer Stand der Praxis

Ein Gebäude Energiemanagement System – kurz lokales EMS, H(ome)EMS oder B(uilding)EMS – dient dazu, eine Reihe von Komponenten, wie beispielsweise Heizungs- und Klimaanlage, thermische Speicher, Warmwasseraufbereitung, PV, Solarthermie, Batterieanlagen, aber auch weiße und braune Ware (damit sind Gegenstände gemeint, die im Haushalt / Büro genutzt werden und einen Einfluss auf den Verbrauch haben und ggf. in ein EMS eingebunden sind) möglichst energieeffizient zu bedienen und gleichzeitig einen möglichst hohen Komfort zu gewährleisten. Dazu werden die Komponenten mess- und steuerungstechnisch an eine (software-technische) Steuerzentrale angebunden und dort eingeregelt. Die Einregelung bedeutet das gewisse Steuerungsparameter, wie Temperaturgrenzen, Pumpgeschwindigkeiten, Ein- und Ausschaltvorgänge und wechselseitige Abhängigkeiten eingestellt werden.

Einfache Beispiele sind die Ansteuerung von Heizanlagen. Zum Beispiel sollen diese für die Warmwasseraufbereitung ab bestimmten Temperaturunterschreitungen (z.B. 45°C) angehen und bei bestimmten oberen Schranken (z.B. 90°C) wieder ausgehen. Eine wechselseitige Abhängigkeit wäre zum Beispiel, dass Heizungen bei geöffneten Fenstern abgeschaltet werden. Weitere Beispiele sind zeitgeregelt Ein/Ausschaltvorgänge, die Abstimmung der Hydraulik (hydraulischer Abgleich) sowie weitere mehr oder weniger komplexe Regeln für die Ansteuerung von Komponenten.

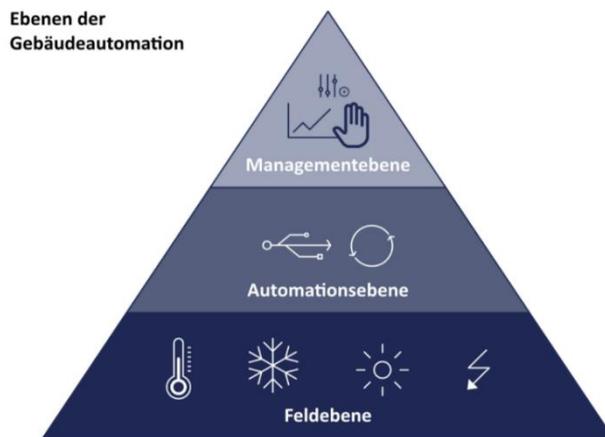


Abbildung 3: Typische Ebenen der Gebäudeautomation (Quelle: Baunetz (si), Berlin)

Die technische Einbindung der Systeme hat oft eine lange Tradition durch Systemanbieter von Gebäudeautomatisierungssystemen. Diese bieten eine große Vielfalt an Komponenten, verschiedenen Steuerungen und Softwares an. Die Automatisierungssystemarchitektur ist oft am SCADA-Konzept ausgelegt, einschließlich der verschiedenen Schichten für Feldgeräte, der Automatisierung mit SPS-Komponenten und der oberen Schicht für die Managementsoftware. Die Mächtigkeit der Lösung (die Unterstützung unterschiedlicher Kommunikationsprotokolle und Umfang der Funktionalität) hängt dabei stark von den eingesetzten Komponenten ab. Man kann jedoch davon ausgehen, dass die grundsätzliche Architektur durch einen geschichteten Ansatz (Feldebene, Automationsebene und Managementebene) realisiert ist (siehe Abbildung 2). Abbildung 3 zeigt beispielhaft die Systemarchitektur der Gebäudeautomationslösungen der Sauter-Cumulus GmbH, welche ein Partner im Forschungsprojekt war.

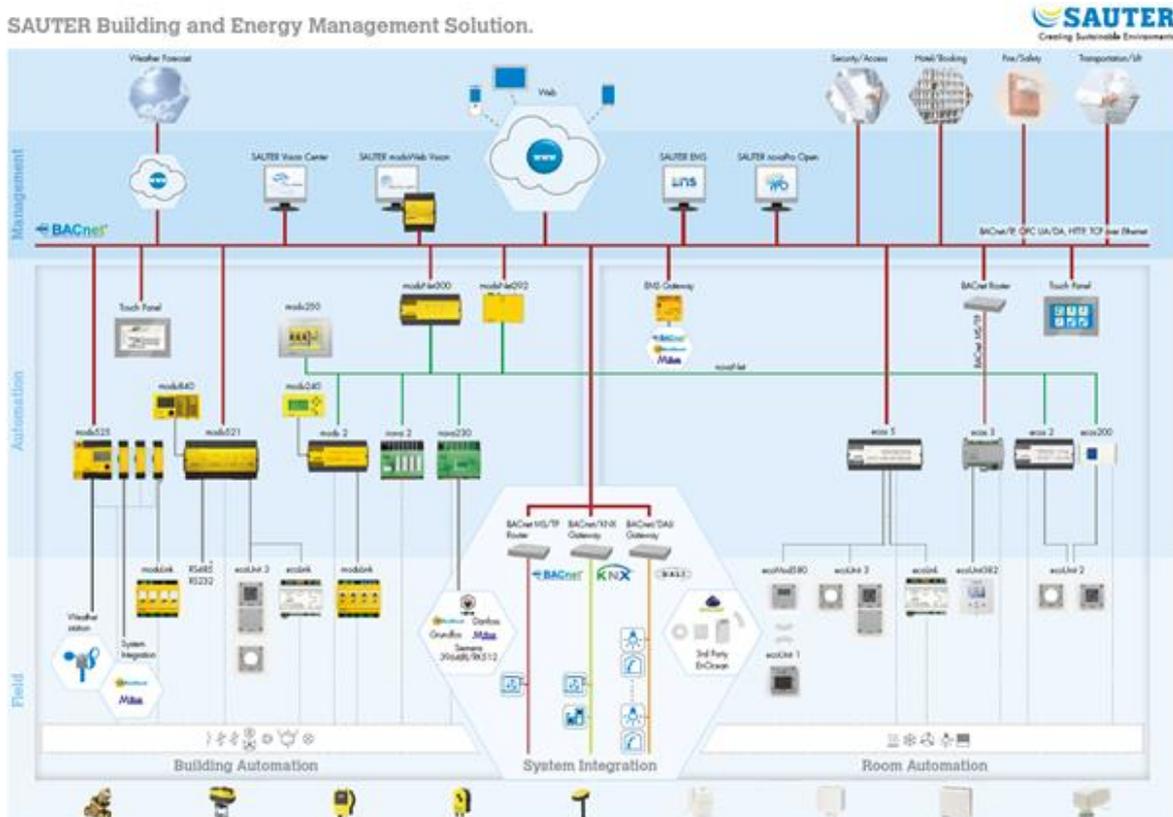


Abbildung 4: Systemarchitektur der Gebäudeautomation der Sauter-Cumulus GmbH

Die Feldebene kapselt verschiedene Sensoren und Aktoren innerhalb des Gebäudes, die entweder direkt mit den Steuerungen verbunden sind oder ihre Werte über zusätzliche Komponenten kommunizieren. Für die Kommunikation gibt es eine Vielzahl von Protokollen wie BACnet, DALI, EnOcean, KNX, Modbus, Profibus, Zigbee, Z-Wave und viele mehr. Anschließend folgt die Automatisierungsebene. Diese kapselt die Steuerungskomponenten, wie beispielsweise dedizierte SPS Module oder andere programmierbare Geräte. Diese beinhalten die Verhaltenslogik zur Steuerung und leiten wichtige Signale an die obere Schicht weiter. Die Kommunikation nach oben ist bereits über Ethernet mit IP-basierten Protokollen wie TCP, HTTP(S) oder OPC UA realisiert. Die nächste Schicht - die Managementebene - ist für die Verwaltung und Konfiguration verantwortlich. Diese besteht aus verschiedenen Softwaresystemen für die Visualisierung, statistische Datenverarbeitung, Konfiguration oder Alarmierung. Je nach Anbieter des Systems bietet die Managementebene auch Software für den Fernzugriff über VPN, WebServices (z.B. Wettervorhersagen) und zusätzliche Schnittstellen zu externen Systemen, z.B. von Sicherheitsfirmen, Buchungsdiensten oder für die technische Instandhaltung des Gebäudes.

Für MEMAP ist dabei wichtig, dass die Steuerung durch ein lokales Gebäude-EMS durchaus komplex ist und sehr viele detaillierte Parameter beinhaltet, die nicht nach draußen kommuniziert werden sollen. Obwohl wir eine starke Umorientierung in Richtung cloud- und serverbasierter Systeme erleben, gehen wir davon aus, dass bestimmte Funktionalitäten auf der Edge-Ebene (also innerhalb des EMS) verbleiben. Daher muss die Kommunikation mit der MEMAP Plattform über eine dedizierte Schnittstelle realisiert werden. Für diese Schnittstelle kommt eine Reihe von Technologien in Frage: beispielsweise der webbasierte REST Ansatz, gängige Ansätze aus der Automatisierung (wie OPC UA) oder weitere "schlanke Protokolle" (wie das MQTT-Protokoll). Für die Wahl der Technologien muss eine Reihe von Anforderungen beachtet werden. So ist eines der wichtigsten Kriterien, die Verfügbarkeit einer ausgereiften Technologie, die nicht durch den Systemhersteller selbst entwickelt werden muss, sondern im Markt vorhanden ist. Diese sollte sicherheitstechnische Funktionen wie Authentifizierung, Autorisierung und Verschlüsselung bieten, und zudem Funktionen für eine Aufrechterhaltung der Kommunikation bereitstellen, um die Verfügbarkeit zu gewährleisten. All diese Funktionen sind durch OPC UA gegeben. Darüber hinaus bietet die OPC-UA-Protokollarchitektur perspektivisch eine objektorientierte Datenmodellierung für eine interoperable Gerätekommunikation, die zu einer Vereinheitlichung in der heterogenen Kommunikationslandschaft der Gebäudeautomation führen kann. Aus diesen Gründen wurde diese Technologie im Projekt gewählt und für MEMAP eingesetzt.

In diesem Abschnitt haben wir uns nur auf eine kurze Übersicht zu EMS und BEMS beschränkt. Für eine weitere, umfassendere Betrachtung möglicher Lösungen, inklusiver neuer Ansätze sei hier auf die Literatur verwiesen. Einen guten Einstieg bietet hier die Arbeit von Mauser⁶.

ii. Annahmen zu technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen

Für die Umsetzung eines vernetzten und optimierten Quartiersbetriebs sind neben den technischen Rahmenbedingungen auch die organisatorischen Rahmenbedingungen von entscheidender Bedeutung. Die Vernetzung der Anlagen und EMS inkl. der Datenkommunikation muss auf diese Rahmenbedingungen abgestimmt sein.

Abstraktion auf Leistungsebene

Wie im obigen Abschnitt zur Situation im Bestand ausgeführt, sind die Systeme der energietechnischen Gebäudeausrüstung unterhalb der Gebäudeebene oftmals sehr individuell und komplex, insbesondere bei gekoppelter Betrachtung von Strom- und Wärmesektor. Für deren Betrieb spielen daher eine Vielzahl von physikalischen Größen (wie beispielsweise Temperaturen,

⁶ Mauser, I. (2017). Multi-modal Building Energy Management. PhD thesis, Karlsruher, Institut für Technologie (KIT). 37.06.01; LK 01.

Drücke, Volumenströme Spannungsniveaus, Stromstärken, Blindleistungen usw.) eine entscheidende Rolle. Da der MEMAP-Ansatz möglichst allgemeingültig und übertragbar sein soll, wird die Steuerung der Anlagen auf dieser Ebene wie auch bisher den einzelnen EMS überlassen. Stattdessen abstrahiert der MEMAP-Ansatz zum Zwecke der Allgemeingültigkeit und bewegt sich lediglich auf der Ebene von Leistungswerten (Wirkleistung, kW) und im Falle der Energiespeicher auf der Ebene von Energiewerten (kWh). Dies ist ein üblicher Ansatz, wie er oft im Bereich des Energiemanagements verwendet wird. Ziel ist es also die thermischen und elektrischen Energieströme (kW) im Quartier gekoppelt zu optimieren.

Energieverbund mit Energietausch, kein Markt

Ein intuitiver Ansatz für die Vernetzung und Optimierung wäre ein Energiemarkt. Wie ein effizienter, lokaler und sektorenübergreifender Energiemarkt aussehen kann, ist ein eigenes Forschungsthema.^{7,8,9} Schwierigkeiten hierbei sind erneut die spezifischen physikalischen Eigenschaften der Sektoren, wodurch beispielsweise Temperaturniveaus oder Frequenzhaltung und Blindleistungskompensation berücksichtigt werden müssen. Zudem müssen spieltheoretische Betrachtungsweisen zu Rate gezogen werden, damit ein stabiler und effizienter Marktansatz gestaltet werden kann. Zusätzlich sind rechtliche Rahmenbedingungen und Regularien zu beachten. Hierfür hat sich bisher keine Standard-Lösung in Wissenschaft und Industrie durchgesetzt. Das MEMAP-Projekt benötigte aber eine zugrundeliegende Organisationsstruktur, daher wurden folgende Grundannahmen getroffen: Es wird davon ausgegangen, dass die Teilnehmer im Quartier längerfristig in einem Energieverbund (Energy Community) organisiert sind. Innerhalb dieses Energieverbunds wird Energie bzw. Leistung ausgetauscht, aber nicht gehandelt. Ziel des Energietausches ist es durch die Synergien im Verbund finanzielle und/oder ökologische Verbesserungen gegenüber dem Einzelbetrieb zu erzielen. Die Teilnehmer beteiligen sich also am Verbund zum Wohle des Gesamtverbundes. Die Betriebskosten bzw. möglicherweise erzielte Einsparungen gegenüber dem Einzelbetrieb müssen dann wieder auf die einzelnen Teilnehmer umgelegt werden. Auch für diese Umlage gibt es verschiedene Möglichkeiten, detailliertere Angaben hierzu unter E6.T. Eine Übersicht über die Ergebnisse der Analyse zu rechtlichen Rahmenbedingungen und Regularien für lokale Energieverbände finden sich im Anhang unter „(A5) Interne Berichte zu Grundlagen und Rahmenbedingungen“.

Infrastruktur für Energietausch

Der logische nächste Schritt nach der informationstechnischen Vernetzung und der Ermittlung der optimierten Energieflüsse im Quartier ist deren physikalische Umsetzung. Um die Energie bzw. Leistung zwischen den beteiligten Anlagen und Gebäuden physikalisch zu transportieren, wird spezifische Infrastruktur dafür benötigt. Auf Quartiersebene sind dies Strom- und Wärmenetze inkl. zugehöriger technischer Komponenten. Nur wenn diese Infrastrukturen vorhanden sind, können die berechneten Energieflüsse wirklich umgesetzt und somit die erwarteten Vorteile erzielt werden. Daher wird im Projekt davon ausgegangen, dass die notwendige physikalisch-technische Infrastruktur zum thermischen und elektrischen Energietausch zwischen den Teilnehmern vorhanden ist. Im Stromsektor ist dies oftmals der Fall oder unkompliziert nachzurüsten, da so gut wie jedes Gebäude über einen Anschluss an das öffentliche Stromnetz verfügt und die Einspeisung von BHKW- oder PV-Strom in das öffentliche Netz bereits weit verbreitet ist. Vereinzelt gibt es auch bereits elektrische Microgrids mit vielen dezentralen Erzeugern und Verbrauchern. Dennoch sind hier im Vorfeld Einzelfallbetrachtungen und Absprachen mit den Netzbetreibern notwendig, um z.B. Leitungsüberlastungen etc. zu vermeiden. Im thermischen Bereich ist die Idee lokaler Wärmenetze über welche Teilnehmer untereinander bidirektional Wärme austauschen können noch neu. Daher

⁷ S. Karnouskos, *Demand Side Management via prosumer interactions in a smart city energy marketplace*, 2011 2nd IEEE PES International Conference and Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies (2011).

⁸ Y. Parag, and B. K. Sovacool. *Electricity market design for the prosumer era*, Nature energy 1(4) (2016)

⁹ J. Abdella and K. Shuaib, *Peer to Peer Distributed Energy Trading in Smart Grids: A Survey*, Energies 11 (2018)

hat sich eine Gruppe aus dem MEMAP-Projekt auch damit beschäftigt, wie solche bidirektionalen Wärmenetze mit Prosumers aussehen und betrieben werden können. Die Ergebnisse hierzu finden sich in Abschnitt E3.I „Infrastruktur für Wärmetausch im Quartier“.

iii. Technischer Stand der Wissenschaft: unser Ausgangspunkt

Zur Berechnung einer gebäudeübergreifenden Optimierung wurde im Projekt eine Recherche zum Stand in der Wissenschaft durchgeführt. Hier existieren bereits ausführliche Grundlagen und es werden auf Gebäudeebene bereits unterschiedliche Methoden aus der Regelungstechnik erfolgreich eingesetzt. Für reine Heizungsregelungen sind häufig simple Methoden aus der Regelungstechnik, wie PI-Regler, zufriedenstellend¹⁰. Solche Methoden sind allerdings ungeeignet für eine gebäudeübergreifende Regelung, die Betriebskosten über einen bestimmten Zeitraum minimieren soll. Für solche Fälle ist Modellprädiktive Regelung (MPC: Model Predictive Control) die am häufigsten eingesetzte Regelungsstrategie.^{11,12,13,14,15}

MPC nutzt ein Modell des zu regelnden Systems, um den Betrieb des Gebäudes über einen beschränkten Zeithorizont bezüglich einer vorgegebenen Kostenfunktion mittels mathematischer Optimierung zu planen. Der erste Eintrag der somit ermittelten Entscheidungsvariablen wird als Regeleingang für das reale System verwendet und der gesamte Vorgang wird im darauffolgenden Zeitschritt wiederholt. Somit gewährleistet eine MPC, dass der Eingang, der für die Regelstrecke gewählt wird, zu einem optimalen Regelstreckenverhalten in einem langen Zeitraum führt. Die Kostenfunktion besteht im Gebiet der Gebäuderegulierung häufig aus den Betriebskosten im Zeithorizont. Allerdings werden häufig auch CO₂ Emissionen stattdessen betrachtet und durch den mathematischen Optimierungsalgorithmus minimiert. Somit ermöglicht eine MPC eine Planung der energetischen Produktion und des energetischen Konsums über einen definierten zukünftigen Zeitraum. Damit kann unter anderem der Betrieb energiespeichernder Elemente in Koordination mit energieerzeugenden Anlagen geplant werden. Darüber hinaus ermöglicht eine MPC die Betrachtung von Systemeinschränkungen, was wiederum für die Gewährleistung von Sicherheit und Nutzerkomfort verwendet werden kann. MPC kann auch dezentral für die Koordination des Verbrauchs mehrerer Gebäude verwendet werden. Das ist wiederum nützlich für Demand Side Management (DSM) Strategien¹⁶.

¹⁰ M. Feldmeier and J. A. Paradiso, "Personalized HVAC control system," 2010 Internet of Things (IOT), Tokyo, 2010, pp. 1-8.

¹¹ Oldewurtel, Frauke, Alessandra Parisio, Colin N. Jones, Dimitrios Gyalistras, Markus Gwerder, Vanessa Stauch, Beat Lehmann, and Manfred Morari. "Use of model predictive control and weather forecasts for energy efficient building climate control." *Energy and Buildings* 45 (2012): 15-27.

¹² Široký, Jan, Frauke Oldewurtel, Jiří Cigler, and Samuel Prívvara. "Experimental analysis of model predictive control for an energy efficient building heating system." *Applied energy* 88, no. 9 (2011): 3079-3087.

¹³ Ma, Yudong, Francesco Borrelli, Brandon Hancey, Brian Coffey, Sorin Bengea, and Philip Haves. "Model predictive control for the operation of building cooling systems." *IEEE Transactions on control systems technology* 20, no. 3 (2012): 796-803.

¹⁴ Prívvara, Samuel, Jan Široký, Lukáš Ferkl, and Jiří Cigler. "Model predictive control of a building heating system: The first experience." *Energy and Buildings* 43, no. 2-3 (2011): 564-572.

¹⁵ M. Kramer, A. Jambagi and V. Cheng, "Distributed model predictive control for building energy systems in distribution grids," 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Torino, 2017, pp. 1-6.

¹⁶ M. Kramer, A. Jambagi and V. Cheng, "Distributed model predictive control for building energy systems in distribution grids," 2017 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe), Torino, 2017, pp. 1-6.

C. Anwendungsfälle

Die technischen Grundannahmen halfen insbesondere dabei den Optimierungskern und eine Plattform zu entwickeln. Darüber hinaus wurden im Projekt mehrere Ziele und Anwendungsfälle konzipiert, um eine gebäudeübergreifende Quartiersoptimierung im heutigen technischen und politisch umsetzbaren Kontext zu ermöglichen. Diese werden im Folgenden näher vorgestellt.

Da sowohl das Thema Energiewende sowie die Digitalisierung zu den zentralen Herausforderungen des 21. Jahrhunderts zählen, ergeben sich bei näherer Betrachtung zahlreiche beteiligte Akteure sowie unterschiedliche Anwendungsfälle für die geplante Plattform.

Ein Kernziel war daher die Entwicklung und Analyse von Geschäftsmodellen für den lokalen Austausch von Energien (Strom, Wärme, Kälte). Zu Beginn des Projekts wurde mit diesem Ziel die AG Geschäftsmodelle gegründet, welche sich mit dieser Aufgabestellung beschäftigte. In mehrere gemeinsamen Workshops mit allen Projektmitarbeitern wurden die Rahmenbedingungen sowie die nachfolgende Vorgehensweise erarbeitet.

Tabelle 3: Methoden zur Identifikation von Anwendungsfällen

Methode	Beschreibung
User Stories	In Alltagssprache formulierte Benutzeranforderung an eine Software / ein Produkt, geschrieben als 1-2 kurze, prägnante Sätze
Use Cases	Nach außen sichtbares Verhalten eines Systems aus Sicht eines Stakeholders (= Person oder anderes System)
Szenarien	Ergeben sich aus dem Clustering der Use Cases
Geschäftsmodelle	Beschreibt die logische Funktionsweise eines Unternehmens und insbesondere die spezifische Art und Weise, mit der es Gewinne erwirtschaftet

i. Stakeholder

Ein erster wichtiger Punkt war, die wesentlichen Stakeholder zu identifizieren. Ein Stakeholder ist eine Person oder Institution, für die es aufgrund ihrer Interessenlage von Belang ist, wie ein bestimmtes Unternehmen (in diesem Fall die MEMAP Plattform) sich. Zunächst wurden folgende (Haupt-) stakeholder identifiziert:

- Privater/gewerblicher Nutzer - Prosumer – (z.B. Gewerbebetriebe in Riemerling)
- Verteilnetzbetreiber für Strom und Wärme (z.B. Bayernwerke)
- Betreiber der Plattform
- (System)-hersteller (z.B. FENECON, Sauter)
- Planer (z.B. IBDM)

ii. User Stories

Im nächsten Schritt wurde detailliert auf die einzelnen Stakeholder eingegangen und je Stakeholder mögliche User Stories erarbeitet. In Tabelle 3 sind ein paar Auszüge aus den User-Stories für den Nutzer zu finden.

Tabelle 4: User Stories für den Nutzer

Stakeholders	Wer ist das? Welche Aufgabe führt diese Personengruppe / Organisation durch?	Ziel, Anforderungen an die MEMAP - Plattform
Nutzer	Ich möchte eine günstige, regionale Versorgung (Transparenz).	Damit man die Region / Wertschöpfung unterstützt.

Nutzer	Ich möchte ein intelligentes Energiemanagement.	Um Kosten zu sparen, Image verbessern.
Nutzer	Ich möchte Transparenz der Energieflüsse durch Monitoring.	Um Kosten des Bezugs zu reduzieren.
Nutzer	Ich möchte überschüssige Energie verkaufen.	Um zusätzliche Erlöse zu erwirtschaften
Nutzer	Ich möchte Versorgungssicherheit.	Um keine Ausfälle befürchten zu müssen.
Nutzer	Ich möchte Monetarisierung von Ressourcen.	Sodass sich diese schneller amortisieren.
Nutzer	<ul style="list-style-type: none"> • sichere / stabile Versorgung • günstige Energie • flexible Vertragslaufzeiten • Imageaufbesserung • Sicherheit für die Realisierung • Information zur Umsetzung 	<ul style="list-style-type: none"> • gute Produktionsbedingungen • geringe Nebenkosten • Vermarktung → Marketing verbessern
Nutzer	Ich möchte Versorgungssicherheit durch die Betreiber.	Damit ich immer genug Wärme und Strom habe.

iii. Use Cases

Nach der Aufnahme der unterschiedlichsten Anforderung an die Plattform, wurden daraus konkrete UseCases abgeleitet. Sehr vielversprechend für die meisten Stakeholder war bereits von Beginn an der Energiehandel, zu welchem im Nachgang der UseCase zu finden ist.

Tabelle 5: Use Case Energiehandel

Priorität	1 hoch
Zweck/Ziel	<p>Zusätzlich zum Energieversorger, der Strom und Wärme zur Verfügung stellt und bei eigener Produktion abnimmt, treten (private) Nutzer über MEMAP in den Energiehandel ein.</p> <p>Jeder Nutzer möchte seine Situation verbessern, indem er:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Selbst produzierte/gespeicherte Energie möglichst gewinnbringend verkauft • Energie zu günstigen Konditionen einkauft (direkt vom Produzenten oder vom Markt z.B. durch günstige Einkaufszeit oder -menge) • Durch intelligentes Energiemanagement der Plattform Kosten reduziert oder Einkünfte erhöht (20% Einsparungen angestrebt). • Die Energieautonomie erhöht und damit die Abhängigkeit von steigenden Energiepreisen reduziert • Versorgungs- und Planungssicherheit erlangt (mithilfe Prognosen) • den Betrieb (Auslastung, Wirtschaftlichkeit, CO2 Bilanz) seiner eigenen Anlagen optimiert <p>Durch den Energiehandel sinken die Kosten für alle beteiligten Nutzer. Zusätzlich werden durch die Handlungsempfehlungen der Plattform zusätzliche Potentiale freigelegt.</p>
Akteur/Rolle	Nutzer als Prosumer (= Producer und Consumer), Energieversorger, Stadtwerke/Verteilnetzbetreiber, Plattformbetreiber

System und Anlagen	Alle Systeme und Anlagen des Nutzers, MEMAP Plattform
Auslöser	Energiebedarf oder Energieproduktion beim Nutzer
Vorbedingung	<p>Stufe 1: Nutzer ist registrierter MEMAP Teilnehmer und damit mit den anderen Nutzern über das Strom- und Wärmenetz verbunden.</p> <p>Stufe 2: Für optimierte Handlungsempfehlungen müssen die Nutzer Informationen über Ihren Energiehaushalt (Anlagendaten, Produktionsdaten und Verbrauchsprofile) der Plattform zur Verfügung stellen. Dies kann z.B. direkt über die lokale EMS erfolgen.</p> <p>Stufe 3: Anbindung der Plattform an Strombörse für optimale Ein- und Verkaufszeiten.</p>
Nachbedingung	Der Nutzer sieht kurzfristig einen Rückgang in seinen Energiekosten und langfristig eine erhöhte Wirtschaftlichkeit seiner Energie-Anlagen und der dafür getätigten Investition.
Besonderheiten	<p>Voraussetzungen für den Energiefluss zwischen den Nutzern über (öffentliches) Netz muss gewährleistet sein. Hierfür entstehende Netznutzungskosten müssen alle Handelspartner mittragen. Alternativen gehen über private Netze.</p> <p>Direkte Strom-/Wärme-Verbindungen sind ggf. genehmigungspflichtig, falls öffentliche Straßen dazwischenliegen.</p> <p>Eventuell kommen quartiersbezogene Konzepte wie Mieterstrom oder virtuelle Kundenanlagen in Frage.</p>
Optional: Kommunikationsprotokolle/Mechanismen	OPC UA für Kommunikation mit den lokalen EMS, Kommunikation mit Netzbetreibern/ Energieversorgern IEC 61850
Erfolgsszenario	<p>Beschreibung des Falles in dem „alles gut“ geht</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Abruf des aktuellen Energiebedarfs der Nutzer 2. Abruf der verfügbaren Energie und den Erzeugungskosten aus Eigenproduktion/Energiespeichern der Nutzer 3. Abruf der Marktpreise 4. Berechnung für optimale Handlungsempfehlung über Ver- oder Zukauf von Strom/Wärme 5. Sendung der Handlungsempfehlung an lokale EMS 6. Abrechnung von internen Käufen und Verkäufen der Nutzer (USE CASE Nutzer Abrechnung) 7. Erhebung von Vergleichsdaten zur nicht-optimierten Energiebilanz der einzelnen Nutzer
Ereignisse die zum Misserfolg führen	<ul style="list-style-type: none"> • Zu wenige Nutzer mit verfügbaren Daten (technische Ausfälle) • Außerordentlich stark sinkende Marktpreise • Hohe Einspeisevergütung
Qualitäts-Anforderungen, Nicht-funktionale Anforderungen	z.B. Antwortzeit, Datenvolumen, Datenschutz,
Resultate	Nach erfolgreicher Ausführung des Use Cases vorliegende Ergebnisdaten

iv. Rollen eines Stakeholders

Aufgrund der betrachteten Use Cases wurde klar, dass die definierten Hauptstakeholder verschiedene oder auch mehrere Rollen in den UseCases einnehmen können. Daher war es notwendig mögliche Rollen für die Plattform zu definieren und zu prüfen, welche Stakeholder diese Rolle einnehmen können. Es wurden folgende fünf Hauptrollen als Rahmenbedingung festgelegt:

Plattformbetreiber (IKT Infrastruktur)

Der Plattformbetreiber ist derjenige, der für den Betrieb der Plattform aus der IKT-infrastrukturellen Sicht verantwortlich ist. Der Plattformbetreiber hat vor allem ein wirtschaftliches Interesse, sodass ein stabiler Betrieb der Plattform mit stetig wachsender Teilnehmer-Anzahl für ihn unabdingbar ist. Der Plattformbetreiber ist genauso dafür zuständig, die relevanten Voraussetzungen für externe Dritte zu schaffen, die eine (Weiter-)Entwicklung bestehender oder neuer Mehrwertdienste vorantreiben. Im Kontext von MEMAP sind es Dienste rund um Energie-Themen. Des Weiteren hat der Plattformbetreiber die Aufgabe mit relevanten Akteuren rund um die Plattform zu kommunizieren und deren Anforderungen klar innerhalb der Plattform technisch umzusetzen. Außerdem ist der Plattformbetreiber für die Qualität von entwickelten Mehrwertdiensten verantwortlich und trägt auch hier ein gewisses wirtschaftliches Risiko. Der Plattformbetreiber im Kontext von MEMAP soll zudem Kompetenzen in Bereichen Energiemanagement und -technik aufweisen.

Prosumer (lokaler Produzent und/oder Konsument)

Unter der Rolle Prosumer werden alle Akteure verstanden, die Energie erzeugen, bereitstellen, einspeisen, verbrauchen, abnehmen oder speichern und dies innerhalb eines MEMAP-Verbundes tun können. Prosumer nehmen aktiv am regionalen Energietausch/-markt über die MEMAP-Plattform teil.

Prosumer können sein:

- Privathaushalte,
- Gewerbetreibende,
- kleinere Wind- oder Solarparks (GBRs, GmbHs),
- Grundstücksgesellschaften,
- Mehrfamilienhausbesitzer,
- Wohnungseigentümer-Gesellschaften (WEGs),
- (Energie-)Genossenschaften,
- virtuelle Kraftwerke und kleine
- oder auch größere Energieanbieter, usw.

Prosumer haben den Antrieb zur Teilnahme an MEMAP-Plattform, da ein optimaler regionaler Energietausch/-markt ihre Energiekosten reduziert und eine Verbesserung der eigenen Versorgungssicherheit bedeutet. Prosumer erhalten des Weiteren eine attraktive Vermarktungsmöglichkeit ihrer produzierten und (teils) überschüssigen Energie über die MEMAP-Plattform. Zugleich können Prosumer ihre eigene Klimabilanz für Förderzuschüsse oder zur Einhaltung neuer Vorschriften verbessern.

Investor (Investition in Infrastruktur)

Unter der Rolle versteht man jemanden der in die Infrastruktur investiert bzw. Kapital anlegt mit dem Ziel, langfristig eine Rendite zu erzielen.

Betreiber der Physischen Infrastruktur

Neben der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur ist für den Betrieb der Plattform und für die damit verbundenen Energiedienstleistungen zwingend eine physische Energieinfrastruktur erforderlich, über die ein Austausch/Übertrag von Energie stattfinden kann. Es handelt sich hierbei also um eine physische Vernetzung in den jeweiligen Sektoren, die für den Plattformbetrieb zwingend von einem Akteur bereitgestellt werden muss.

Im Großteil der Fälle, handelt es sich bei dieser physikalischen Infrastruktur um Stromnetze und (Nah-) Wärmenetze, aber gegebenenfalls auch um Kälte- und Gasnetze. Auch eine Ladesäuleninfrastruktur kann im Bereich der Elektromobilität dazugezählt werden. Welche tatsächliche Infrastruktur von dieser Rolle betrieben wird, ist für den konkreten Fall bzw. das konkrete Quartier zu klären in dem die MEMAP-Plattform angewandt werden soll.

Drittanbieter (Services auf der Plattform)

Eine Plattform bringt stets Anbieter und Nachfrager, eben die Prosumer, zusammen und lässt externen Dritten Möglichkeit(en) "Dienstleistungen" jeglicher Art innerhalb der Plattform anzubieten oder anzufragen. Eine Plattform bietet des Weiteren konkret definierte technische, organisatorische und juristische Rahmenbedingungen, Strukturen und Schnittstellen, um diese Dienstleistungen Dritter innerhalb der Plattform einzubinden und erfolgreich zu vermarkten.

v. Zuordnung der Rollen zu den Stakeholdern

Aufgrund der erarbeiteten Ergebnisse wurde betrachtet, welcher Stakeholder in welche Rolle oder Rollen schlüpfen kann. Als Beispiel sind hier die Ergebnisse des Plattformbereiters aufgelistet:

Tabelle 6: Stakeholder, welche die Rolle Plattformbetreiber übernehmen können

Plattformbetreiber	Anlagenhersteller
	Netzeigentümer
	Energiegenossenschaft
	Anlagenerrichter
	Planer (TGA)
	Planer (Stadt)
	Anlagenbesitzer
	Privathaushalt / Unternehmen
	Gewerbebetrieb
	IKT Unternehmen
	Fernwärmeanbieter
	Energieversorger
	Anlagenbetreiber
	Systemhersteller

vi. Nutzerversprechen, Wertschöpfungsarchitektur, Erlösmodell

Nachdem die Anforderungen und die UseCases untersucht wurden, wurden die einzelnen relevanten Stakeholder auf deren Nutzerversprechen, Wertschöpfungsarchitektur und Erlösmodell geprüft.

Nutzerversprechen

Das Nutzerversprechen beschreibt, welchen Nutzen ein konkretes Produkt oder eine Dienstleistung für den Kunden hat.

Wertschöpfungsarchitektur

Die Wertschöpfungsarchitektur beschreibt die Stufen der (internen und externen) Wertschöpfung und der verschiedenen wirtschaftlichen Agenten, sowie ihrer Rollen im Wertschöpfungsprozess. Bei der Ausarbeitung der Wertschöpfungspotentiale wurden zunächst eine Betrachtung des Wertschöpfungsflusses vorgenommen. Dazu wurden die wichtigsten Stakeholder betrachtet und in Verbindung gestellt. Dies wurde in der nachfolgenden Abbildung grafisch dargestellt.

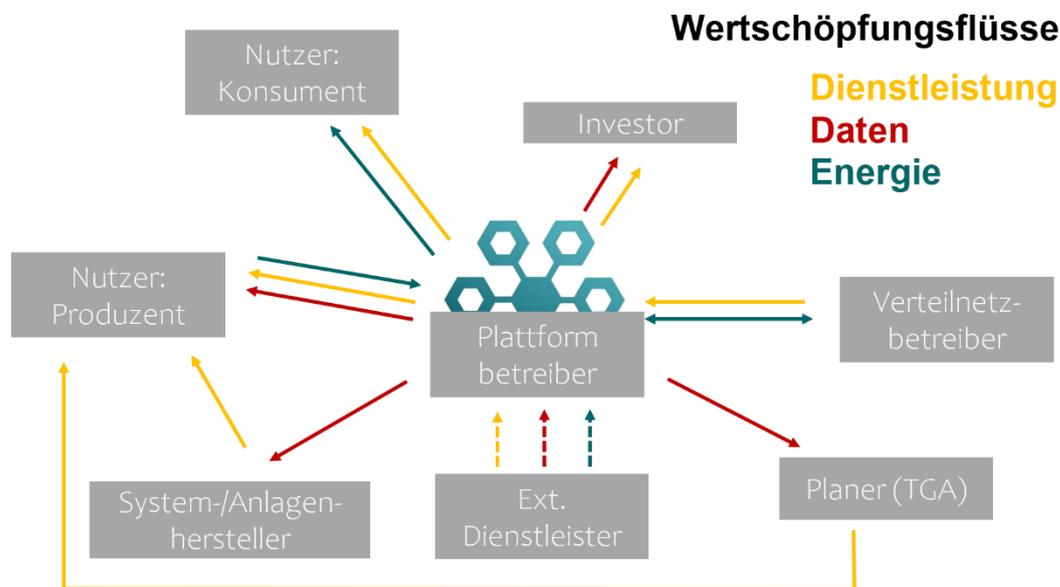


Abbildung 5: Stakeholder im MEMAP-Kontext und deren Wertschöpfungsflüsse

Erlösmodell

Das Erlösmodell beschreibt, wie und aus welchen Quellen das Unternehmen Einnahmen generiert.

Tabelle 7: Nutzerversprechen, Wertschöpfungsarchitektur, Erlösmodell

Nutzer	Nutzerversprechen	Wertschöpfungsarchitektur	Erlösmodell
Nutzer – Konsument	- Kostenreduzierung der Energiebeschaffung - Versorgungssicherheit	Wegfall d. Kosten für Stromtransport, Abrechnung, Personal durch	Plattform bieten Strom/Wärme + Servicegebühr (> alle Kosten des

		softwaregesteuerte und weitgehend automatisierte Direktvermarktung zwischen den Teilnehmern	Plattformbetreibers) 10% billiger an als Netzbetreiber
Nutzer – Produzent	<ul style="list-style-type: none"> - zusätzliche Erlöse der (Über)Erzeugung - geringere Investitionskosten - optimaler Betrieb der eignen Anlagen (je nach Optimierungskriterien, z.B. Kosten, CO2 Minimierung, Fairness, etc.) 	Über die Energiemanagement-Plattform kann die Über-Erzeugung vermarktet werden. Der Plattformbetreiber bietet über Felddaten und Handlungsempfehlungen einen optimierten Anlagenbetrieb und -erlös	Plattform bietet Optimierung des Anlagenbetriebs und optimale Vermarktung der Überproduktion gegen eine Service-Gebühr an
Verteilnetzbetreiber	<ul style="list-style-type: none"> - Blindleistung kompensieren - Rücklauf Temperaturabsenkung - Netzdienlichkeit (Nutzung von Diensten, um einen netzdienlichen Betrieb zu ermöglichen) 	Die bezogene Wärme wird so effektiv genutzt/Gespeichert, dass Rücklauf	Erlöse durch Blindleistungskompensation, Netznutzungsgebühr, Kostensenkungen durch weniger Infrastrukturaufwand und weniger Bürokratie (Abrechnung einfacher)
Plattformbetreiber	<ul style="list-style-type: none"> - regionale Wertschöpfung - Versorgungssicherheit - Teilnahme am Regelenergiemarkt - Einnahmen durch "Service-Gebühr" 	Stellt gegen eine Service-/Management-Gebühr die Software-Plattform zur Verfügung. Zusätzliche Vermarktung von BIM- und Feld-daten an Planer und Systemhersteller	Durch die Servicegebühren und Datenvermarktung wird die Plattform gemanaged und gewartet
(System)-Hersteller	<ul style="list-style-type: none"> - Anlage kompatibel zur MEMAP Plattform - Daten zum Product Life Cycle (Betriebsdaten im Realbetrieb) - Schnellere Installation/Integration 	Erschließung neuer Märkte: Entwicklung kompatibler Anlagen für vernetzte Quartiere, Felddaten zur Anlagenperformance bei Kooperation	Einkauf wertvoller Felddaten zur Produkt-Weiterentwicklung; Steigerung von Marktanteilen und Anlagenerlösen im wachsenden Bereich vernetzter Quartiere,
Planer (TGA)	<ul style="list-style-type: none"> - Detaillierte Informationen zur 	Besserer Service möglich durch Felddaten/	Auftragssteigerung durch Expertise und große

	Planung/Anlagenauslegung - nicht nur Gebäude, sondern einheitliche Quartiersplanung - Aussagekräftige Informationen schon vor Betrieb (glücklicher und zufriedener Kunde)	Handlungsempfehlung der Plattform Erschließung neuer Märkte: Planung von Quartieren	Planungskompetenz für Quartiere,
Investor	- Schnelle Amortisation des eingesetzten Kapitals	Über Community werden Investitionsanreize gesetzt, Kostenkalkulation konkretisiert	Fördermittel für klimafreundliche Anlagen. geringere Amortisationszeit des Kapitals durch optimale Anlagenauslastung,

vii. Szenarien

Aus den bereits erarbeiteten Daten wurden nun folgenden Hauptszenarien für die AG Modellierung erarbeitet und im weiteren Projekt herangezogen.

- Energiehandel und Management
- Planungswerkzeug und Community
- Dienstleistung und Daten

viii. Geschäftsmodelle

Mit dieser Grundlage wurden nun die Geschäftsmodelle sowie Wertschöpfungsketten identifiziert.

Rahmenbedingungen

Es stellte sich im Zuge der Betrachtung heraus, dass folgende Rahmenbedingungen zu berücksichtigen sind:

- Der Stakeholder hat ein eigenes Netz, mit Fernwärmeanschluss
- Der Stakeholder hat ein gepachtetes Netz, mit Fernwärmeanschluss
- Der Stakeholder hat ein eigenes Netz, ohne Fernwärmeanschluss
- Der Stakeholder hat ein gepachtetes Netz, ohne Fernwärmeanschluss

Business Modell Canvas

Auf Basis dieser Erkenntnisse wurden für jedes Wertschöpfungspotential ein Business Model Canvas aufgestellt. Wie bereits zu Beginn festgestellt, wurde der Energiehandel wiederum als zentrales Wertschöpfungspotential festgelegt und genauer betrachtet.

Um die Business Model Canvas einheitlich und vergleichbar zu erarbeiten, wurde ein umfangreicher Fragenkatalog für jeden Bereich erarbeitet. Zudem wurde jede Betrachtung im Blickwinkel einer konkreten Rolle angefertigt und im Nachgang in der AG besprochen.

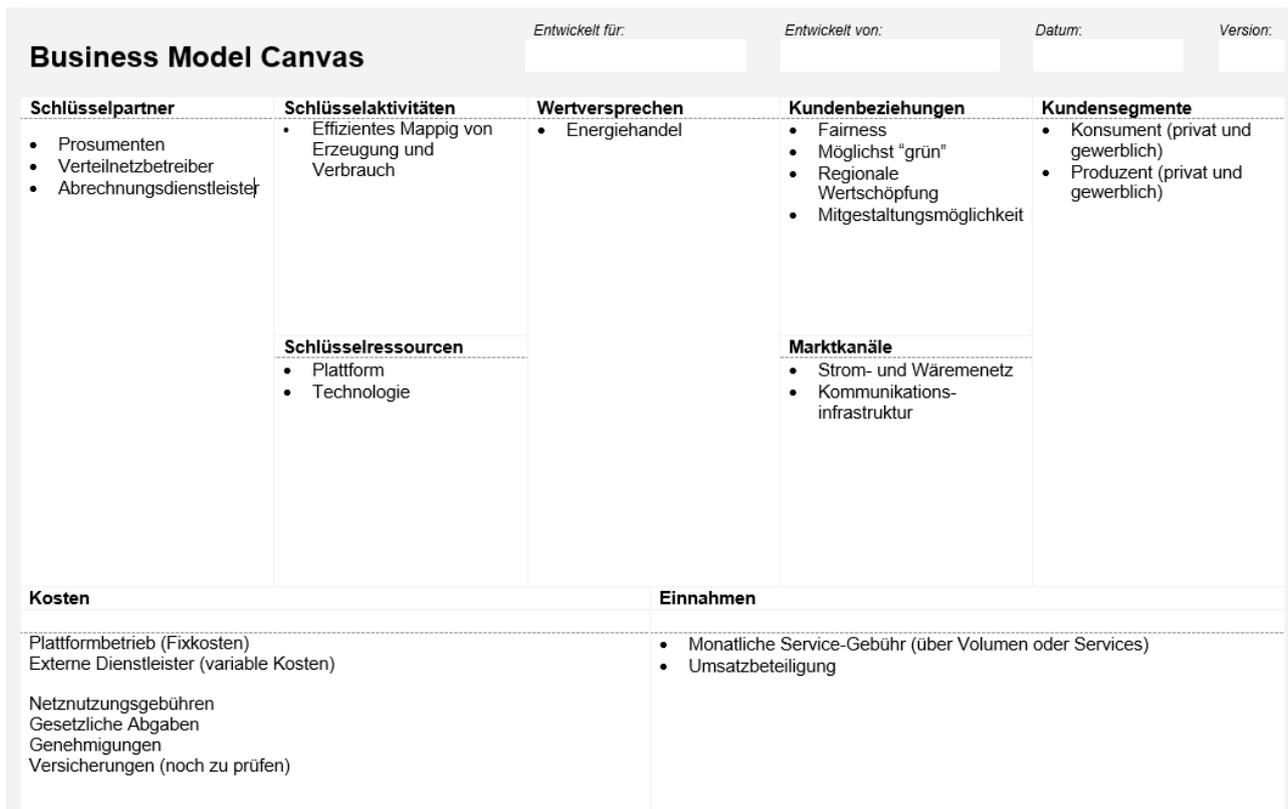


Abbildung 6: Business Model Canvas "Energiehandel"

Geschäftsmodelle

Aus den erarbeiteten Wertschöpfungspotentialen, sowie übergreifenden Szenarien, ergeben sich eine Vielzahl von Geschäftsmodellen für die verschiedenen Stakeholder mit dem damit verbundenen Wertangebot.

Nach Konsolidierung der Ergebnisse wurden drei Geschäftsmodelle daraus in den Vordergrund gestellt und weiter betrachtet:

- Geschäftsmodell Hochlastzeitfenster
- Geschäftsmodell Energiehandel mit Optimierung
- Geschäftsmodell Energiehandel mit Merit Order

Business Model Canvas		Entwickelt für:	Entwickelt von:	Datum:	Version:
Schlüsselpartner	Schlüsselaktivitäten	Wertversprechen	Kundenbeziehungen	Kundensegmente	
<ul style="list-style-type: none"> • EVU • Installateur • Kunde • Primärregelleistung Vermarkter • Planer / EPC 	<ul style="list-style-type: none"> • Hochlastzeitfenster • Primärregelleistung 	<ul style="list-style-type: none"> • Stromkosten sparen und zusätzliche Erlöse generieren • Imagegewinn 	<ul style="list-style-type: none"> • Persönlich, Vor-Ort, telefonisch, E-Mail • Regelmäßige Pflege durch Besuche, telefonisch, E-Mail • Kosten = Zeit • Kunden updaten, informieren ggf. Anlage anpassen 	Stromintensive Unternehmen <ul style="list-style-type: none"> • Metallgewerbe • Nahrungsmittel Höchstleistung > 500 kW	
	Schlüsselressourcen		Marktkanäle		
	<ul style="list-style-type: none"> • Speicher • Software • Kommunikation mit anderen Erzeugern • Projektingenier • Vertrieb 		<ul style="list-style-type: none"> • Veranstaltungen • Messen • Direkte Kommunikation • Telefon, E-Mail, Vor-Ort Termin • Empfehlung 		
Kosten			Einnahmen		
Plattformbetrieb (Fixkosten), Externe Dienstleister (variable Kosten) Netznutzungsgebühren, gesetzliche Abgaben, Genehmigungen, Versicherungen (noch zu Prüfen)			<ul style="list-style-type: none"> • Wirtschaftlichkeit • „Pioniergedanke“ 		

Abbildung 7: Business Model Canvas „Hochlastzeitfenster und Primärregelleistung“

(E1) MEMAP-Plattform, Modelle und Optimierungskern

Die Entwicklung der Softwareumgebung für die Multi-Energie Management und Aggregations-Plattform (MEMAP) erfolgte basierend auf den im vorangegangenen Abschnitt ermittelten Grundlagen. Als Schnittstelle zu den Gebäuden und Anlagen wurde daher aus den oben aufgeführten Gründen das gebäudespezifische BEMS – hier auch das *lokale EMS* genannt – festgelegt und ist hier in Abbildung 7 in Anlehnung an Abbildung 1 nochmals dargestellt.

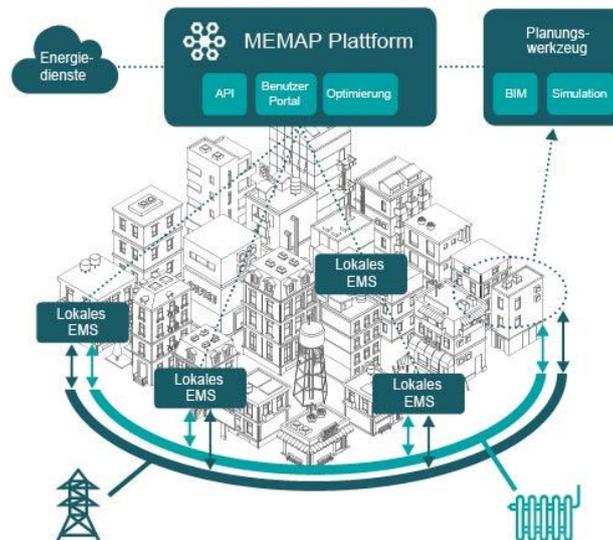


Abbildung 8: Überblick MEMAP-Konzept mit der Plattform im Zentrum

Jedes lokale EMS hat dabei als Grundannahme einen Server, der aktuelle Energiewerte im Gebäude über eine OPC-UA-Schnittstelle nach außen zur Verfügung stellt und Änderungen der Werte mittels einem Publish-Subscribe Ansatz mitteilt. Die zu entwickelnde MEMAP Plattform soll dann die Werte aller lokalen EMS einsammeln und einen MILP Optimierungsansatz (siehe auch E1) nutzen, um für ein zukünftiges Zeitfenster (Horizont) einen optimierten Fahrplan für alle EMS zu bestimmen. Die berechneten optimalen Fahrpläne sollen anschließend an die EMS Schnittstellen geschickt werden, damit diese den Fahrplan intern umsetzen können.

A. Plattformkonzept und -Architektur

i. Anforderungen

Bei der Konzipierung einer Softwareplattform für die Vernetzung solcher Quartiere stellten sich eine Reihe von grundsätzlichen Herausforderungen, die in gewisse zusätzliche Anforderungen an die Softwareumgebung übersetzt werden konnten:

Tabelle 8: Herausforderungen und Anforderungen bei der Konzipierung der Software-Plattform

Herausforderung	Anforderung
Universalität Es sollte vermieden werden eine Lösung zu schaffen, die nur in einem ganz bestimmten Quartier mit bestimmten Anlagen und Feldprotokollen eingesetzt werden kann.	Abstraktion von Anlagenklassen für die Multi-Energie-Optimierung, Schaffung einer einheitlichen Datenaggregation und Datenkommunikation mit dem lokalen EMS.
Skalierbarkeit Die Softwareumgebung im Quartier sollte durch	Selbstständigkeit der Softwareumgebung, Implementierung einer Server-Client

neue Anlagen und Gebäude erweiterbar sein, es soll jedoch auch prinzipiell möglich sein, mehrere Quartiere auf dieselbe Art zu vernetzen wie mehrere Gebäude.	Kommunikationsarchitektur unter Verwendung eines einheitlichen Datenmodells zu niedrigeren (lokales EMS) und höheren Hierarchien (MEMAP).
Benutzerfreundlichkeit Die Softwareumgebung muss intuitiv konfiguriert und gestartet werden können.	Schnittstellenentwicklung: Initialisierung und Steuerung der Plattform, On-boarding von Anlagen und Gebäuden möglich über eindeutige Adresse (IP) und (webbasierte) Benutzeroberfläche.
Planungswerkzeug Ein Planungswerkzeug soll den Betrieb eines energetisch vernetzten Quartiers möglichst gut vorhersagen können.	Nutzung des MPC-Optimierungskerns in einem angeschlossenen Planungswerkzeug durch Interpretation historischer Lastprofile als (perfekte) Prognosen.
Installation Die Installation der Plattform muss ohne Expertenwissen möglich sein. Es müssen verschiedene Netzwerkkonfigurationen abgebildet werden können (offenes bzw. geschlossenes Netz).	Einfaches Deployment als Softwarepaket, (ausführbare JAR oder Docker-Container), intuitives On-boarding von lokalen EMS Validierung verschiedener Betriebsarten („On Premise“ bzw. „As a Service“), Schnittstellendokumentation über Datenmodell.

ii. Topologie

In der Multi-Energie Optimierung wird angenommen, dass Energie (ggf. mit bestimmten Einschränkungen) zwischen den Teilnehmern bidirektional getauscht werden kann. Damit sind für die Plattform in erster Linie die gesamten im Feld vorhandenen Anlagen und Ihre Produktions- und Speichergrenzen relevant sowie die Gesamtnachfrage des Quartiers. Letzten Endes muss aber jedes Gebäude seinen eigenen Bedarf vor Ort decken und somit muss die Plattform neben den Gesamtsummen auch wissen, welche Energie in welchem Gebäude benötigt wird und ggf. zu diesem geleitet werden muss.

Zusammen mit den üblichen Besitzverhältnissen von Gebäuden und Anlagen führt dies zwangsläufig zu einer gewissen Hierarchie aus Anlagen (untere Ebene), Gebäude (Mittlere Ebene) und MEMAP Instanz (obere Ebene) – die sogenannte Topologie – welche innerhalb der Plattform abgebildet werden muss. Hinzu kommt, dass sich die Wärmeverbindungen in einem solchen energetischen Verbund typischerweise zwischen den Heizzentralen (Gebäude, mittlere Ebene) befinden und damit auch das in der Realität vorhandene Wärmenetz in dieser Topologie abgebildet werden muss.

Um hier intern diese hierarchischen Strukturen und den zugehörigen Informationsfluss abzubilden (Daten von den Anlagen kommen über das lokale EMS an MEMAP, die optimierten Fahrpläne von MEMAP über das lokale EMS an die Anlagen), wurde ein Java-basiertes Aktor Framework (akka.io) verwendet¹⁷, dessen Funktionsweise im nächsten Abschnitt erläutert wird.

Beim Design der internen Kommunikation mithilfe des Aktor-Framework wurde explizit eine selbstähnliche Struktur nach dem *composite pattern* von Gamma et al.¹⁸ gewählt, wonach alle

¹⁷ Bytschkow, D. A generic hierarchic architecture for the coordination of energy management systems (Doctoral dissertation, Technische Universität München, 2020).

¹⁸ E. Gamma, H. Richard, R. E. Johnson and J. Vissides, Design patterns: elements of reusable object-oriented software. Pearson Education India (1995)

Komponenten/Aktoren dieselben Schnittstellen haben, unabhängig davon, ob sie ein Verbundelement (*Composite*) oder Endglied (*Leaf*) in der Hierarchie bilden. Dies ermöglicht die Erstellung beliebiger Hierarchien aus denselben Komponenten bzw. Aktoren, ähnlich wie es auch bei holonischen Systemen der Fall ist.^{19,20} Die Beziehung der unterschiedlichen Arten von Komponenten ist in Abbildung 8 dargestellt.

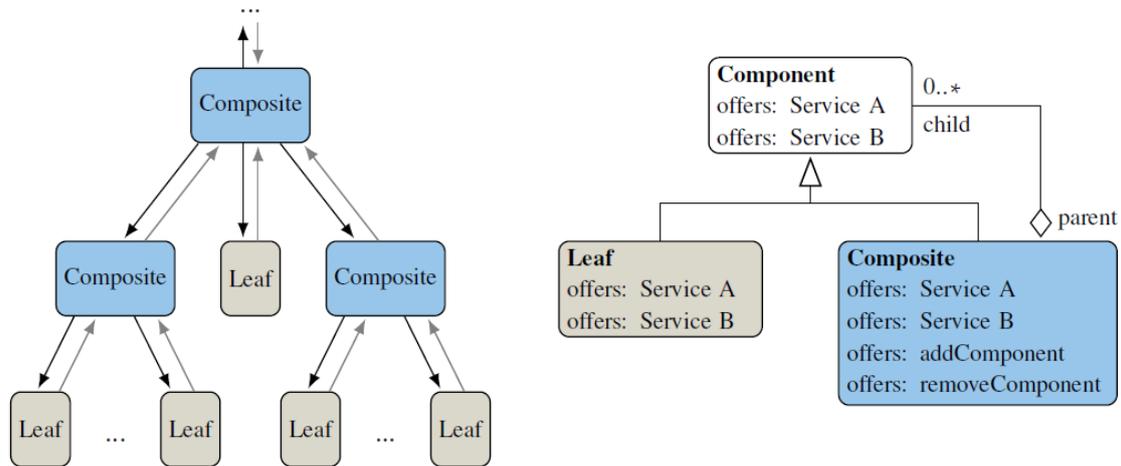


Abbildung 9 Verbundelement (*Composite*) und Endglied (*Leaf*) in einer Hierarchie (links) und die gegenseitige Beziehung der Komponenten (rechts) aus D. Bytschkow (2020)¹⁷.

iii. Aktor-Framework

Ein Aktor als Komponente ist dabei eine Verarbeitungseinheit, die einem bestimmten Zyklus folgt. Dieser wird per Kommunikationsmuster festgelegt, durch in der Hierarchie gesendete interne Nachrichten ausgelöst und besitzt folgende Elemente bzw. implementierte Methoden:

- | | |
|---------------------------------|---|
| 1. handleRequest() | Nachricht von hierarchisch höherem Aktor & Aktion |
| 2. returnRequestContentToSend() | Nachricht an hierarchisch niedrigeren Aktor |
| 3. makeDecision() | Nachricht von hierarchisch niedrigerem Aktor & Aktion |
| 4. returnAnswerContentToSend() | Nachricht an hierarchisch höheren Aktor |

Das Verhalten eines Aktors bei jeder der vier Aktionen wird dabei durch das jeweilige *BehaviourModel* festgelegt, welches entsprechend der in unserem Datenmodell definierten Klassen (z.B. Gebäude, Nachfrage oder Anlage) festgelegt und vom Typ bzw. der Repräsentation des Aktors abhängig ist.

¹⁹ S. Howell, Y. Rezgui, J.-L. Hippolyte, B. Jayan and H. Li, *Towards the next generation of smart grids: Semantic and holonic multi-agent management of distributed energy resources*, Renewable and Sustainable Energy Reviews, vol. 77, pp. 193-214 (2017)

²⁰ J. Mayer, V. Pampana, M. Bernard, D. Bytschkow, T. Stohl, P. Gupta and M. Duchon, *Holon architectures for IoT-empowered energy management in districts*, 7th IEEE World Forum on Internet of Things (2021)

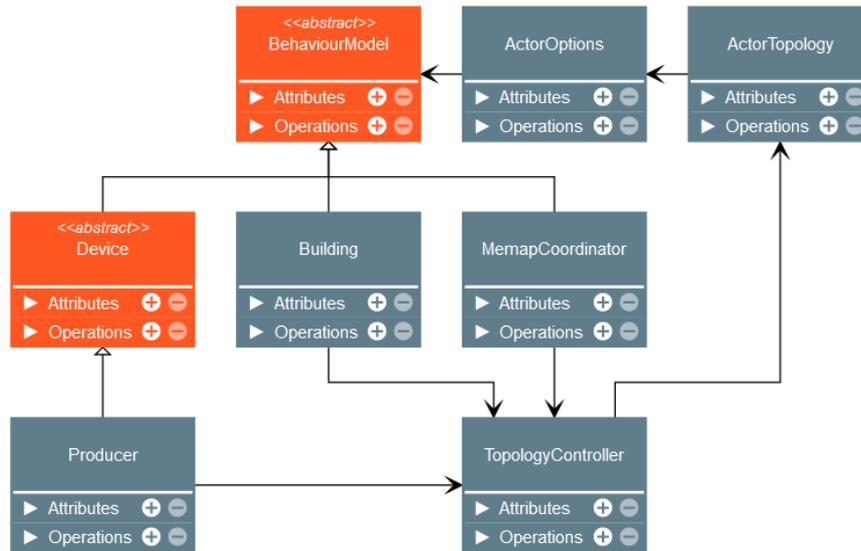


Abbildung 10: Vereinfachtes UML-Diagramm des verwendeten Actor-Framework mit verschiedenen in MEMAP verwendeten BehaviourModels.

Das Actor-System ist in Abbildung 10 dargestellt und besteht aus einem Monitor, einem Supervisor und einer Actor-Hierarchie mit allen Systemkomponenten. Der Supervisor-Aktor ist dabei verantwortlich für das Auslösen der Simulation und initialisiert die oberste Aktoren Schicht in der Topologie. Er wird dadurch zum hierarchisch höchsten Actor, übergibt seinen direkten Kindern die wichtigsten Rahmenparameter mit der *startMessage* und kontrolliert die Ausführung der Zeitschritte. Der Monitor Actor kümmert sich um die Synchronisation mit dem externen System (z.B. SCADA-Systeme), sendet Zeitstempel und kann externe Softwarekomponenten aufrufen.²¹

Die Trennung zwischen der Anwendungs- (Supervisor) und der Simulationslogik (Monitor) ermöglicht es, verschiedene Synchronisationsschemata zu handeln, wie zum Beispiel eine Durchführung der Quartiersoptimierung bei jeder vollen Viertelstunde oder Co-Simulationen.

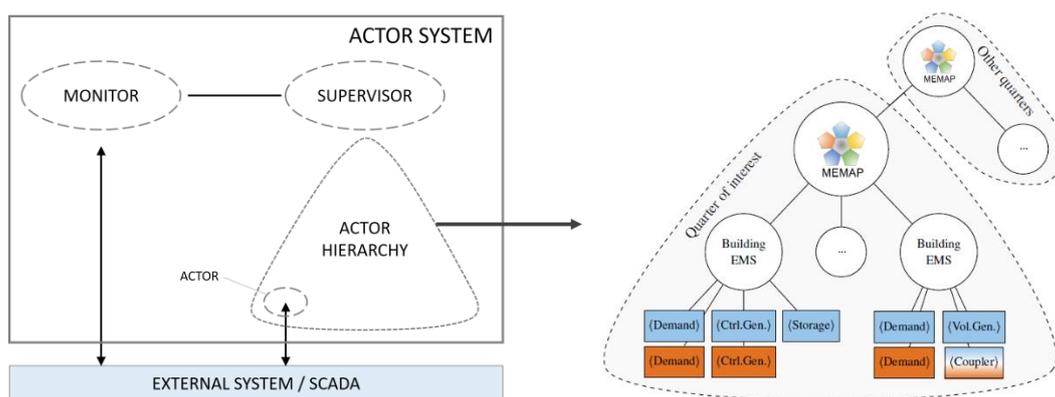


Abbildung 11: Elemente des Actor System und die Realisierung in MEMAP mit den Anlagen als Aktoren.

²¹ D. Bytschkow, M. Zellner and M. Duchon, *Combining SCADA, CIM, GridLab-D and AKKA for smart grid co-simulation*, 2015 IEEE Power & Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT) 2015

iv. Aggregationsplattform

Zur Konfiguration des oben beschriebenen Actor-Systems und der Systemtopologie benötigt es eine Softwareumgebung, die die Daten aus verschiedenen Quellen interpretiert und sie zu einer dem realen System entsprechenden Actor-Topologie komponiert. Die Actor-Topologie wird dabei durch den *TopologyController* (siehe Abbildung 11, links) durchgeführt, welche die zentrale Klasse der MEMAP Softwareumgebung ist und die die externen Informationen in die in Abbildung 10 (rechts) dargestellte Hierarchie überführt. Die entsprechenden Basisparameter für die Optimierung (siehe Tabelle 13) werden dabei über die Klassen *JettyStart* bzw. *GuiController* konfiguriert und in der *TopologyConfig* gespeichert.

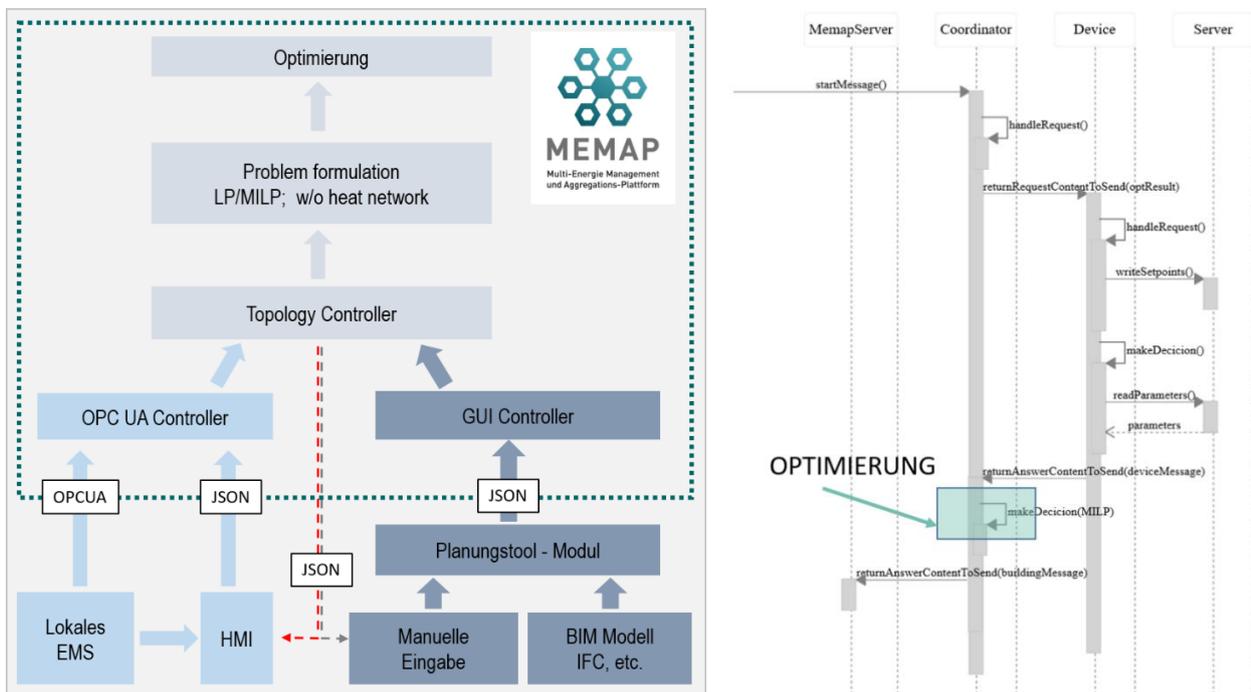


Abbildung 12 MEMAP Framework zur Komposition der Topologie (links) und die internen Abläufe zur Datenaggregation für den Optimierungsalgorithmus (rechts).

Je nachdem, ob es sich hierbei über eine Instanz für den Quartiersbetrieb („Live-Modus“) oder um eine Planungsinstanz („Planungstool“) handelt, wird durch die Klassen *JettyStart* bzw. *GuiController* auch vorgegeben, welche Gebäude-Aktoren initialisiert werden und aus welchen Datenquellen die Informationen zu deren Kinder-Aktoren gelesen werden sollen. Diese Initialisierung wird über das *OpcUaController* bzw. *BuildingController* Interface realisiert, wobei die Daten dann entweder unter den entsprechenden NodeIDs von den OPC-UA-Servern der lokalen EMS abgefragt oder aus der JSON-Datei, die über die Benutzeroberfläche des Planungswerkzeuges erstellt wurde, extrahiert werden. Im letzteren Fall werden die Verbrauchsdaten über CSV Dateien eingelesen, deren Speicherpfad sich an der entsprechenden Stelle im JSON befindet.

Sobald die Topologie definiert ist, kann das Actor-System initialisiert werden. Unterhalb des Actor-Supervisor sitzt dabei der *MemapCoordinator* an der Spitze der Hierarchie, welcher die in der *startMessage* erhaltene Anfrage zunächst an hierarchisch niedrigeren Gebäude-Aktoren weiterleitet. Im Sequenz-Diagramm in Abbildung 11 (rechts) ist dargestellt, wie die Anfrage auf Ebene der Gebäude-Aktoren dann an die Device-Aktoren weitergereicht wird, welche damit ebenfalls Ihren Zyklus starten und die zu Ihrer Klasse/Anlage gehörigen Daten aus den per *OpcUaController* bzw. *BuildingController* vorgegebenen Quellen aggregieren. Diese Daten werden gemäß des MEMAP-

Datenmodells in den Antworten der Aktoren strukturiert und an die höheren Hierarchien gesendet, bis sie wieder beim *MemapCoordinator* zusammenlaufen. Mit den Informationen der *TopologyConfig* entscheidet der *MemapCoordinator* nun, welcher Algorithmus und welches Optimierungsziel zur Optimierung verwendet werden soll und ruft die entsprechende Klasse auf, die mit den aggregierten Daten das Optimierungsproblem formuliert.

Nach dem erstmaligen Erstellen der Topologie für den jeweiligen Anwendungsfall können damit also im „Live-Betrieb“ in regelmäßigen Abständen die Fahrpläne für die Anlagen aktualisiert oder aber im Planungswerkzeug verschiedene Zeiträume und Zeitschritte unter wechselnden externen Einflüssen (z.B. Preissignale) berechnet werden. Zusätzlich kann die Topologie auch Datenmodell-konform als JSON exportiert werden, was eine Verbindung zwischen den beiden Einsatzgebieten schafft:

- Eine durch reale lokale EMS und die zur Verfügung gestellten Daten erzeugte Topologie kann in das Planungstool geladen werden, um eine darauf aufbauende Planung mit zukünftigen Investitionen durchzuführen (blaue gestrichelte Linie).
- Eine im Planungstool gezeichnete oder per BIM importierte Wärmenetztopologie (inkl. Leitungslängen, Leistungsgrenzen und Verlusten) kann in der Konfiguration für den „Live-Betrieb“ berücksichtigt werden (rote gestrichelte Linie).

Um dieses aktor-basierte System für die gebäudeübergreifende Optimierung aber flexibel, selbstständig und skalierbar zu halten, war es notwendig bestimmte Anlagen zu klassifizieren und zu abstrahieren. Da bereits über das Nachrichtenformat zwischen den unterschiedlichen Aktorklassen (damit ist ein unterschiedliches *BehaviourModel* auf Ebene der Device-Aktoren gemeint) gewisse für die Optimierung notwendige Parameter und Datentypen definiert werden müssen, wurde ein für alle beteiligten Schnittstellen einheitliches Datenmodell erarbeitet, welches im nächsten Abschnitt vorgestellt wird.

B. Datenmodell und Datenpunkte

Verschiedene Hersteller von EMS-Systemen und energietechnischen Anlagen haben unterschiedliche proprietäre Schnittstellen und Datenmodelle entwickelt. Für eine Multi-Gebäude- und Multi-Energie-Optimierung mit verschiedenen beteiligten Geräten ist daher ein Informationsmodell erforderlich, das es ermöglicht die Daten für den Optimierungsprozess zu strukturieren und zu vereinheitlichen. Im Rahmen des Projektes wurde von allen Projektpartnern gemeinsam ein Datenmodell entwickelt, welches auf den Optimierungs- und Kommunikationsprozess in Multi-Energie Quartieren angepasst ist. MEMAP und damit auch das Datenmodell berücksichtigen die beiden Sektoren Wärme und Elektrizität. Um das energetische Verhalten der Gebäude modellieren zu können, werden verschiedene generische Anlagenklassen unterschieden, welche Energie erzeugen, konsumieren, speichern oder verteilen können. Es werden die folgenden Anlagenklassen unterschieden, die in einem lokalen EMS vorkommen können (siehe auch Abbildung 12):

- Verbrauch (elektrisch oder thermisch)
- Kontrollierbare Erzeuger (z.B. Gaskessel oder Generator)
- Volatile Erzeuger (z.B. Photovoltaik oder Solarthermie)
- Koppler (z.B. BHKWs oder Wärmepumpen)
- Speicher (z.B. sensibler Wärmespeicher oder Batterie)
- Wärmenetzverbindung
- (Elektrisches Netz)

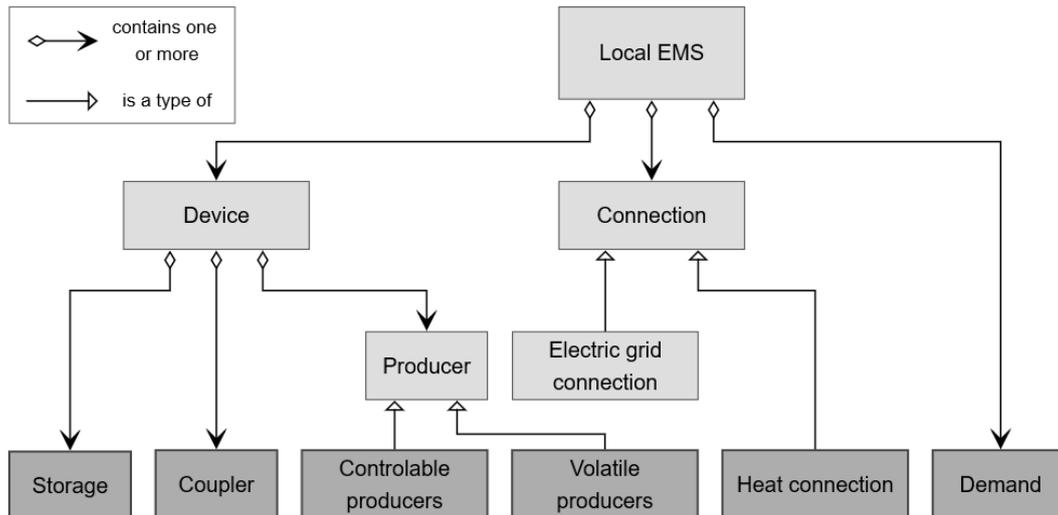


Abbildung 13: Generische Anlagenklassen eines lokalen EMS für die gebäudeübergreifende Optimierung in MEMAP.

Diese generischen Anlagenklassen sind ausreichend um alle typischerweise relevanten, dezentralen energietechnischen Anlagen in einem Quartier abzubilden. Das Datenmodell umfasst verschiedene Datenpunkte, welche sich in vier Kategorien einteilen lassen:

- Parameter (zeitinvariabel)
- Prognosen (zeitvariabel, arrays)
- Setpoints (zeitvariabel, scalars)
- Messwerte (zeitvariabel)

Parameter sind zeitinvariable Größen, bei denen es sich oftmals um technische Spezifikationen der verschiedenen Anlagen handelt. Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die zugehörigen Parameter zu jeder Anlagenklasse. Prognosen sind zeitvariabel und bilden die dynamischen Randbedingungen für die iterative Optimierung im Live-Betrieb ab (siehe Tabelle 9). Dabei handelt es sich um Vorhersagen zu Verbräuchen, maximal möglicher erneuerbarer Erzeugung und Preisentwicklungen. Setpoints sind die Leistungsvorgaben für den nächsten Zeitschritt, welche von der MEMAP-Plattform pro Anlage an die lokalen EMS geschickt werden (siehe Tabelle 10). Messwerte bilden das Feedback des realen Energiesystems an die MEMAP-Plattform und sind in Tabelle 11 aufgeführt.

Tabelle 9: Datenmodell - Übersicht über die Parameter nach Anlagenklassen

Anlagenklasse	Parameter	Typ	Einheit
Kontrollierbarer Erzeuger	Effizienz	Skalar	-
	Max. Leistung	Skalar	kW
	Min. Leistung	Skalar	kW
	Sektor	{heat, electricity}	-
	CO ₂ Emissionen	Skalar	kg _{CO2} /kWh
Volatiler Erzeuger	Installierte Leistung	Skalar	kW

	Sektor	{heat, electricity}	-
	Kosten	Skalar	€/kWh
	CO ₂ Emissionen	Skalar	kgco ₂ /kWh
Koppler	Maximale Leistung primärer. Sektor	Skalar	kW
	Minimale Leistung primärer. Sektor	Skalar	kW
	Primäre Effizienz	Skalar	-
	Sekundäre Effizienz	Skalar	-
	Primärer Sektor	{heat, electricity}	-
	Sekundärer Sektor	{heat, electricity}	-
	CO ₂ Emissionen	Skalar	kgco ₂ /kWh
Speicher	Kapazität	Skalar	kWh
	Max. Beladeleistung	Skalar	kW
	Max. Entladeleistung	Skalar	kW
	Ladeeffizienz	Skalar	-
	Entladeeffizienz	Skalar	-
	Standby-Verluste	Skalar	SOC/h
	min. SOC am Horizontende	Skalar	-
	Sektor	{heat, electricity}	-
	Kosten	Skalar	€/kWh
	CO ₂ Emissionen	Skalar	kgco ₂ /kWh
(Wärmenetz)Verbindung	Effizienz bei Wärmebezug	Skalar	-
	Max. transportierbare Leistung	Skalar	kW
	Sektor	{heat, electricity}	-
Verbraucher	Sektor	{heat, electricity}	-

Tabelle 10: Datenmodell - Übersicht über Prognosen nach Anlagenklassen

Anlagenklasse	Input	Typ	Einheit
Verbraucher	Einkaufspreis aus Netz	Skalar / Array	€/kWh
	Verkaufspreis an Netz	Skalar / Array	€/kWh
	Verbrauchsvorhersage	Skalar / Array	kW
	CO ₂ Emissionsfaktor	Skalar / Array	kgCO ₂ /kWh
Kontrollierbarer Erzeuger	Kosten	Array	€/kWh
volatiler Erzeuger	Erzeugungskapazität	Array	kW
Koppler	Kosten primärer Sektor	Array	€/kWh

Tabelle 11: Datenmodell – Übersicht über Setpoints nach Anlagenklassen

Anlagenklasse	Setpoint	Typ	Einheit
Verbraucher	Leistung Einkauf	Skalar	kW
	Leistung Verkauf	Skalar	kW
volatiler Erzeuger	Leistung Sekundärenergie	Skalar	kW
Koppler	Leistung Sekundärenergie primärer Sektor	Skalar	kW
Speicher	Beladeleistung	Skalar	kW
	Entladeleistung	Skalar	kW
(Wärmenetz-)Verbindung	Leistung Netzeinspeisung	Skalar	kW
	Leistung Netzbezug	Skalar	kW

Tabelle 12: Datenmodell – Übersicht über Messwerte nach Anlagenklassen

Anlagenklasse	Variable	Typ	Einheit
Speicher	Gemessener Speicherladezustand (SOC) am Beginn d. Zeitschritts	Skalar	-

Vom Datenmodell zum Standard für Interoperabilität im Quartier

Generell schafft ein solches Datenmodell als gemeinsame Bezugsquelle die Grundlage einer Standardisierung der Schnittstelle zwischen den verschiedenen Beteiligten im Quartier (Lokale EMS, Optimierungsplattform, Gerätehersteller, Benutzerschnittstelle, Externe Dienstleistungssoftware u.v.m.). Wird dieses Datenmodell dann noch zusätzlich mit der Kommunikationsinfrastruktur verknüpft, so können die einzelnen Datenpunkte mithilfe eines hinterlegten Informationsmodells auch von Maschinen und Programmen automatisch identifiziert und zugeordnet werden. Diese Eigenschaft bildet die Grundlage für herstellerunabhängiges „Plug & Play“ von weiteren Anlagen oder Services an das Datensystem des Quartiers. Aus diesem Grund wurde für die Kommunikationsarchitektur im MEMAP Projekt das für solche semantische Interoperabilität bereits in der Industrie bewährte Protokoll OPC UA gewählt. Ein wie oben beschriebenes objektorientiertes Datenmodell kann hierin als Grundlage für eine sogenannte „OPC UA Companion Specification“²² dienen. Diese öffentlich zugänglichen Spezifikationen von Informationsmodellen werden meist von Branchenverbänden auf Basis solcher Datenpunktlisten und –beziehungen für einen bestimmten Bereich dokumentiert, um eine Interoperabilität verschiedener Hersteller in einem System zu gewährleisten und sind als XML-Datei von allen Geräten implementierbar.

Da eine solche grundlegende Entwicklung den Rahmen dieses Projektes gesprengt hätte, wurde im Projekt als Zwischenschritt eine Namenskonvention für die oben beschriebenen Datenpunkte entwickelt und implementiert, welche beispielhaft in Abbildung 13 dargestellt ist. Diese Konvention ermöglicht eine automatische Identifikation von Datenpunkten über OPC-UA-Clients durch einen Abgleich des entsprechenden Strings mit dem hinterlegten Datenmodell. Allerdings wurde diese Herangehensweise nur zu Demonstrationszwecken im Projekt gewählt, da hier generell eine hohe Fehleranfälligkeit beim Anlegen der Datenpunkte besteht. Eine zusätzliche automatisierte Prüfung auf eine korrekte Implementierung wäre in diesem Fall unumgänglich (z.B. über ein Prüfskript).

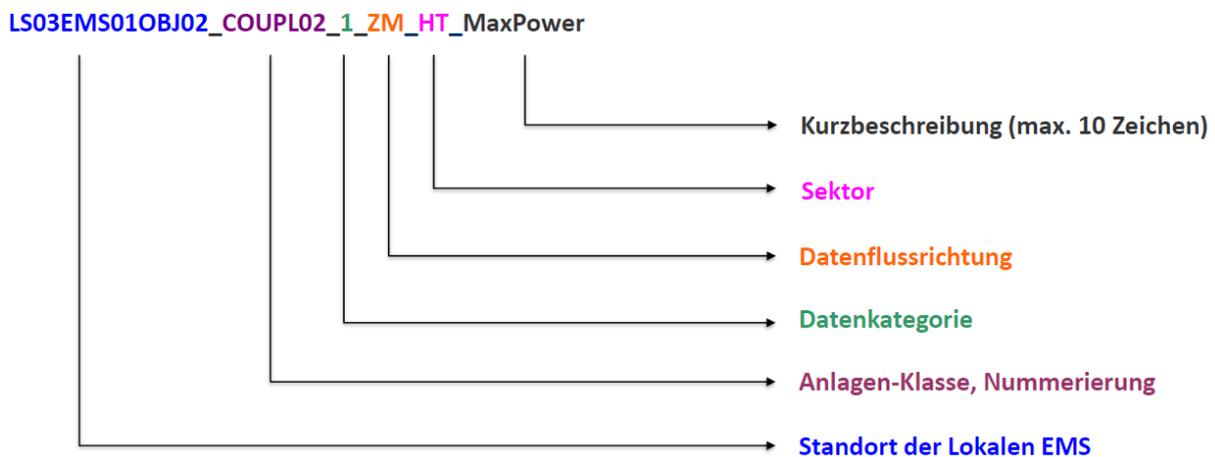


Abbildung 14: Zusätzliche Namenskonvention für Datenpunkte in MEMAP

Wie oben beschrieben könnte diese Anfälligkeit vermieden werden, wenn durch eine gemeinsam hinterlegte XML-Spezifikation (Companion Specification) jeder Datenpunkt vom entsprechenden OPC-UA-Client automatisch zugeordnet und in seiner Bedeutung (Semantik) verstanden werden könnte.

²² OPC Foundation, <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/ua-companion-specifications/>

C. Modellprädiktiver Regler, Modelle und Optimierung

i. MEMAP als Modellprädiktiver Regler

Die MEMAP-Plattform soll die Energieflüsse im Quartier im laufenden Live-Betrieb hinsichtlich verschiedener Kriterien optimieren können. Darüber hinaus soll die Plattform in der Lage sein, zeitvariable Preise zu berücksichtigen und den intelligenten Kauf oder Verkauf von Energie sowie das vorausschauende Laden und Entladen von Speichern zu ermöglichen. Ein modellprädiktiver Regelungsansatz bringt diese Eigenschaften intrinsisch mit sich und wurde daher für den Kern der MEMAP-Plattform gewählt (siehe auch Abschnitt E0.B Technischer Stand der Wissenschaft: unser Ausgangspunkt).

Abbildung 14 zeigt das Schema der MEMAP-Plattform als modellprädiktiven Regler in einem Regelkreis. In schwarz sind dabei die üblichen Begrifflichkeiten für einen Regelkreis aus der Regelungstechnik aufgeführt und in grün erläutert, was dem im MEMAP-Kontext entspricht. Die Anlagen und Prozesse des Quartiers bilden die Regelstrecke, deren Stellgrößen Leistungs-Sollwerte (Setpoints) für die einzelnen Anlagen sind. Diese Setpoints sind (abgesehen von einigen fix Multiplikationsfaktoren) auch die Entscheidungsvariablen der Optimierung. Der Systemzustand wird durch die Ladezustände (SOCs) der Speicher in der Nachbarschaft dargestellt. Die Speicher spielen eine entscheidende Rolle, da sie das Element sind, welches eine intertemporale Verbindung zwischen den zeitdiskreten Systemzuständen herstellt. Erst durch die Speicher ist es möglich Angebot und Nachfrage zu einem gewissen Teil voneinander zu entkoppeln und so die Flexibilität für vorausschauendes und intelligentes Betreiben der Anlagen zu erhalten. Die Be- und Entladeleistungen der Speicher beeinflussen die zukünftigen Speicherladezustände (SOCs) und damit die zukünftigen Systemzustände. In diesem Sinne sind die SOCs die Regelgrößen, die gemessen und als Rückmeldung des realen Systems an die MEMAP-Plattform zurückgesendet werden. Aus regelungstechnischer Perspektive sind die Abweichungen zwischen den Vorhersagen und dem tatsächlichen Bedarf, den tatsächlichen volatilen Erzeugungskapazitäten, und den tatsächlichen zeitlich variablen Kosten, sowie das Verhalten der realen Anlagen Störgrößen der Regelstrecke.

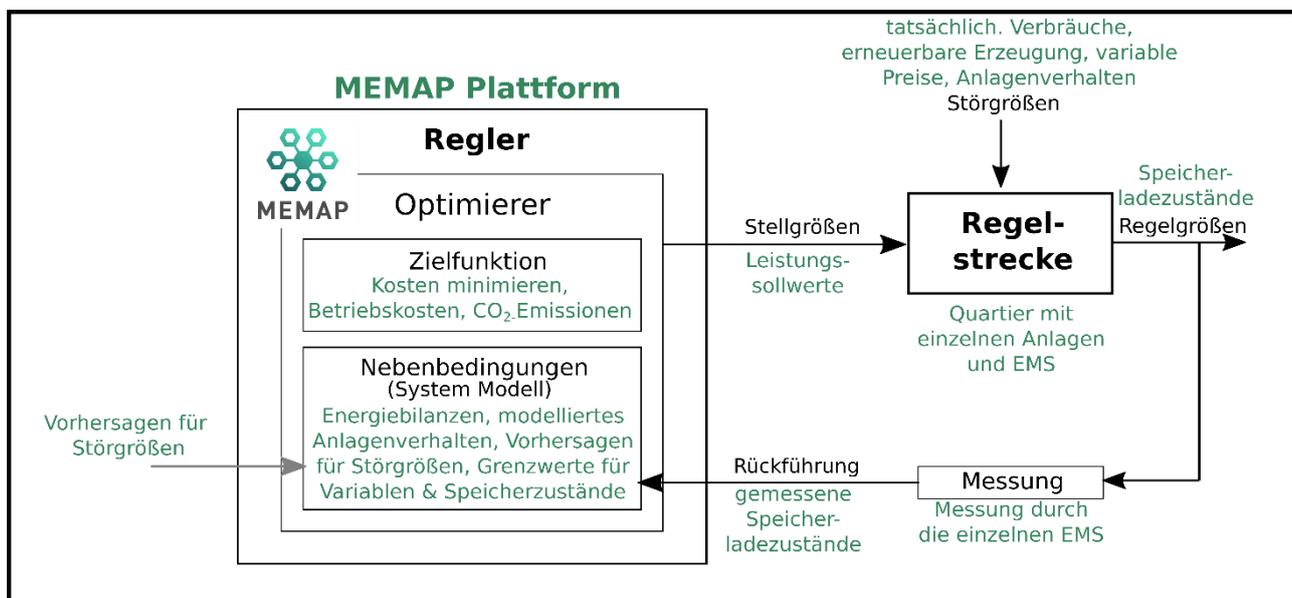


Abbildung 15: Die MEMAP-Plattform als Modellprädiktiver Regler des Quartiers

Die MEMAP-Plattform ist ein Regler, welcher aus einem Optimierer und einem internen Systemmodell besteht. Beim konventionellen Prozess der MPC ruft der Optimierer iterativ ein Systemmodell mit verschiedenen Werten für die Entscheidungsvariablen auf und versucht, den Wertesatz zu finden, der die a priori definierte Zielfunktion minimiert. Wir haben unseren Regler

jedoch so formuliert, dass Energiebilanzen, modelliertes Geräteverhalten und Speichermodelle als Nebenbedingungen des Optimierungsproblems formuliert werden. Innerhalb der MEMAP-Plattform wird das Systemmodell also nicht, wie bei MPC-Verfahren üblich, iterativ vom Optimierer aufgerufen, sondern ist integraler Bestandteil des Optimierungsproblems selbst. Dies bietet den Vorteil, dass Kenntnisse über die mathematische Form des Systemmodells (z.B. linear, konvex etc.) ausgenutzt werden können. Dadurch können bewährte Lösungsverfahren verwendet werden, welche im Unterschied zu Heuristiken deterministisch und mathematisch nachvollziehbar sind. Das wiederum erlaubt es gesicherte Aussagen zu den gefundenen Lösungen zu treffen, wie beispielsweise, dass diese unter den gegebenen Bedingungen sicher optimal sind. Hierfür muss das Systemmodell allerdings so (vereinfacht) formuliert werden, dass es als Nebenbedingung in das Optimierungsproblem eingebettet werden kann und mit herkömmlichen Solvern zu lösen ist. Diese Vereinfachung führt selbstverständlich zu einem Verlust an Genauigkeit und Detailtreue des Modells, aber auch zu einem Zugewinn an Rechengeschwindigkeit, Übertragbarkeit und Handhabbarkeit.

Die mathematischen Modelle und Formulierungen der Nebenbedingungen werden im folgenden Abschnitt E1.C.xiv vorgestellt. Die Prognosen für die oben genannten Störgrößen werden als Parameter in die Nebenbedingungen und die Zielfunktion aufgenommen. Dies macht die Nebenbedingungen und die Zielfunktion abhängig von den Zeitpunkten, die innerhalb des aktuellen Optimierungshorizonts betrachtet werden. Für die intertemporale Regelung mittels MPC wird die kontinuierliche Zeit in diskrete Schritte eingeteilt. Für jeden Abtastpunkt betrachtet der Regler einen endlichen, diskreten Zeithorizont in der Zukunft. Der Optimierer versucht, einen optimalen Satz von Werten für die Entscheidungsvariablen (Stellgrößen, Leistungssollwerte) zu finden, der die Zielfunktion minimiert und gleichzeitig alle durch die internen Modelle gegebenen Beschränkungen erfüllt. Der gemessene Systemzustand in Form von SOCs ist die Randbedingung (Startpunkt) der Optimierung und Teil der Nebenbedingungen. Die Optimierung führt zu einer optimalen Trajektorie, die einen Satz von Stellgrößen für jeden diskreten Zeitpunkt innerhalb des Optimierungshorizonts enthält. Der Satz optimaler Stellgrößen (Leistungssollwerte) für den nächstgelegenen Zeitpunkt wird dann auf die reale Regelstrecke (Nachbarschaft) bis zum nächsten Abtastzeitpunkt angewandt, bei dem der Horizont verschoben und das gesamte Verfahren wiederholt wird (beweglicher Horizont - siehe Abbildung 15).

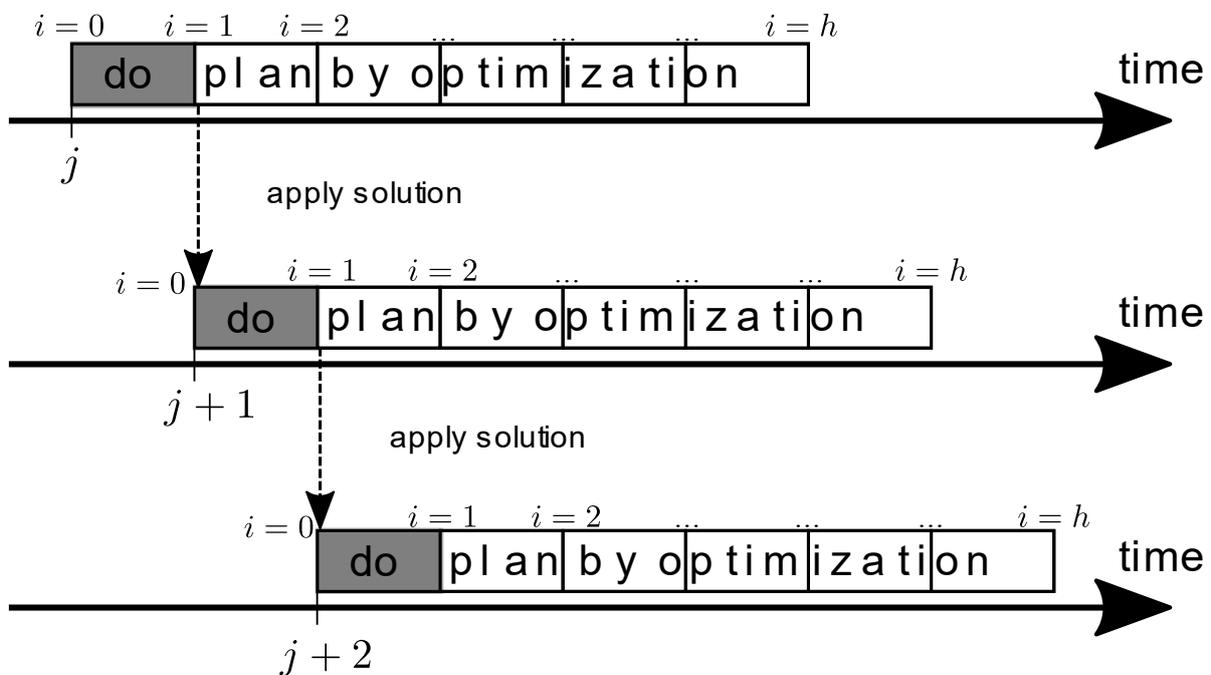


Abbildung 16: Veranschaulichung des beweglichen Horizonts und der Planung durch Optimierung bei modellprädiktiver Regelung

Mit diesem Verfahren können die Leistungsflüsse in der Nachbarschaft unter Berücksichtigung der Prognosen optimal geregelt werden. Es werden Prognosen zu den in Tabelle 9 aufgeführten Datenpunkten benötigt. Derartige Prognosen sind oft recht komplex und es gibt ausgereifte wissenschaftliche Untersuchungen und Tools hierzu. Daher wird davon ausgegangen, dass die Prognosen über externe Tools bezogen werden und nicht Teil von MEMAP sind.

ii. Modelle und Optimierung

Das Systemmodell wird in Form von Zielfunktion und Nebenbedingungen in das Optimierungsproblem des modellprädiktiven Reglers integriert. Die Nebenbedingungen umfassen u.a. Energiebilanzen und gerätespezifische Beschränkungen. Wichtig ist hierbei, dass die Plattform möglichst alle Sektoren vereint berücksichtigt, denn nur so ist eine durchgehende Sektorenkopplung umzusetzen. Das entwickelte Systemmodell basiert daher auf dem Energy Hub Ansatz^{23,24}. Ein Energy Hub ist dabei eine Abstraktion realer Energiewandlungsanlagen, bei der mehrere eingehende Energieströme in mehrere ausgehende Energieströme umgewandelt werden. Zwischen den ein- und ausgehenden Leistungen wird vereinfacht eine lineare Beziehung angenommen, was eine Matrixschreibweise ermöglicht, wie sie in Abbildung 16 dargestellt ist. Im Rahmen von MEMAP ist dieser Ansatz insbesondere für die Modellierung von Sektorenkopplern, wie Wärmepumpen oder BHKWs geeignet. Die gewählte Formulierung stellt ein zeitlich diskretes gemischt-ganzzahliges lineares Optimierungsproblem (MILP – Mixed Integer Linear Problem) dar. Der Vorteil hierbei ist, dass dieser Problemtyp mit gängigen Lösungsverfahren recheneffizient gelöst werden kann. Das resultierende Systemmodell wurde zusammen mit den entsprechenden Verweisen in den wissenschaftlichen Arbeiten der beteiligten Partner präsentiert^{25, 26, 27}. Eine weitere Publikation in Form eines wissenschaftlichen Papers, welches den Weg von der Modellierung bis zur Softwareimplementierung und Laborvalidierung beschreibt, wird im Nachgang des Projektes veröffentlicht. Nachfolgend werden die zentralen Elemente des modularen Systemmodells erläutert, wodurch insbesondere die notwendigen Vereinfachungen und damit auch Grenzen der MEMAP-Plattform klar werden. Abbildung 17 illustriert das Systemmodell inkl. der kontinuierlichen Entscheidungsvariablen x und der binären Entscheidungsvariablen y . Je nachdem welcher Sektor betrachtet wird gehen die entsprechenden Leistungsflüsse in die Energiebilanz ein.

²³ Geidl, Martin, and Göran Andersson. "Optimal power flow of multiple energy carriers." *IEEE Transactions on power systems* 22.1 (2007): 145-155.

²⁴ Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-ivatloo, B., & Yousefi, H. (2017). Energy hub: From a model to a concept – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 80, 1512–1527. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.07.030>

²⁵ Bytschkow, D., Capone, A., Mayer, J., Kramer, M., & Lickleder, T. (2019, September). An OPC UA-based energy management platform for multi-energy prosumers in districts. In *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)* (pp. 1-5). IEEE.

²⁶ Heidemann, L., Bytschkow, D., Capone, A., Lickleder, T., & Kramer, M. (2019). Sector Coupling with Optimization: A comparison between single buildings and combined quarters. In *Abstracts from the 8th DACH+ Conference on Energy Informatics*.

²⁷ Bytschkow, D. (2020). *A generic hierarchic architecture for the coordination of energy management systems* (Doctoral dissertation, Technische Universität München).

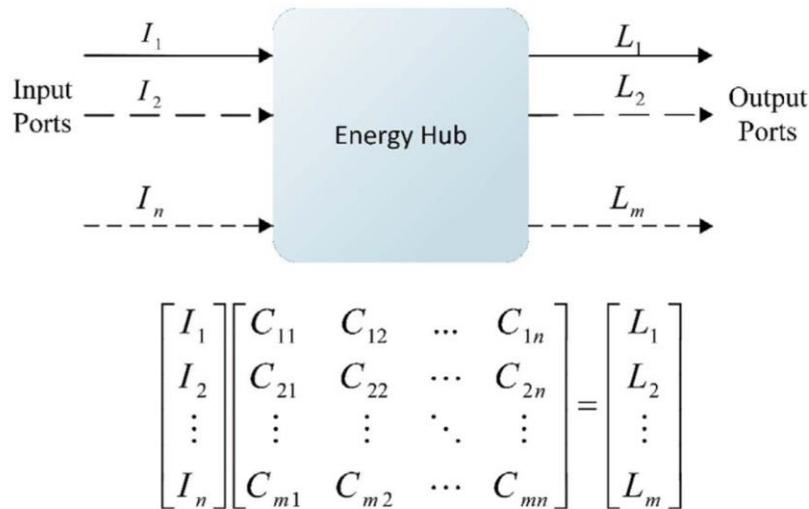


Abbildung 17: Prinzip der Modellierung von Energiewandlung in einem Energy Hub²⁴

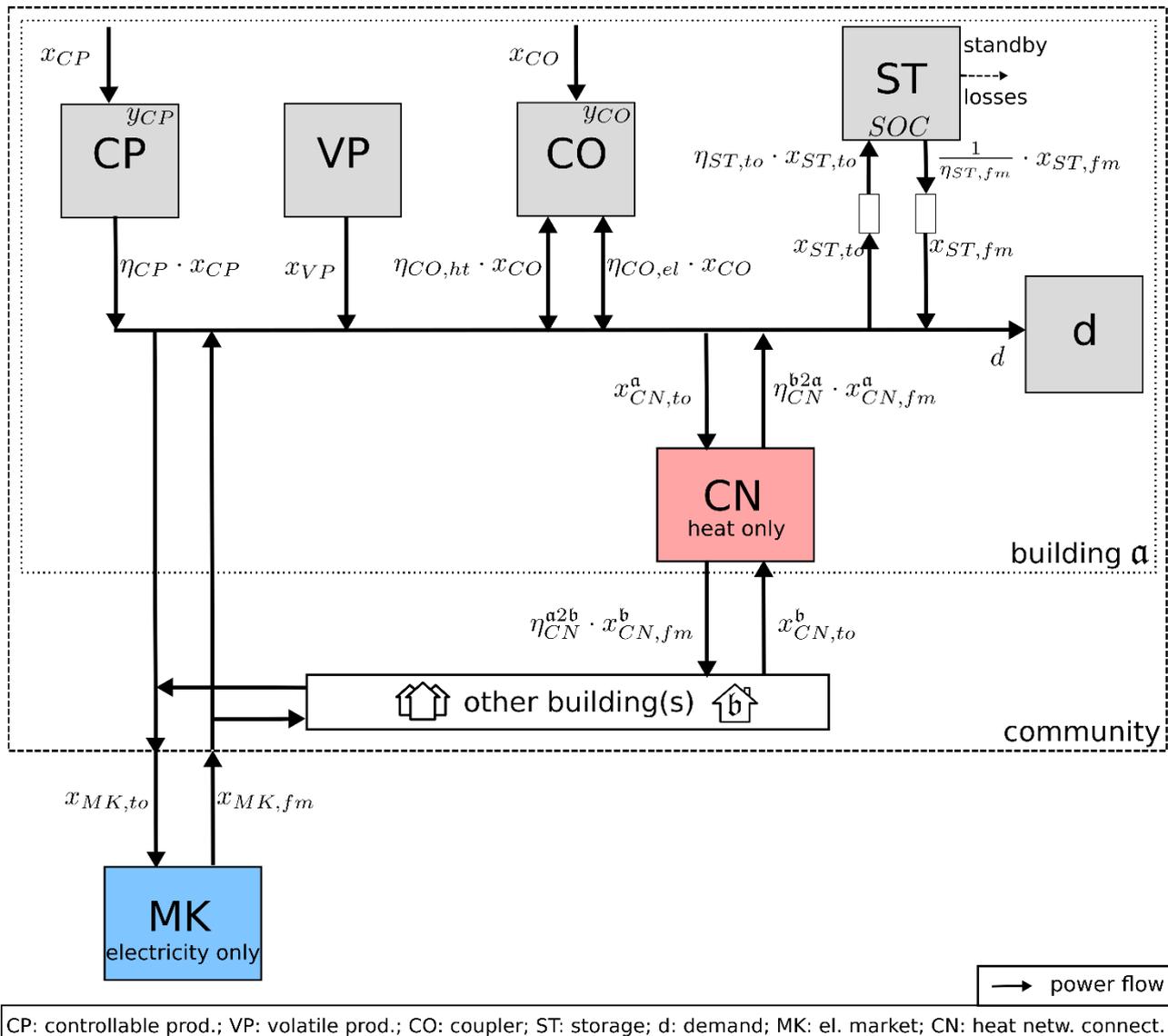


Abbildung 18: Illustration des MEMAP-Systemmodells inkl. der verschiedenen Entscheidungsvariablen x und y

Entscheidungsvariablen

Die kontinuierlichen Entscheidungsvariablen der Optimierung unterscheiden sich teilweise nur durch Multiplikation mit Umwandlungseffizienzen von den Leistungssollwerten (Setpoints), die an die Anlagen kommuniziert werden. Volatile Erzeuger können nur kontinuierlich zwischen der (vorhergesagten) maximal verfügbaren Anlagenleistung und 0 kW betrieben werden. Die Anlagenklasse volatiler Erzeuger wird vor allem genutzt, um Anlagen zur Nutzung erneuerbarer Energien, wie Photovoltaik oder solarthermische Anlagen abzubilden. Es wird angenommen, dass die Vorhersagen sich direkt auf Sekundärenergie beziehen. Damit die Energie bzw. Leistung gemeint, welche direkt vom betrachteten Energiesystem genutzt werden kann. Für Solarthermie wäre das die Wärmeenergie aus den Solarkollektoren und nicht die auftreffende Strahlungsleistung. Es wird also davon ausgegangen, dass Wirkungsgrade und das technische Leistungsmaximum bereits in den Prognoseberechnungen enthalten sind. Bei Kopplern ist die kontinuierliche Entscheidungsvariable die Primärenergie des primären Sektors. Im Beispiel eines mit Gas betriebenen BHKWs wäre die Entscheidungsvariable die Gasleistung (Primärenergie). Der Setpoint für das EMS zur Regelung des BHKWs ist für gewöhnlich allerdings die thermische oder elektrische Leistung, welche sich von der Entscheidungsvariable Gasleistung durch den jeweiligen Wirkungsgrad unterscheidet. Analog verhält es sich mit Wärmepumpen, bei denen der COP den Wirkungsgrad ersetzt. Um bei kontrollierbaren Erzeugern und Kopplern zwischen an/aus und einem modulierenden Betrieb zwischen minimaler und maximaler Leistung unterscheiden zu können, verfügen diese Anlagenklassen über zusätzliche binäre Entscheidungsvariablen.

Zielfunktion

Die Zielfunktion stellt die Formel zur Berechnung der zu minimierenden Kosten dar. Die Kosten können entweder CO₂-Emissionen oder monetäre Kosten sein. Die Kosten skalieren linear mit den Anlagenleistungen. Je nach Einsatz der Plattform können hier z. B. variable Betriebskosten oder direkte Emissionen aus dem Betrieb, aber auch Emissionen aus einer Lebenszyklusanalyse oder die normalisierten Gesamtkosten eines Geräts pro kW verwendet werden. Zudem gehen zeitvariable Kaufpreise und Verkaufserlöse des Energieverbundes mit dem öffentlichen Stromnetz ebenfalls linear skaliert mit den betreffenden Leistungen in die Zielfunktion ein.

Energiebilanzen

Sowohl für den Wärme- als auch für den Stromsektor des betrachteten Quartiers müssen die Leistungen ständig im Gleichgewicht sein. Im Rahmen der Modellierung wird angenommen, dass die Leistungen und auch die Leistungsbilanzen jeweils über einen diskretisierten Zeitschritt hinweg konstant sind. Durch diese Einbeziehung der Zeit gehen die Leistungsbilanzen in Energiebilanzen über, welche mit Hilfe der Anlagenleistungen als Entscheidungsvariablen ausgedrückt werden können. Die Energiebilanzen müssen in jedem Zeitschritt ausgeglichen sein. Das umfasst folgende Energieströme:

- Erzeugung
- Verbrauch
- Einspeicherung
- Ausspeicherung
- Einkauf von Extern
- Verkauf an Extern

Die Energiebilanzen sind Nebenbedingungen der Optimierung im MPC-Verfahren. Für korrekte Energiebilanzen müssen die entsprechenden Effizienzen berücksichtigt werden, welche z.B. Verluste bei der Ein- und Ausspeicherung oder Wandlung modellieren, sodass sich alle Leistungsströme innerhalb einer Energiebilanz auf denselben Punkt beziehen. Wie Oben eingeführt, wird hierfür der Energy Hub Ansatz verwendet. Des Weiteren wird angenommen, dass sich die Nachfrage im Laufe der Zeit entsprechend der Vorhersagen in diskreten Schritten ändert, die mit den MPC-Schritten übereinstimmen. Daher ist der mathematisch verwendete Bedarf eine

Annäherung an den tatsächlichen kontinuierlichen Bedarf. Für den Wärmesektor verfügt jedes Gebäude über separate Nebenbedingungen, die die Wärmenetzverbindungen zu anderen Gebäuden als einzelne Geräte einschließen. Die Nebenbedingungen modellieren so das Wärmenetz als einen unvollständigen Graphen, indem sie Verbindungen mit ihren Übertragungskapazitäten und Wirkungsgraden explizit berücksichtigen. Die Gebäude können untereinander verlustbehaftet Wärmeenergie austauschen, es findet jedoch kein Kauf oder Verkauf statt und es gibt keinen lokalen Energiemarkt. Im Elektrizitätssektor wird davon ausgegangen, dass ein vollständiges und ideales Stromnetz jedes Gebäude mit vernachlässigbaren Verlusten anbindet, so dass der Strom innerhalb des Viertels ohne Einschränkungen gemeinsam genutzt werden kann („Leiterplatte“). Hier ist also ebenfalls kein Energiemarkt berücksichtigt, vielmehr kann von einem Energieverbund (Energy Community) gesprochen werden. Aufgrund der Annahme eines idealen Stromnetzes tritt das Viertel als ein einziger Marktteilnehmer auf und die gesamte Erzeugung und Nachfrage wird aggregiert. Nur überschüssige Nachfrage oder Erzeugung wird mit dem externen Stromnetz ausgetauscht (Kauf- / Verkauf).

Gerätespezifische Bedingungen

Die gerätespezifischen Bedingungen sind spezifisch für die mit dem Datenmodell eingeführten Anlagenklassen. Für Geräte jeder Anlagenklasse begrenzen Nebenbedingungen die maximale Leistung auf vorgegebene Parameter. Auch hier sind die Wandlungseffizienzen zu berücksichtigen - Näheres dazu ist der Beschreibung der Entscheidungsvariablen oben zu entnehmen. Für Koppler und steuerbare Erzeuger werden Mindestleistungsgrenzen berücksichtigt. Sie enthalten ebenfalls Wirkungsgrade, da die Leistungswerte als Primärleistung betrachtet werden und in Sekundärleistung umgewandelt werden müssen, um mit den Grenzwert-Parametern vergleichbar zu sein. Die technische Leistungsgrenze volatiler Erzeuger sind in der Prognose enthalten, die als dynamische Obergrenze wirkt. Die Grenzen für den Koppler werden nur für den Wärmesektor formuliert, da das Leistungsverhältnis zwischen den Sektoren als konstant angenommen wird. Die Speicher haben für jede Flussrichtung (Be- und Entladung) separate Randbedingungen. Alle diese Nebenbedingungen gelten für jeden Zeitschritt.

Intertemporale Nebenbedingungen

Wie bereits erwähnt, ermöglicht die Anlagenklasse der Speicher dem modellprädiktiven Regler die zeitliche Entkopplung von Nachfrage und Erzeugung. Dies ist einer der größten Hebel zur Effizienzsteigerung. Der Speicherladezustand (State-of-Charge – kurz SOC) ist die zentrale Größe der Speicherklasse. Der SOC beschreibt welcher Anteil der maximalen Speicherkapazität (kWh) genutzt wird. Der Systemzustand des Quartiers im modellprädiktiven Regler wird durch die Menge aller SOC zu einem Zeitpunkt beschrieben. Somit stellt die Modellierung der SOC das Systemmodell dar. Der Speicherladezustand zu einem Zeitpunkt innerhalb des Optimierungshorizonts resultiert aus dem gemessenen SOC zu Beginn des Optimierungshorizonts und allen Be- und Entladeströmen bis zum betrachteten Zeitpunkt innerhalb des Horizonts. Da diese Ströme selbst Entscheidungsvariablen des Optimierungsproblems sind, ergeben sich intertemporale Bedingungen, welche Leistungen aus mehreren Zeitschritten beinhalten. Hinzu kommen Selbstentladungseffekte der Speicher (Standby-Verluste), welche insbesondere bei Wärmespeichern von Bedeutung sind. Damit Lösungen ausgeschlossen werden, die Speicher theoretisch überladen ($SOC > 1$) oder tiefenentladen würden, sind intertemporale Nebenbedingungen für die Optimierung notwendig. Diese Nebenbedingungen modellieren zum einen den State-of-Charge (SOC) eines Speichers zu einem gewissen Zeitpunkt innerhalb des betrachteten Horizonts und begrenzen diesen zum anderen nach Oben und Unten entsprechend der parametrisierten Kapazitätsgrenzen. Zeitinvariante Parameter werden definiert, um die SOC-Bedingungen zu formulieren. Sie hängen nur von den Geräteparametern und der Dauer eines diskreten Zeitschrittes ab. Die Standby-Verluste, werden als konstanter Anteil des SOC angegeben, der während einer Stunde verloren geht. Über die Zeit ergibt sich so für die Standby-Verluste ein exponentieller Verlauf. Außerdem werden in den Nebenbedingungen Belade- und Entladewirkungsgrade berücksichtigt. Um einen Puffer für den Fall von ungenauen und zu geringen Verbrauchsvorhersagen zu garantieren, gibt eine zusätzliche Nebenbedingung pro Speicher den Mindestladezustand am Ende

des jeweiligen Optimierungshorizonts an. Außerdem kann durch die Einführung des Mindestladezustands bei thermischen Speichern ein gewisses Mindest-Temperaturniveau indirekt berücksichtigt werden.

iii. Erkenntnisse zum Systemmodell aus Simulationsläufen

Im Rahmen der Entwicklung des MEMAP-Kerns wurden insbesondere mit dem Planungswerkzeug verschiedene Simulationsläufe mit unterschiedlichen Systemkonfigurationen und Randbedingungen durchgeführt (siehe auch Abschnitt E5.O und E5.P). Dabei konnte einiges über das Verhalten des verwendeten Systemmodells und des Optimierungsproblems gelernt werden. Einige Erkenntnisse lassen direkte Rückschlüsse auf Multi-Energiesysteme in realen Quartieren zu.

Bei Anlagenkonstellationen, in denen die Erzeugungskapazitäten sehr knapp dimensioniert sind im Vergleich zu der zu erwartenden Nachfrage, sind die Energiespeicher essenziell als Puffer, um die Versorgungssicherheit gewährleisten zu können. Ziel und grundlegende Eigenschaft des modellprädiktiven Reglers der MEMAP-Plattform ist es die verfügbaren Anlagen- und Speicherkapazitäten unter Berücksichtigung der dynamischen Rahmenbedingungen bestmöglich auszunutzen. Um unnötige Standby-, sowie Be- und Entladeverluste zu vermeiden, werden die Speicher lediglich so stark beladen, dass der prognostizierte Bedarf möglichst kosteneffizient gedeckt werden kann. Bei ungenauen, zu niedrigen Verbrauchsprognosen kann es in Ausnahmefällen dazu kommen, dass die verfügbaren Erzeugungskapazitäten zusammen mit der eingespeicherten Energie nicht ausreichen, um den unerwartet hohen Verbrauch zu decken. Dies wurde in verschiedenen Simulationsläufen mit teils sprunghaften Verbrauchskurven beobachtet und führte dazu, dass das Optimierungsproblem nicht gelöst werden konnte. Zur Prävention dieses Effekts wurde daher als zusätzliche Nebenbedingung eine Untergrenze für die SOCs von Speichern am Ende des Optimierungshorizontes eingeführt. Diese stellt sicher, dass gemäß den zugrundeliegenden Modellen die betreffenden Speicher aus aktueller Perspektive bis zum Ende des Horizonts immer, z.B. auf 50%, geladen werden können. Da das MPC-Verfahren einen beweglichen Horizont verwendet bedeutet dies jedoch nicht, dass die Speicherladezustände niemals unter 50% sinken können.

D. Kommunikationskonzept und Sicherheit

i. Kommunikationskonzept

Wie in Abschnitt E1.A erläutert, wird für die Kommunikation zwischen der MEMAP-Plattform und verschiedenen lokalen EMS- oder Drittanbieterdiensten OPC UA als Maschine-zu-Maschine-Kommunikationsprotokoll gewählt. Abbildung 14 illustriert MEMAP als modellprädiktiven Regler des Quartiers. Die Plattform arbeitet mit einer Vielzahl unterschiedlicher zeitvarianter und zeitinvarianter Datenpunkte, darunter auch Arrays für die Zeitschritte über den betrachteten Horizont. Diese Informationen müssen von verschiedenen Datenquellen und -senken aggregiert und an diese gesendet werden. Es muss gewährleistet sein, dass alle relevanten Daten für einen Iterationsschritt

- (a) gleichzeitig in der Plattform bzw. den externen Datenquellen und -Senken vorliegen und
- (b) sich auf den gleichen Zeitraum beziehen.

Aus diesen Anforderungen verknüpft mit der oben beschriebenen Funktionsweise der modellprädiktiven Regelung ergibt sich die Notwendigkeit, dass die Datenkommunikation zwischen den beteiligten Entitäten koordiniert zu erfolgen hat. Daher wurde eine Ablaufsequenz für den Betrieb der Plattform mit realen Geräten entwickelt und implementiert. Diese stellt sicher, dass alle aggregierten Daten (einschließlich Prognosen) sich auf die gleichen diskreten Zeitschritte beziehen, alle Daten zur gleichen Zeit auf der Plattform zur Optimierung zur Verfügung stehen und auch gleichzeitig an alle angeschlossenen EMS zurückgesendet werden. Da die MEMAP-Plattform das verbindende zentrale Element ist, eignet sie sich als Quelle für ein Synchronisationssignal (Trigger). Die Ablaufsequenz ist nachfolgend beschrieben und wird in Abbildung 18 beispielhaft illustriert.

1. MEMAP triggert EMS (und Vorhersageanbieter)
2. MEMAP schreibt Sollwerte aus letzter Optimierung auf EMS
3. MEMAP liest aktuelle SOC-Werte
4. MEMAP liest aktuelle Vorhersagen für zukünftigen Horizont
5. MEMAP optimiert über zukünftigen Zeithorizont
6. MEMAP hält Optimierungsergebnisse (buffer) und wartet auf nächsten Zeitschritt

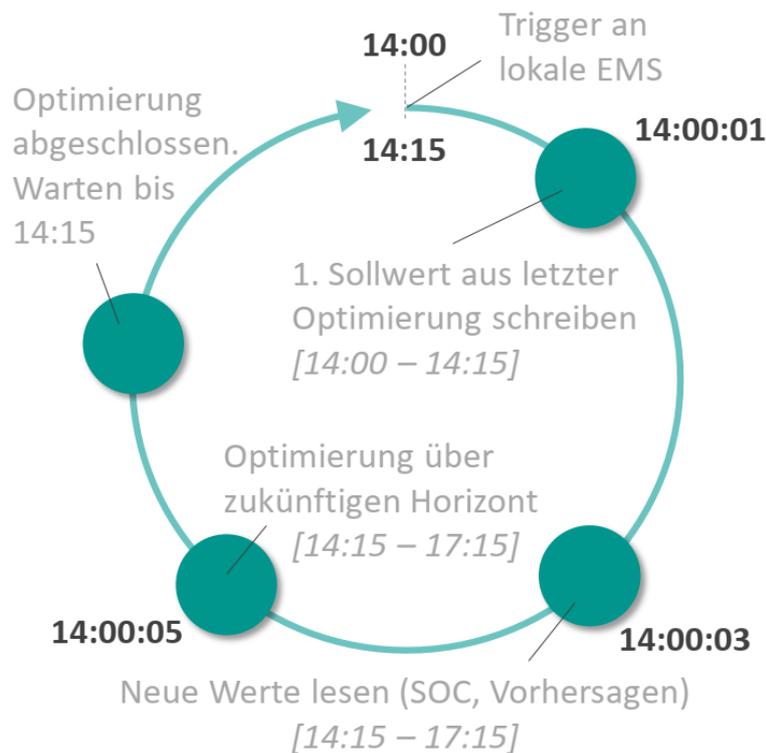


Abbildung 19: Exemplarische Illustration einer Iteration der Kommunikations-Ablaufsequenz zwischen MEMAP-Plattform, EMS und Drittanbietern

ii. Kommunikationsarchitektur und Sicherheitskonzept

Die im Projekt gewählte Kommunikationsarchitektur OPC UA (**O**pen **P**lattform **C**ommunication **U**nified **A**rchitecture) ist ein etablierter und gut gepflegter Standard für robusten und sicheren Datenaustausch (*Industrie 4.0 - Standard*), der per Design eine Vielzahl von Sicherheitselementen mitbringt. Bereits im Jahr 2015 wurde OPC UA vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) einer Sicherheitsanalyse unterzogen²⁸ mit dem Ergebnis, dass OPC UA im Gegensatz zu vielen anderen Industrieprotokollen ein hohes Maß an Sicherheit bietet. Dies gelingt, indem verschiedene etablierte Sicherheitstechnologien integriert sind, wie etwa Authentifizieren, Verschlüsseln, Signieren, Autorisieren, die einfach konfiguriert werden können.

Etablierte Kommunikationsmechanismen wie die im Projekt benutzte Client-Server-Kommunikation sind in OPC UA bereits mit einer Ende-zu-Ende Sicherheit geschützt, die in Abbildung 19 dargestellt ist.

²⁸ OPC Foundation, „OPC UA Security,“ [Online]. Verfügbar (02.12.2021) unter <https://opcfoundation.org/security>

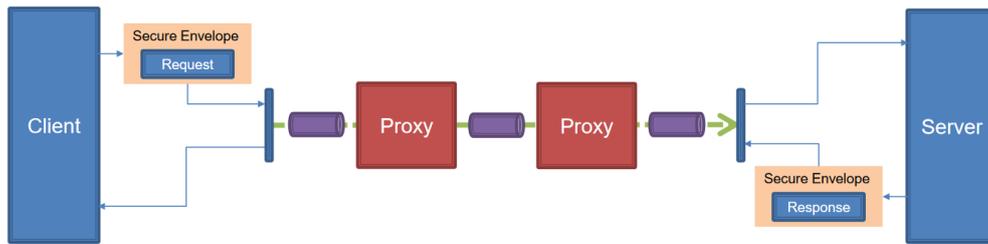


Abbildung 20: Ende-zu-Ende-Sicherheitskonzept der OPC-UA-Client-Server Architektur.²⁹

Client und Server handeln in diesem Fall gemeinsam einen sogenannten Secure Channel aus, eine Abstraktion, die einen Satz von kryptografischen Schlüsseln darstellt, welche die ausgetauschten Request/Response-Nachrichten zwischen den Teilnehmern schützen. Damit können Nachrichten auch über nicht vertrauenswürdige Netzwerke und über mehrere Hubs verschickt werden, ohne die Integrität des Inhalts zu gefährden.

Als eine weitere Sicherheitsschicht wurde die Kommunikation zwischen den Einheiten über ein VPN (Virtual Private Network) durchgeführt. VPNs sind private, abgesicherte Netzwerke (Zertifikat mit IP-Zuordnung), welche nur mit entsprechenden Zertifikaten und Sicherheitsschlüsseln zugänglich sind. Die Netzwerk-Absicherungen über openVPN bzw. im lokalen Netz in der CoSES Laborumgebung sind in Abbildung 20 dargestellt.

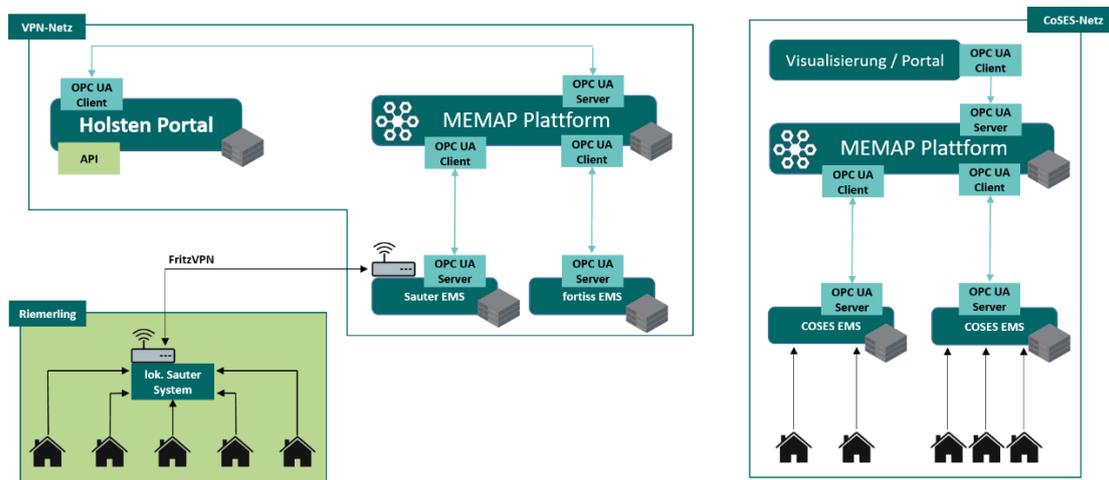


Abbildung 21: (Virtuell) Private Netzwerkinfrastruktur für die Funktionsdemonstration in den beiden Testgebieten und die Verbindung zum webbasierten bzw. lokalen Benutzerinterface.

²⁹ OPC Foundation, [Online], <https://opcfoundation.org/wp-content/uploads/2021/04/OPCUASecurityDeepDive-Dec2020-5.pdf>

(E2) Interaktion mit System für Benutzer / Benutzeroberflächen / Frontend

Als Ergebnis der Forschungs- und Entwicklungstätigkeit zur Benutzerinteraktion wird OpenVisu präsentiert. OpenVisu ist eine freie, quelloffene und Gewerke-übergreifende Gebäudemanagement Plattform, die es ermöglicht, jedes kleine bis mittelgroße Gebäude kostenfrei mit einem eigenen modernen SCADA-System auszustatten und Zugriff auf die von der Community entwickelten 3rd-Party-Module (u.a. MEMAP-Modul) zu gewähren.

Die Philosophie hinter OpenVisu ist es, Stakeholder wie MEMAP-Systembetreiber, einzelne MEMAP-Teilnehmer, genauso wie Bauherren, Systemintegratoren, Anlagen-Hersteller, Gebäude-Eigentümer / -betreiber und andere Enthusiasten durch eine Open-Source und herstellerunabhängige Gebäudemanagement-Plattform zusammenzubringen, von der die gesamte Gemeinschaft profitiert und gleichzeitig die Vision einer intelligenten Stadt verwirklicht wird.

OpenVisu ist eine reine Web- & Docker-basierte Steuerungs- und Überwachungsplattform für Gebäude, entwickelt in Flutter-Framework mit einem OPC-UA-Connector und einer integrierten Datenbank (InfluxDB) zur Echtzeit-Datenverarbeitung. OpenVisu empfängt die Sensor- und Aktor-Daten über das OPC-UA-Protokoll und bietet einen sicheren Zugang zu dezentralen und verteilten Gebäuden sowohl lokal als auch aus der Ferne. OpenVisu ist daher hersteller- und betriebssystemunabhängig und bietet ein vollständig responsives Design.

Traditionell kosten SCADA- und Gebäudemanagement-Software Hunderte bis Tausende von Euros, was es praktisch unmöglich macht, sie in kleine bis mittelgroße Gebäude wie Schulen, Büros, Einkaufszentren, öffentliche Gebäude usw. wirtschaftlich zu integrieren. Genau aber diese Art und Größe von Gebäuden sind essentiell für eine fleckendeckende Integration von Konzepten wie MEMAP.

Die Herausforderung bei der Bearbeitung der oben genannten Aufgabenstellung lag vor allem in der Berücksichtigung der aktuellen Marktanforderungen. Es hat sich recht schnell gezeigt, dass bei der Umsetzung von MEMAP eine deutlich längerfristige Perspektive angenommen werden muss. Demnach wurde hier der Fokus auf die Entwicklung eines Software-Grundbausteins gelegt, der (A) vor allem kleine bis mittel-große Gebäude digitalisiert / vernetzt und (B) die software-technische Integration von MEMAP-Konzept jederzeit ermöglicht.

A. Analyse

Folgende Schritte für die Erarbeitung der oben genannten Aufgabenstellung wurden unternommen:

- 1) Marktanalyse
- 2) Bedarfsanalyse der Anwender und
- 3) Analyse zum Stand der Technik

Die Erkenntnisse aus den internen Berichten (siehe „(A5) Interne Berichte zu Grundlagen und Rahmenbedingungen“) sowie die Analyse zum Stand der Technik mit Fokus auf die oben genannte Aufgabenstellung haben für die drei Schritte Folgendes ergeben:

i. Marktanalyse

Eine Identifizierung des Problems hat ergeben, dass es an einer Open Source, herstellerunabhängigen, Gewerke-übergreifenden Gebäudemanagement-Software / -Plattform für kleine bis mittlere Gebäude fehlt, die sehr einfach und semi-automatisiert SW-Module Dritter (u.a. MEMAP-Modul) technisch einbindet. Weiter setzen kleine bis mittlere Gebäude (Schulen, Einkaufszentren, öffentliche Gebäude), wegen des hohen Preises und gleichzeitig einer überdimensionierten, schwerfälligen Software, oft kein SCADA-System ein.

Die günstigsten SCADA/HMI-Optionen auf dem Markt:

- beginnen bei +500 € pro Lizenz oder jährlicher Abonnementgebühr,
- sind in der Anzahl der Datenpunkte und Benutzer begrenzt,

- erfordern eine neue Lizenz für jedes neue Projekt, jeden neuen Benutzer oder jedes neue Gerät, was die Kosten auf mehrere Tausend erhöht,
- verwenden veraltete Designs, einige der grundlegenden Funktionen, wie die Trend- und Ereignisverwaltung, fehlen
- erfordern oft eine umfangreiche Installation mit mehreren Plugins oder anderen Abhängigkeiten
- unterstützen nicht das industrielle OPC-UA-Protokoll
- sind herstellerabhängig und nicht Open-Source
- sind komplex, erfordern Programmierkenntnisse und sind nicht benutzerfreundlich
- besitzen keine Continuous Integration Prozesse

Darüberhinaus existieren keine Angebote zu Software-Modulen Dritter. Der Plattform-Gedanke (bekannt aus der Konsumenten-Welt) wird nicht gelebt.

ii. Bedarfsanalyse der Anwender

MEMAP-Systembetreiber und einzelne MEMAP-Teilnehmer haben in Gesprächen erste Vorstellungen an die "Benutzeroberfläche" formuliert (siehe auch Abschnitt E7.W). Nachfolgend werden jedoch Anforderungen an die gesamte SW-Lösung erläutert, die zum größten Teil auch aus der Praxiserfahrung stammen.

- Eine stabile Software mit moderner webbasierter Benutzeroberfläche ist unabdingbar.
- Eine Vielzahl von Widgets zur selbsterklärenden Visualisierung verschiedener Daten (iFrame, Diagramme, Tabellen, ...) sind gewünscht.
- Eine solide Benutzerverwaltung (einfacher & sicherer Zugang) sowie Zugriffsmöglichkeit für Drittanbieter zur Generierung von Mehrwerten sind relevant.
- Alarm & E-Mail-Benachrichtigungen + Zeitplaner sind Standard, jedoch essentielle Features.
- Einfache Konfiguration ohne Programmierkenntnisse ist erforderlich.
- Herstellerunabhängige, Open Source und modulare Software, zukunftssicher und nur für benötigte Module zahlbar ist ein Muss.
- Betriebssystemunabhängig (Windows, Mac, Linux, ...) und Responsive Design (Desktop, Tablet, Mobile) sind Standardanforderungen.
- Zentrale Steuerung & Überwachung Möglichkeit zur Übersicht über die verschiedenen Gebäude und deren Status (Wartung & Update) sind essentiell.
- Hohe Sicherheit, Back-up Funktion, einfache Installation & Upgrade, einfacher Import/Export der gesamten Projekte & einzelner Widgets (Wiederverwendbarkeit & Migration) sind nicht-funktionale Anforderungen.
- Support & Ticketing-System (Bugfixes & Feature-Anfragen), hilfreiche Dokumentation & Support sind wichtig.
- Integration von Fernsteuerungs- und Überwachungsfunktionen für alle Gebäude (VPN, Gateway, Sim-Karte, PRTG, ...) sind auch relevant.

Da es sich um eine Gebäudemanagement-Plattform handelt, werden hier Anforderungen von Drittanbieter, d.h. von externen SW-Entwickler und Datenanalysten erläutert.

- Einfacher Zugang zu Live- und historischen Daten ist an dieser Stelle zu erforschen und zu entwickeln – dabei handelt es sich um intelligente Mechanismen von Data Sharing.

- Alle erforderlichen Metadaten und Beziehungen (Kontext- und Netzwerkansicht) sind für eine Datenanalyse sehr wünschenswert.
- Die Daten im richtigen Format und in der richtigen Struktur zu haben ist ein Muss.
- Möglichkeit der Datenbereinigung und -verarbeitung (über Zusatzmodule) wird auch gewünscht.
- Einfache Verbindung & Kommunikation mit ML-Plattformen und anderen Diensten von Drittanbietern (z.B. Daten senden & Modelle empfangen) ist erforderlich.
- Eine Vielzahl von Widgets zur Visualisierung von Daten (Diagramme), Bewertungsmetriken (Wertanzeigen) und Webseiten von Drittanbietern (iFrames) sind wichtig.
- Möglichkeit zur Ausführung von KI-Modellen, z.B. auch von Python-Skripten ist essentiell.
- Benutzerverwaltung & sicherer Authentifizierungsprozess ist unabdingbar.
- Organisiertes, strukturiertes und sauberes Open-Source-Projekt in Git, mit klaren Richtlinien, detaillierte Dokumentationen für Entwickler und Beispielcodes ist für die Community der Open Source Welt essentiell – eine Testumgebung zur Qualitätskontrolle trägt weiter zu der Verbesserung der Qualität bei.
- Modulare Software, die leicht durch neue Module auf der Grundlage neuer Marktanforderungen und Technologien erweitert werden kann.
- Wünschenswert wäre auch eine Community zum Beitritt und zur Zusammenarbeit mit anderen Entwicklern.
- Unterstützung durch das Hauptentwicklungsteam bei Bedarf wird als sehr sinnvoll erachtet.
- Öffentliches Ticketing-System, um stark nachgefragte Funktionen schneller zu entwickeln, tragen zu schnellerer Umsetzung von Anforderungen der Anwender.
- Möglichkeit, sich mit Endkunden für anwendungsspezifische Modulentwicklungen und -anpassungen zu verbinden, soll das Wachstum der Plattform unterstützen.

iii. Analyse des Standes der Technik

Weitere Anforderungen an die Software-Lösung aus rein technischer Sicht sind Folgende:

- Docker Container & Web-basierte Software
- Cross-Plattform Entwicklung mit Google Flutter
- OPC-UA-Connector für eine sichere und herstellerunabhängige Kommunikation
- InfluxDB für die Echtzeit-Datenverarbeitung
- REST API für die Integration von SW-Modulen Dritter
- Soll Geräte wie Tablet, Mobile, PC, etc. unterstützen
- Verteiltes und skalierbares Deployment der Software

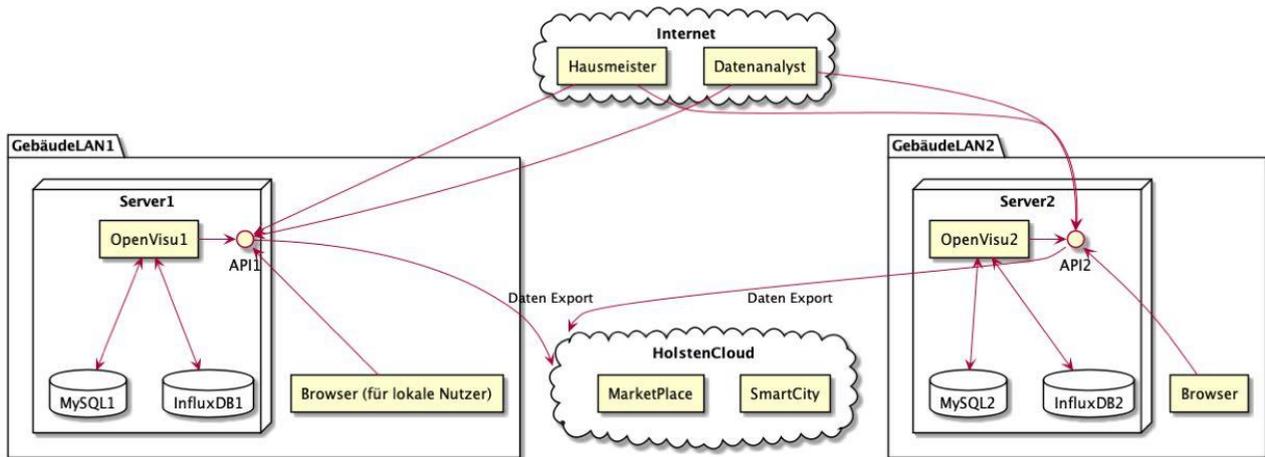


Abbildung 22: Beispiel einer verteilten Installation von OpenVisu in zwei Gebäuden und ein übergeordneter Zugriff auf die Dienste von OpenVisu aus der Cloud.

Des Weiteren ist zu beachten, dass vor ca. 5 Jahren eine Menge von IoT-Plattformen (Cloud-Anbieter) sehr erfolgreich in den Markt eingedrungen sind. Aus diesem Grund wurde recht schnell Abstand von der Weiterentwicklung der **spscontrol** App für IOS- und Android-Betriebssysteme genommen. Die **spscontrol** App wurde vor dem Beginn des Forschungsprojektes von Holsten Systems entwickelt und für die weitere Entwicklung innerhalb des Forschungsprojektes zur Verfügung gestellt. Die Weiterentwicklung der **spscontrol** App machte aber nach vorhanden Erkenntnissen keinen Sinn und wurde eingestellt. Die genannten Anforderungen wurden innerhalb der Entwicklung von OpenVisu umgesetzt.

B. Entwicklung der Software-Lösung “OpenVisu”

Die Softwarelösung wurde über mehrere Experimente und vorhergehende Proto-Typen entwickelt. Eine Demo-Version der entwickelten web-basierten Benutzeroberfläche wurde für weitere Benutzererfahrungen online zur Verfügung gestellt und kann unter folgendem Link getestet werden: <https://demo.openvisu.org/#/>.

Im Folgenden sind Screenshots eines beispielhaften Dashboards sowie der Visualisierung von Input-Daten dargestellt.

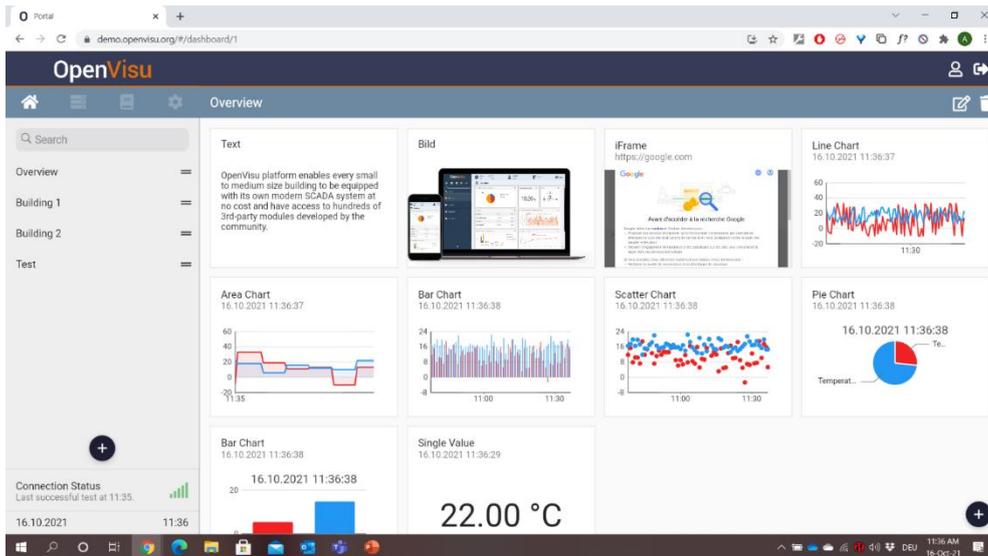


Abbildung 23: Beispiel eines Dashboards innerhalb OpenVisu

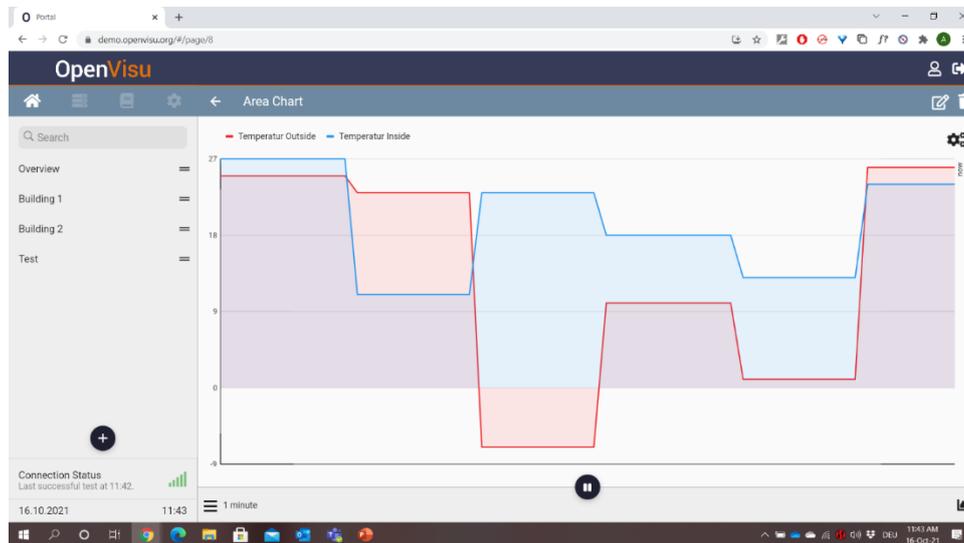


Abbildung 24: Beispiel eines Charts innerhalb OpenVisu

Weitere Informationen zu allen Funktionen finden sich darüber hinaus auf der Webseite zu OpenVisu unter <https://holsten.io/openvisu/> .

(E3) Feldtest

A. CoSES

i. Labor-Kontext & Ziele

Das Labor des Zentrums für gekoppelte intelligente Energiesysteme (Combined Smart Energy Systems – CoSES) der Technischen Universität München bildet in der finalen Ausbaustufe eine Nachbarschaft aus fünf Gebäuden inkl. verbindendem thermischen und elektrischen Netz energietechnisch nach.^{30,31} Bei den Untersuchungen und der Forschung rund um das Labor werden die Sektoren Wärme, Kälte, Strom, Mobilität und Kommunikation gekoppelt betrachtet (siehe auch Abbildung 24).

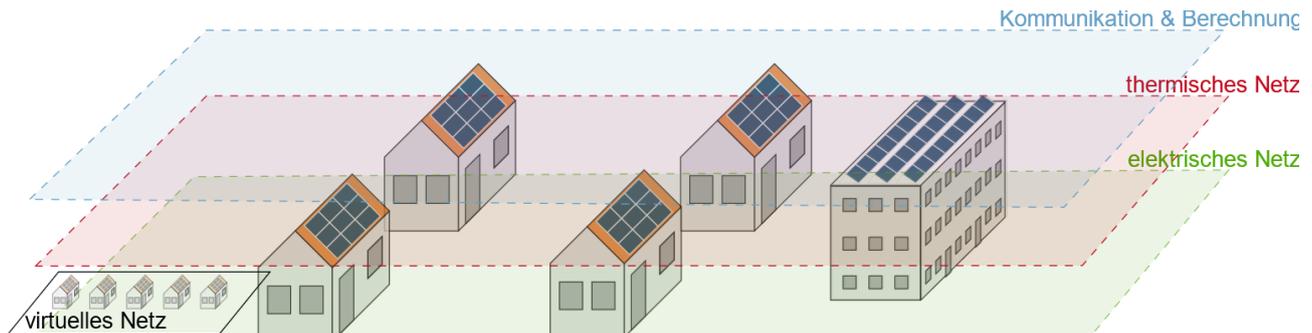


Abbildung 25: Grundidee des CoSES-Labors mit einer Nachbarschaft aus fünf Gebäuden und der 3-Schichten-Architektur

Durch die Beteiligung der Munich School of Engineering der TUM als akademischer Partner im Forschungsprojekt MEMAP, war es möglich diese einzigartige Laborumgebung für den Test der MEMAP-Plattform zu nutzen. Damit war das MEMAP-Projekt eines der ersten Projekte, welches ausführlichere Experimente in der noch nicht komplett in Betrieb genommenen Laborumgebung durchführte.

Dem MEMAP-Konsortium bot die CoSES-Laborumgebung die Möglichkeit energietechnische Anlagen über die Plattform realitätsnah zu steuern, ohne dabei in Alltagsprozesse eines realen Quartiers einzugreifen. Im Unterschied zum Test im Feld hat dies den Vorteil, dass im Labor auch kritische Systemzustände untersucht werden können, ohne Auswirkungen auf Nutzer oder Abläufe, wie Produktionsprozesse zu haben. Die MEMAP-Experimente in CoSES hatten folgende Zielsetzung:

- Untersuchung der Operabilität der MEMAP-Software mit realer Anlagentechnik
- Validierung des
 - Datenmodells
 - Kommunikationskonzeptes

Explizit nicht vorgesehen war die Nutzung der Laborexperimente, um Vorteile, Einsparungen oder Synergieeffekte des Verbundbetriebs mit MEMAP zu zeigen. Diese Effekte lassen sich anhand von Simulationen deutlich besser veranschaulichen, da mit Hilfe von Simulationen verschiedene

³⁰ Peric, V. S., Hamacher, T., Mohapatra, A., Christiange, F., Zinsmeister, D., Tzscheutschler, P., Wagner, U., Aigner, C., & Witzmann, R. (2020). CoSES laboratory for combined energy systems at TU Munich. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2020-Augus. <https://doi.org/10.1109/PESGM41954.2020.9281442>

³¹ Zinsmeister, D., Lickleder, T., et al. A prosumer-based sector-coupled district heating and cooling laboratory architecture. Submitted to Applied Energy Journal (13/12/2021).

Konstellationen schneller und mit weniger Aufwand untersucht und verglichen werden können (siehe auch Abschnitt E5.O).

ii. Basisfunktionalität der CoSES-Laborumgebung

Die CoSES-Laborumgebung bietet sowohl hardware-, als auch softwaretechnisch die Funktionalitäten der Feldebene energietechnischer Anlagen in Gebäuden mit den notwendigen Aktoren, Sensoren und den grundlegenden Komponentenregelungen.^{30,31}

Während der Projektlaufzeit von MEMAP war die Laborumgebung noch nicht vollständig in Betrieb genommen. Daher unterstützte das MEMAP-Team während der Projektlaufzeit auch den Aufbau und die Inbetriebnahme der Basis-Laborinfrastruktur, sowohl im Bereich Kommunikation und Software, als auch bei der Hardware (siehe beispielsweise Abbildung 25). Es musste die notwendige Laborhardware fertig aufgebaut, in Betrieb genommen und getestet werden. Die zugehörige Basis-Regelprinzipien der Feldebene mussten implementiert und zusammen mit der Hardware getestet werden.



Abbildung 26: Im Aufbau befindliche Hardware-Module der Wärmeseite des CoSES-Labors in der Werkstatt der MSE; das MEMAP-Team der TUM hat am Aufbau der Hardware mitgewirkt

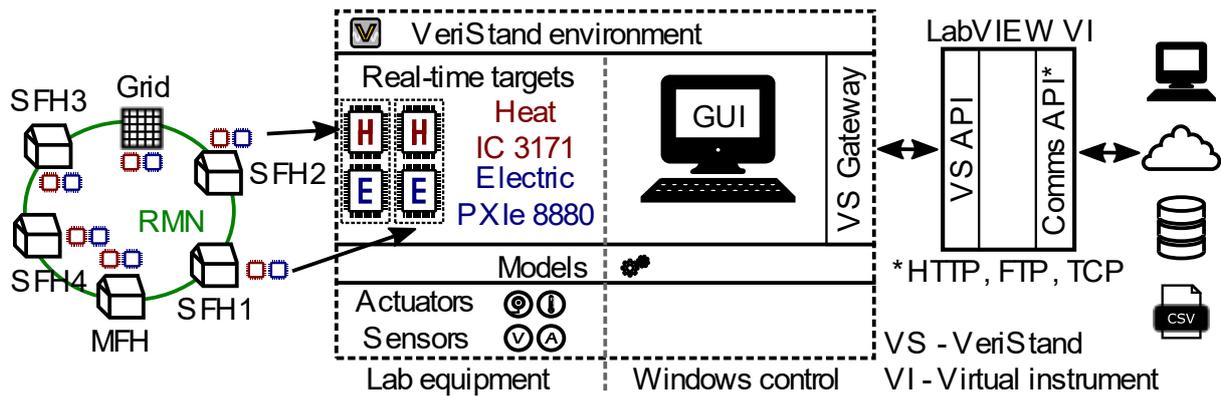


Abbildung 27: Basis-Kommunikationspfad der CoSES-Laborumgebung³²

Die untere Automationsebene bzw. die Feldebene bauen auf National Instruments Hardware und Software auf. Softwareseitig sind dies insbesondere die Umgebungen LabView und VeriStand. Abbildung 26 zeigt den Basis-Kommunikationspfad der CoSES-Laborumgebung. Die verschiedenen Gebäude sind mit Controllern für die Strom- und Wärmeseite ausgestattet auf denen die Signale der jeweiligen Hardware (Sensoren und Aktoren) aggregiert werden (Abbildung 26 links). Auf diesen Controllern im Feld laufen als Modelle unter der VeriStand-Softwareumgebung die Basis-Regelungsprogramme der Feld- und Automationsebene, wobei der Übergang hier fließend ist. Hier können projektspezifisch auch weitere Funktionen mit Hilfe von VeriStand-Modellen implementiert werden. Über das VeriStand-Gateway und die zugehörige VeriStand-API wird die Verbindung zu einem LabVIEW-VI hergestellt, welches die Ausführung des Versuchs überwacht und gleichzeitig die Schnittstelle zu Tool der Management-Ebene darstellt. Die MEMAP-Plattform ist in Abbildung 26 ganz rechts als externes Tool der Management-Ebene zu verorten

iii. Einbindung von MEMAP in die CoSES-Laborumgebung

Für die Durchführung der Experimente musste die MEMAP-Plattform in das Software- und Kommunikationsframework der Laborumgebung eingebunden werden. Dies war ein guter Test für die Praktikabilität des entwickelten Plattformkonzepts.

Abbildung 27 zeigt die Einbindung der MEMAP-Plattform in das CoSES-Laborumfeld anhand der Visualisierung der Datenströme zwischen den verschiedenen involvierten Entitäten. Diese Datenströme ergeben sich aus der Funktionsweise der MEMAP-Plattform als modellprädiktiver Regler (MPC, siehe Abschnitt E1.C). Die MEMAP-Plattform kommuniziert via OPC UA mit den lokalen EMS der beiden emulierten Gebäude (siehe auch Abschnitt E1.A). Gleichzeitig ist die Plattform an das Benutzerportal inkl. Datenbank im Backend angebunden (siehe Abschnitt (E2) Interaktion mit System für Benutzer / Benutzeroberflächen / Frontend). Die lokalen EMS kommunizieren mit den Erzeugungs-, Verbrauchs- und Speichermodulen. Diese Module subsumieren die Controller und die ausführende Hardware verschiedener Anlagen. Vorhersagen bilden die Rahmenbedingungen für die modellprädiktive Regelung der MEMAP-Plattform (siehe Abschnitt E1.C) und laufen ebenfalls auf den jeweiligen EMS auf. Von dort werden die Vorhersagen an die MEMAP-Plattform kommuniziert, wo sie weiterverarbeitet werden. Individuellen Verbrauchsprofile werden von den EMS an die Verbrauchsimulatoren in der Laborumgebung geeignet weitergegeben. Um die Experimente auch über das Level der Leistungsflüsse - auf dem die MEMAP-Plattform arbeitet - hinaus detaillierter wissenschaftlich untersuchen zu können, sind

³² Mayer, M., Mohapatra, A., & Peric, V. S. (2021). IoT Integration for Combined Energy Systems at the CoSES Laboratory. 195–200. <https://doi.org/10.1109/wf-iot51360.2021.9596000>

sowohl die lokalen EMS als auch die Anlagenmodule mit einer detaillierten wissenschaftlichen Datenaufzeichnung verbunden.

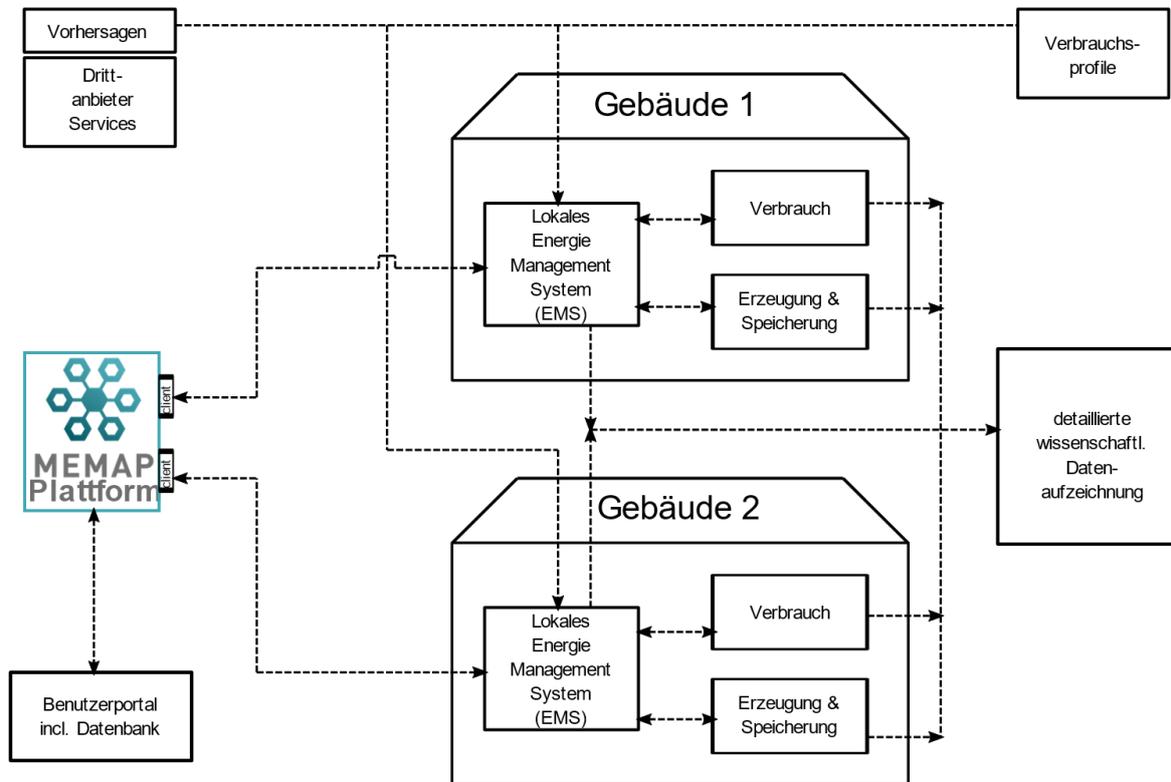


Abbildung 28: Einbindung der MEMAP-Plattform in das CoSES-Laborumfeld; Datenströme zwischen den verschiedenen Entitäten

Für die Umsetzung der oben beschriebenen und in Abbildung 27 dargestellten Einbindung, sind die lokalen Energie Management Systeme von zentraler Bedeutung. Über sie musste im Projekt an den Basis-Kommunikationspfad aus Abbildung 26 angeknüpft werden. In der konkreten Laborumsetzung müssen die EMS zusammengefasst folgende Aufgaben erfüllen:

- Kommunikationsschnittstellen zwischen der MEMAP-Plattform und dem CoSES-Basis-Kommunikationspfad
- Übersetzung zwischen der MEMAP -Plattform und der Regelung der Feldebene bzw. der Anlagentechnik selbst; von der Plattform vorgegebene Leistungs-Sollwerte sind entsprechend einer Logik in Stellgrößen für die Feldebene umzuwandeln
- Automatisiertes Beziehen der externen Vorhersagen und Weitergabe der für den jeweiligen Horizont relevanten Vorhersagen an die MEMAP-Plattform
- Einlesen der Lastkurven (Verbrauchsprofile) und Weitergabe von zeitspezifischen Sollwerten an die Lastemulatoren (z.B. Wärmesenken) des CoSES-Labors

Dies sind teils außergewöhnliche und laborspezifische Anforderungen an die EMS. Außerdem sollte die Beeinflussung der Experimentierergebnisse durch die Algorithmen von proprietären EMSs minimiert werden. Daher wurde ein möglichst grundlegendes EMS vom MEMAP-Team selbst programmiert. Abbildung 29 zeigt die verschiedenen dafür entwickelten Bestandteile der CoSES-EMS für die MEMAP-Experimente im Labor. Ebenfalls zu sehen ist, wie diese EMS in den Gesamtkommunikationspfad von der MEMAP-Plattform bis hin zur Feldebene und Anlagentechnik eingebunden ist. Die Einbindung deckt sich mit Abbildung 27. Nachfolgend wird auf die Teilaspekte

der EMS und damit der Einbindung der MEMAP-Plattform ins CoSES-Laborumfeld näher eingegangen.

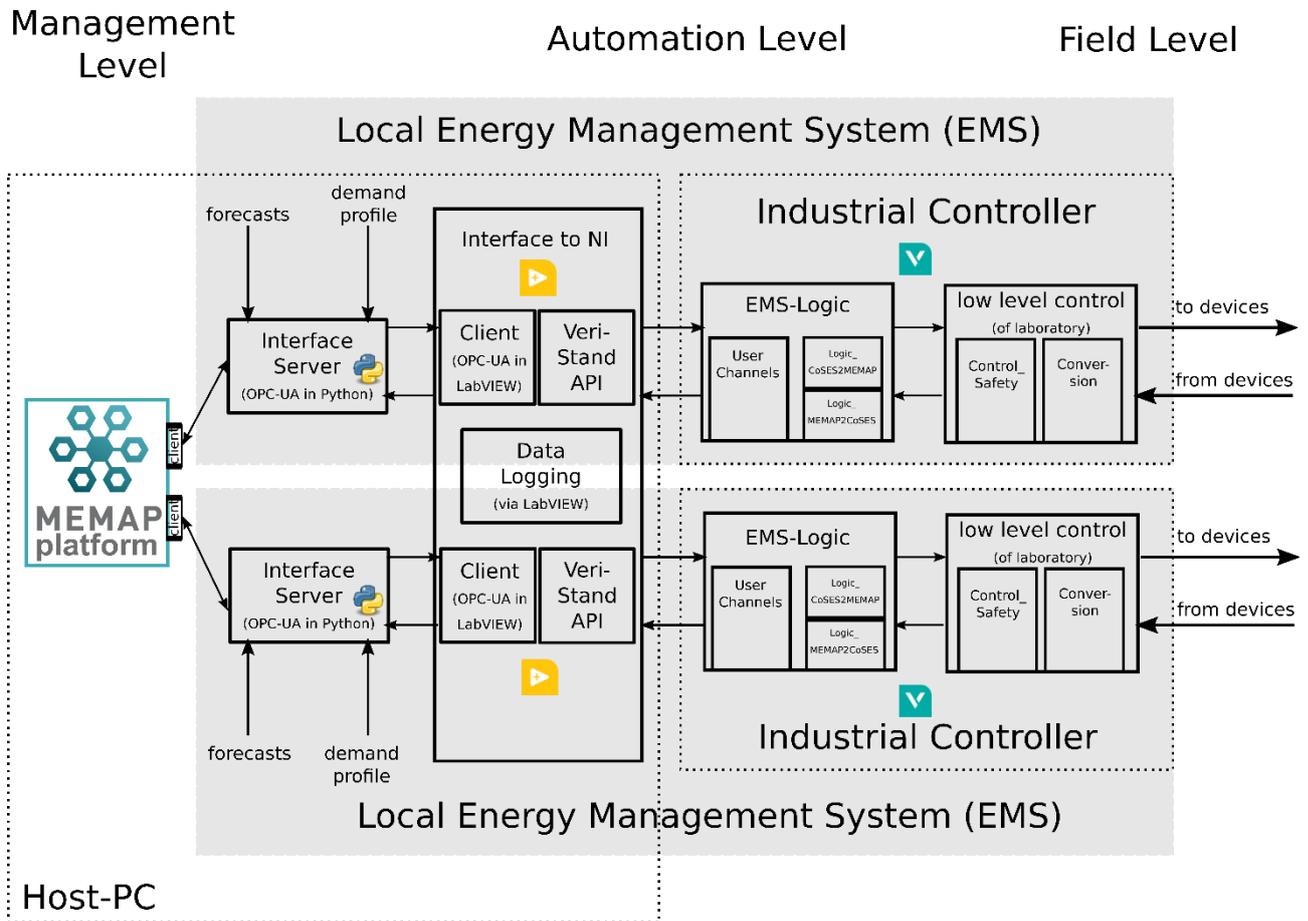


Abbildung 29: Bestandteile der CoSES-EMS für die MEMAP Experimente: Kommunikationspfad von der MEMAP-Plattform über die lokalen EMS hin zur Feldebene des CoSES-Labors

Da die EMSs für die Verknüpfung mit der MEMAP-Plattform einen OPC-UA-Server bereitstellen müssen, wurden für die Gebäude geeignete OPC-UA-Server in Python programmiert. Als Übergang zur NI-Welt wurde ein Interface in Form eines LabView-VIs erstellt, welches einerseits OPC-UA-Clients enthält, die es mit den Python-Servern verbinden, andererseits die VeriStand-API nutzt, um mit den Modellen zu kommunizieren, die auf den Industrie-Controllern (ICs) in VeriStand laufen. Das erste Modell in der Kommunikationskette auf den ICs ist die EMS-Logic, wo die eigentliche Umwandlung der Setpoints stattfindet. Diese werden dann an die low level controler weitergegeben, erneut umgewandelt, bevor sie dann nach einem Sicherheitscheck an die energietechnischen Anlagen gehen. Das Lesen von Sensordaten und die Umwandlung zu zusammengesetzten Werten (wie Energiemengen) läuft entsprechend in die entgegengesetzte Richtung ab.

Speziell programmierte Routinen in Python lesen die Lastprofile und Prognosen aus .csv-Dateien ein. Diese Routinen sorgen dafür, dass jeweils die Vorhersagen für den aktuell betreffenden Optimierungshorizont auf die OPC-UA-Server in Python geschrieben werden, von wo diese durch die MEMAP-Plattform ausgelesen und für die Optimierung verwendet werden. Die Schwierigkeit hierbei besteht darin, dass die Aktualisierung der Vorhersagen mit der Ablaufsequenz der Plattform aus Abschnitt E1.D synchronisiert sein muss. Weitere selbst programmierte Algorithmen in Python sorgen dafür, dass die Verbrauchsimulatoren im Labor (z.B. die Wärmesenken) zum richtigen Zeitpunkt im Experiment jeweils die korrekten Setpoints erhalten, um so die vorgegebenen Verbrauchsprofile zu emulieren.

Die Integration der MEMAP-Plattform erfolgte schrittweise. Dabei hat sich das MEMAP-Team der TUM zusammen von den beiden Seiten der Kommunikationskette aus (siehe Abbildung 26) zur Mitte hin vorgearbeitet. Einerseits musste der benötigte Teil der Laborumgebung fertig gestellt und in Betrieb genommen werden (Hardware & Software). Auf der anderen Seite befand sich der Optimierungskern und das zugehörige Datenmodell noch in der Entwicklung. Die OPC-UA-Server in Python mussten erstellt werden und auf das Datenmodell, sowie auf die Hardware und das vorgesehene Szenarien angepasst werden. Entsprechend musste auch das Interface zu National Instruments und die EMS-Logic immer wieder neu nachjustiert werden. Es wird deutlich, dass das MEMAP-Team der TUM als Bindeglied zwischen dem MEMAP-Projekt und der CoSES-Laborumgebung die Hardware und Software bei neuen Weiterentwicklungen auf beiden Seiten iterativ immer wieder anpassen musste, was einen hohen Arbeitsaufwand bedeutete.

Die Inbetriebnahme der Anbindung erfolgte entsprechend schrittweise. So wurden einerseits zunächst innerhalb der Laborumgebung der NI-Kontrollpfad ohne Plattform anhand von manuellen Vorgaben getestet. Auf der anderen Seite wurde die Kommunikation von der Plattform zum OPC-UA-Server in Python ohne Hardware-Anbindung getestet. Schließlich erfolgten überlappende Tests einerseits vom OPC-UA-Server in Python bis hin zur Hardware. Andererseits mit Kommunikationsstrecke von der Plattform über das gesamte NI-Framework bis kurz vor die Hardware, ohne dass die Setpoints jedoch an die Hardware gesendet wurden. Hierfür wurde ein Emulator programmiert, welcher die ideale Umsetzung der Setpoints an der Hardware nachbildete und entsprechende Systemreaktionen (SOCs) an die Plattform zurückschickte. Dies entspricht einer Simulation unter Annahme perfekter Umsetzung und unter Nutzung fast der gesamten Kommunikationskette. Letztendlich wurde dann der gesamte Kommunikationspfad von der Plattform bis zur Hardware in Betrieb genommen und getestet.

Bereits diese Einbindung der MEMAP-Plattform in das Laborumfeld und damit die Verbindung zu realer Anlagentechnik war sehr hilfreich für die Weiterentwicklung der Plattform, zumal der Kern zuvor lediglich im Rahmen des Planungstool (siehe Abschnitt (E5) Planungswerkzeug und Simulationen) für Simulationen verwendet worden war. So wurde z.B. deutlich, dass es einer koordinierten Ablaufsequenz für die Datenkommunikation zwischen Plattform und Anlagen bedarf, wie sie dann umgesetzt wurde und in Abschnitt E1.D beschrieben ist. Einige Bugs im Optimierungskern fielen bei der Inbetriebnahme des Plattform-Betriebs auf und wurden behoben. Außerdem wurde der Optimierungskern um das Modell für Standby-Verluste der Speicherklasse erweitert, da im Labor beobachtet wurde, welche signifikante Größenordnung die Stand-by-Verluste bei den verwendeten Wärmespeichern im Labor haben. Des Weiteren wurde im Rahmen der Programmierung des Python-OPC-UA-Servers und der Implementierung des Kommunikationspfads inkl. aller notwendigen Datenpunkte das Datenmodell (siehe Abschnitt E1.B) iterativ nachgebessert.

iv. Szenarien und Setup

Nachfolgend wird das umfangreichste Szenario und Setup präsentiert, welches für den Test der MEMAP-Plattform in der CoSES-Laborumgebung betrachtet wurde. Die Wahl des Szenarios wurde maßgeblich beeinflusst durch die zur Verfügung stehende Ausbaustufe der Laborumgebung. So waren beispielsweise die Wärmenetzemulatoren noch nicht in Betrieb genommen, weshalb keine Möglichkeit bestand ein Wärmenetz hardwareseitig nachzubilden, was ein Szenario mit Wärmenetz ausschloss. Abbildung 29 visualisiert das ausgewählte Szenario.

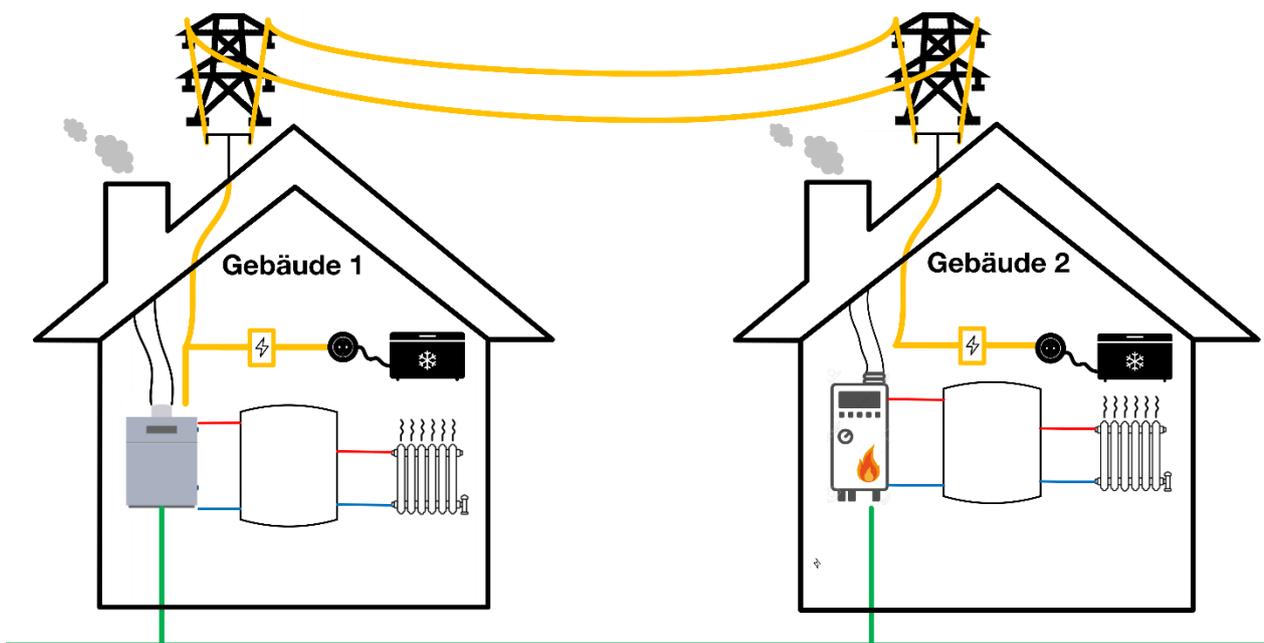


Abbildung 30: Veranschaulichung des Szenarios für die Tests der MEMAP-Plattform in CoSES

Wie zu sehen ist, wird der Energieverbund von zwei Gebäuden betrachtet. Beide Gebäude verfügen über jeweils einen 800 Liter -Wärmespeicher und eine Wärmesenke. Gebäude 1 verfügt zudem über ein BHKW mit 2 kW elektrischer und 5 kW thermischer Nenn-Leistung. Gebäude 2 hat stattdessen einen Brennwärmtauscher mit 21 kW Nennleistung. Beide Erzeuger sind erdgasgespeist. Die nachfolgenden Tabellen listen die Modellbezeichnungen der verwendeten Hardware auf und die genauen Parameter, welche für die Tests an die MEMAP-Plattform übergeben wurden. Auf der elektrischen Seite wird angenommen, dass die beiden Gebäude durch ein elektrisches Netz verbunden sind, welches die Nutzung des BHKW-Stroms zusätzlich zum öffentlichen Strom durch die emulierte Nachfrage beider Gebäude ermöglicht. Die Laborumgebung wäre theoretisch in der Lage auch die entsprechenden elektrischen Stromflüsse physikalisch zu erzeugen. Angesichts der betrachteten Zeitskalen und der Tatsache, dass die MEMAP-Plattform lediglich auf der Leistungs- bzw. Energieebene agiert, sind die elektrischen Dynamiken jedoch zu vernachlässigen. Daher wurde hier eine perfekte Umsetzung der elektrischen Setpoints angenommen und lediglich die Sollwerte aufgezeichnet. Beim BHKW wird selbstverständlich die reale Stromproduktion aufgezeichnet.

Als Parameter für die Optimierung der MEMAP-Plattform wird eine Zeitschrittweite von 15 min hinterlegt bei einer Horizontweite von 12 Schritten (3 Stunden). Das Experiment lief über eine Zeitspanne von 12 Stunden Realzeit in Echtzeit. Die Messergebnisse wurden mit einer Auflösung von 10 Sekunden aufgezeichnet. Als Rahmenbedingungen für das beschriebene Szenario der Labortests wurden perfekte Vorhersagen für die Verbräuche und Preise angenommen. Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigen die entsprechenden zeitlichen Verläufe der verwendeten Last- und Preisprofile. Die Preisprofile sind manuell vorgegeben und zur Demonstration verschiedener Effekte gewählt (siehe Auswertung im nachfolgenden Abschnitt). Stromeinkaufs- und Verkaufspreise zeigen jeweils den gleichen Trend. Dies ahmt die Situationen nach, dass entweder viel Strom aktuell im öffentlichen Netz verfügbar ist (niedriger Einkaufspreis, niedriger Verkaufserlös) oder wenig (hoher Einkaufspreis, hoher Verkaufserlös). Die Lastprofile ergeben sich aus detaillierten Simulationen zweier Gebäude über ein Jahr. Für die Simulationen wurde die Modelica-basierte Umgebung SimulationX verwendet, zusammen mit der GreenCity-Bibliothek. Die nachfolgende Tabelle zeigt die wichtigsten Parameter, welche für die Gebäudesimulationen zur Ermittlung der Lastkurven verwendet wurden.

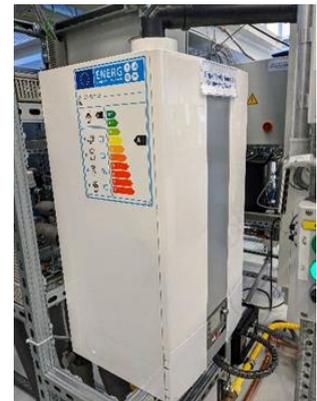
BHKW Geb.1 (RMB/ENERGIE GmbH neoTower 2.0)

Parameter	Wert
Effizienz Wärme (H_s)	65 %
Effizienz Strom	25 %
Min. Leistung	4 kW _{th} , 1.54 kW _{el}
Max. Leistung	5 kW _{th} , 1.92 kW _{el}



Kessel Geb. 2 (Wolf GmbH CGB-2-20)

Parameter	Wert
Effizienz Wärme (H_s)	88 %
Min. Leistung	8 kW _{th}
Max. Leistung	19 kW _{th}



Wärmespeicher Geb. 1 und Geb. 2 (Wolf GmbH SPU-2-800)

Parameter	Wert
Speicherkapazität	62,94 kWh (773,6 l)
Effizienz Be- und Entladen	97 %
Max. Be- und Entladeleistung	22 kW _{th}
Speicherverluste stand-by	0,021 SOC/h (ca. 0,66 kW)
Initialer SOC	64,1 % (SF1) und 59,2% (SF2)
Min. SOC am Ende des Horizonts	50%



Tabelle 13: Parameter für die simulative Ermittlung von Lastprofilen für die Laborexperimente mit MEMAP in CoSES

Parameter	Gebäude 1	Gebäude 2
Art des Gebäudes	Wohngebäude EnEV 2014	Wohngebäude EnEV 2014
Stockwerke	2	2
Personen	5	18
Beheizte Fläche	250 m ²	800 m ²
Heizsystem	Radiatoren (60°C/45°C)	Radiatoren (60°C/45°C)
Soll-Raumtemperatur	21°C	21°C
Außentemperaturen	kalter Winter (-5,3°C bis 3,9°C)	

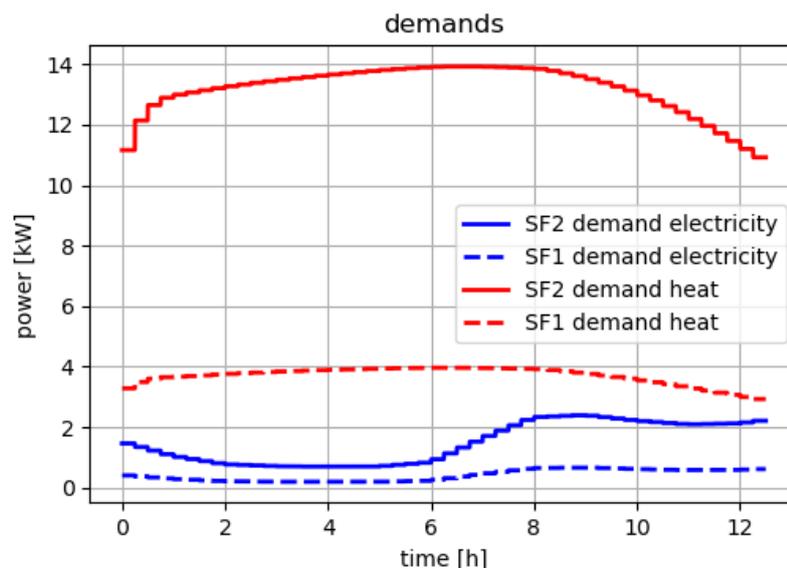


Abbildung 31: Lastgänge der thermischen und elektrischen Verbräuche als Randbedingungen der Labortests

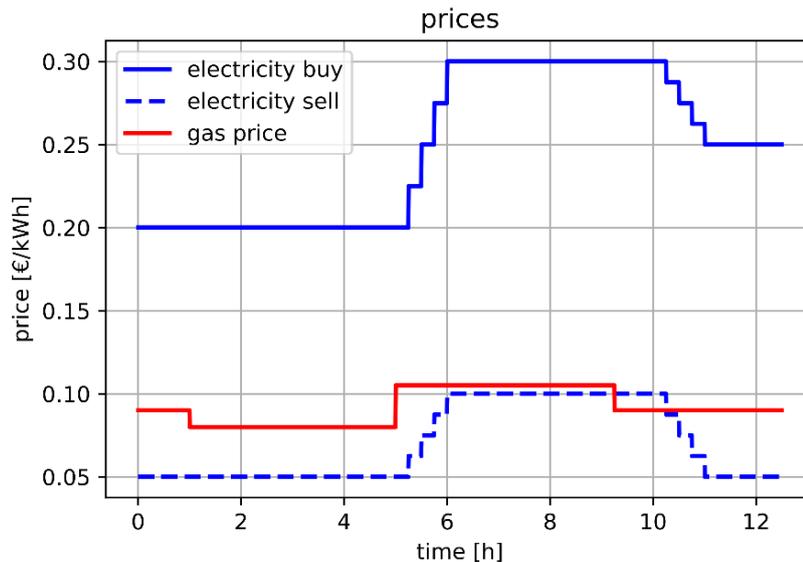


Abbildung 32: Zeitliche Verläufe der Preisprofile als Randbedingungen der Labortests

Der Grund für die Annahme perfekter und starrer Lastprognosen ist, dass - wie oben beschrieben - die Erstellung von Vorhersagen kein Teil des Projektes war und hier immer angenommen wurde, dass diese von Drittanbietern kommen. Um das Setup möglichst einfach zu halten, wurden statt Drittanbietervorhersagen Lastkurven verwendet, die dann auch als Vorhersagen dienten. Dies ist v.a. vor dem Hintergrund zu rechtfertigen, dass das Ziel der Laborexperimente die Validierung des Daten- und Kommunikationskonzeptes sowie der Interoperabilität mit realen Anlagen war. Des Weiteren erfolgten keine Anpassungen der Vorhersagen bei Lastabweichungen. Das bedeutet, selbst wenn der Verbrauch zu einem Zeitpunkt durch die Anlagen nicht gedeckt worden ist oder aber übererfüllt wurde (beispielsweise aufgrund von Anlagendynamiken), erfolgte keine Anpassung der Lastprognosen für die Zukunft, sondern es wurde weiter das starre Lastprofil als Vorhersage abgefahren. Hierfür bräuchte es ein dynamisches Modell welches das Verhalten der Lasten (z.B. Wohngebäude) und ihre Reaktion auf Unter- oder Überversorgung beschreibt. Im Labor sind jedoch keine realen Lasten vorhanden, sondern diese werden emuliert - z.B. mit Wärmesenken, welche nach Vorgabe von außen dem Heizsystem als Last Wärme entziehen³³. Über einen Hardware-in-the-loop-Ansatz³⁴ kann eine Co-Simulation mit detaillierten Modellen eingebunden werden, welche die Veränderungen des Lastgangs und damit der Prognosen abbilden. Diese Modelle befanden sich zum Zeitpunkt der Labortests von MEMAP jedoch noch in der Entwicklung durch das MSE CoSES-Team und standen daher noch nicht zur Verfügung. Eine Schwierigkeit ist dabei außerdem, dass für jeden Zeitschritt des MEMAP-Optimierers eine Co-Simulation mit den aktuellen Ausgangsbedingungen der Hardware (inkl. SOC, Temperaturen usw.) automatisiert initialisiert werden muss und anschließend über einen längeren Zeitraum simuliert werden muss, um die angepassten Lastprognosen zu erhalten. Dies ist eine der Themenstellungen, welche seitens der TUM auch im Anschluss des Projektes weiterverfolgt werden.

³³ Zinsmeister, D., Lickleder, T., Addinger, S., & Christange, F. (n.d.). A prosumer-based sector-coupled district heating and cooling laboratory architecture. Submitted to Applied Energy Journal (13/12/2021).

³⁴ El-Baz, W., Mayerhofer, L., Tzscheuschler, P., & Wagner, U. (2018). Hardware in the Loop Real-Time Simulation for Heating Systems: Model Validation and Dynamics Analysis. *Energies*, 11(11), 3159. <https://doi.org/10.3390/en11113159>

Für die Zielsetzung der Validierung des Datenmodells und des Kommunikationskonzeptes im Zusammenspiel mit realen Anlagen ist das beschriebene Setup auch mit starren und perfekten Prognosen geeignet. Um die Interoperabilität mit der realen Anlagentechnik beurteilen zu können, wurden zu Vergleichszwecken Simulationen unter denselben – oben beschriebenen Rahmenbedingungen durchgeführt. Bei der Simulation wird angenommen, dass die in der MEMAP-Plattform hinterlegten Modelle die Realität perfekt beschreiben und gleichzeitig die Anlagen die von MEMAP ermittelten Setpoints perfekt umsetzen. Daraus folgt, dass der intern bei der Optimierung ermittelte Wert für die Speicherladezustände (SOC) im jeweils nächsten Schritt tatsächlich auch eintritt. Daher wurden für die Simulation diese Werte jeweils zeitverzögert als Feedback wieder in die Plattform zurückgespielt.

v. Experimente und Datenauswertung

Die Ergebnisse der Laborexperimente werden in diesem Berichtsabschnitt diskutiert und sind in Form von Diagrammen im Anschluss an die Diskussion zu finden. Die Darstellungsform folgt einem immer ähnlichen Mustern, wie beispielsweise Abbildung 32 es zeigt. Die Ladezustände (SOCs) der beiden involvierten thermischen Speicher und der Preise werden anhand von Verlaufsdiagrammen über der Zeit dargestellt. Für die thermischen bzw. elektrischen Leistungen über der Zeit werden teils gestapelte Diagramme verwendet. Dabei werden positive und negative Leistungen gruppiert und separat entlang der positiven bzw. der negativen Achse gestapelt. Für die Speicherbe- und Entladung bzw. den Netzbezug oder Einspeisung werden daher jeweils die gleichen Farben verwendet. Aufgetragen auf der positiven Achse bedeutet die jeweilige Farbe Bezug aus dem Netz bzw. aus dem Speicher zur Deckung des Verbrauchs im betreffenden Haus. Entsprechend bedeutet die Auftragung auf der negativen Achse die Einspeisung ins Netz oder in den Speicher. Auf der elektrischen Seite wird zwischen dem lokalen Microgrid und dem öffentlichen Netz unterschieden. Über das Microgrid wird elektrische Energie im Verbund ausgetauscht, während nur bei einem Gesamtüberschuss bzw. -defizit an das öffentliche Netz verkauft oder daraus bezogen wird. Das Wärmenetz ist ein lokales Inselnetz (siehe auch Modellierung in Abschnitt E1.C). Da im betrachteten Szenario kein Wärmenetz vorhanden ist (siehe Szenariobeschreibung im vorangehenden Abschnitt), sind die zugehörigen Leistungen selbstverständlich null.

Simulationsergebnisse

Abbildung 32 zeigt die Ergebnisse der Simulation des oben beschriebenen CoSES-Szenarios unter Annahme perfekter Vorhersagen, Modelle und perfekter Umsetzung der Setpoints durch die Anlagen. Die Simulationsergebnisse lassen erkennen, dass das BHKW in Haus 1 überwiegend taktend genutzt wird. Die ist auf die engen Betriebsgrenzen der Modulation zwischen 4 kW_{th} und 5 kW_{th} zurückzuführen. Der Gaskessel in Haus 2 hat einen breiteren Modulationsbereich und kann dem thermischen Bedarf entsprechend gefahren werden. Der Wärmebedarf von Haus 2 wird zu Beginn für gewisse Zeit komplett aus dem Wärmespeicher gedeckt. Ab einem gewissen Zeitpunkt sorgt die Einschränkung des minimal zulässigen SOC von 0,5 am Ende des Optimierungshorizont dafür, dass der Speicher nicht weiter entladen werden kann und daher der Gaskessel Wärme produzieren muss. Es wäre zu erwarten, dass dies bei Haus 1 ähnlich stattfindet, allerdings spielen hier weitere Faktoren eine Rolle. Haus 1 ist mit einem BHKW ausgestattet, welches das koppelnde Element zwischen Strom- und Wärmesektor in diesem Szenario ist. Da die beiden Gebäude lediglich über das Stromnetz verbunden sind, ist das BHKW in Haus 1 zugleich das koppelnde Element zwischen den beiden Gebäuden. Das BHKW in Haus 1 wird also zu Beginn trotz des ausreichend geladenen Speichers betrieben, um Strom zu erzeugen, welcher zugleich den Strombedarf von Haus 1 und über das Microgrid auch den von Haus 2 deckt. Hier wird die in MEMAP angestrebte Synergienutzung über die Energiesektoren und die Gebäudegrenzen hinweg deutlich. Mit dem sprunghaften Anstieg des Gaspreises bei Stunde 5.0 wird es trotz des ebenfalls langsam ansteigenden Strombezugspreises für eine gewisse Zeit unrentabel das BHKW zur Deckung des Strombedarfs beider Gebäude zu betreiben. Daher wird für 45 Minuten der gesamte Strombedarf des Verbunds aus dem öffentlichen Netz gedeckt, bis die Stromeinkauf- und Verkaufspreise eine kritische Schwelle überschreiten, ab der es trotz der hohen Gaspreise sinnvoll ist, das BHKW zur Deckung der elektrischen Nachfrage zu betreiben. Diese Art der Abwägungen geschieht durch die

Optimierung in der MEMAP-Plattform automatisiert. Der Effekt der vorausschauenden Optimierung ist auch anhand der proaktiven Be- und Entladung des thermischen Speichers in Haus 2 zu erkennen. Da zu Stunde 5.0 der Gaspreis sprunghaft ansteigt, wird die Kesselleistung vorausschauend bereits ab kurz vor Stunde 2.5 hochgefahren, um den Speicher vorzuladen. Als für den Optimierer absehbar ist, dass der Gaspreis zu Stunde 9.25 wieder sinkt, wird der Speicher zur Deckung des Wärmebedarfs entladen und der Gaskessel entsprechend runterreguliert. Somit kann der günstigere Gaspreis zur Deckung des Wärmebedarfs in Haus 2 genutzt werden. Der Speicher wird jedoch nur so stark vorgeladen, wie es die Wirtschaftlichkeit angesichts möglicher Speicherverluste sinnvoll erscheinen lässt. Außerdem kann das proaktive Verhalten erst dann beginnen, wenn Änderungen in den Rahmenbedingungen innerhalb des Optimierungshorizonts erkannt werden. Dementsprechend würden längere Prognose- bzw. Optimierungshorizonte das strategisch vorausschauende Verhalten natürlich noch weiter verbessern, da früher proaktiv agiert werden könnte. Dann würden die Speicher ggf. auch stärker vorgeladen werden. Sobald der Gaspreis ab Stunde 9.25 wieder günstiger ist, wird das BHKW wieder auf maximaler Leistung betrieben, um einen möglichst großen Anteil des Strombedarfs beider Gebäude aus Eigenversorgung im Verbund zu decken.

Messwerte

Abbildung 33 zeigt die Messergebnisse des oben beschriebenen MEMAP-Experiments im CoSES-Labor. Wie in der Beschreibung des Setups und Szenarios erklärt (siehe vorangehender Abschnitt), wurden die elektrischen Leistungen des Netzbezugs bzw. der Netzeinspeisung nicht physikalisch umgesetzt, sondern lediglich die Setpoints mitgeschrieben. Wie im oberen rechten Teil von Abbildung 33 zu erkennen ist, wird das vorgegebene Wärmelastprofil in Gebäude 2 nicht eingehalten. Die gestrichelte Linie zeigt das Lastprofil welches MEMAP als Vorhersage erhält. Dasselbe Lastprofil wird auch an die Wärmesenke im CoSES-Labor geschickt, welche diese Wärmelast dann abfahren sollte. Die durchgezogene schwarze Linie ist die tatsächlich durch die Wärmesenke abgeführte Wärme, welche von der Vorgabe bei Haus 2 stark abweicht.

Um die Ursachen und die Wirkungskette hierfür zu analysieren, ist es notwendig sich die auf technischer Ebene relevanten Größen anzuschauen. Abbildung 34 zeigt die Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmesenken zur Emulation des Heizsystems, deren Volumenströme, die Temperaturen der Wärmespeicher auf verschiedenen Höhen der Tanks und die zugehörigen Ladezustände (SOCs) der Wärmespeicher. Beide Speicher sind baugleich und starten mit sehr ähnlichen SOC von ca. 60%. Das bedeutet, dass beide Speicher in etwa dieselbe Energiemenge beinhalten. Die Kurven der Speichertemperaturen auf verschiedenen Höhen im Tank zeigen jedoch, dass bei dem Speicher in Haus 1 eine Temperaturschichtung vorliegt, während der Speicher in Haus 2 stark durchmischt ist. Das hat mit dem hydraulischen Anschluss der Speicher zu tun und wurde absichtlich so gewählt, um beide Konfigurationen (Schichtung, Durchmischung) zu zeigen. Mit der starken Durchmischung des Speichers in Haus 2 geht einher, dass die Speichertemperaturen an den Entnahmepunkten für die Deckung des Wärmebedarfs entsprechend niedriger sind als dies bei einem durchmischten Speicher mit selbem SOC der Fall wäre. So liegt die Maximaltemperatur in Speicher 2 zu Beginn bei ca. 63°C, während diese in Speicher 1 bei ca. 78°C liegt. Es wird angenommen, dass das Heizsystem, welches die Wärmesenke emulieren soll auf die Systemtemperaturen 60°C/45°C ausgelegt ist. Entsprechend sind dies die Sollwerte für die Vor- bzw. Rücklauftemperaturen der Wärmesenke im CoSES-Labor. In Haus 1 können diese Vorgaben eingehalten werden, da der Speicher höhere Temperaturen als 60°C für den Vorlauf zur Verfügung stellt, die entsprechend durch Rücklaufbeimischung reduziert werden können. Bei Haus 2 hingegen liefert der Speicher schon kurz nach Beginn des Experiments aufgrund der Durchmischung keine Temperaturen mehr, die höher sind als 60°C. Dementsprechend können die vorgegebenen Systemtemperaturniveaus nicht mehr eingehalten werden, was sich in Abbildung 34 durch Abweichung der durchgezogenen roten Linie von der gestrichelten roten Linie zeigt. Der Setpoint für die Rücklauftemperatur wird durch die interne Regelung des CoSES-Labors so angepasst, dass bei Nichteinhaltung der Vorlauftemperatur zumindest eine Spreizung von mind. 10°C zwischen Vor- und Rücklauf erhalten bleiben soll. Entsprechend verschiebt sich die Rücklauftemperatur mit der Vorlauftemperatur. Der Setpoint für den Durchfluss durch die Wärmesenke (das emulierte

Heizsystem) wird ebenfalls durch die interne Regelung vorgegeben. Dieser wird so eingestellt, dass bei der gegebenen Spreizung dem System die vorgegebene Wärmeleistung (Lastprofil) entzogen wird. Im unteren Teil von Abbildung 34 ist zu sehen, dass die Volumenstromvorgaben in Haus 1 eingehalten werden, während in Haus 2 der Setpoint für den Volumenstrom fast durchgehend über den realen Durchflüssen liegt. Das liegt daran, dass die verwendete Pumpe nicht für derart hohe Volumenströme geeignet ist, da es sich dabei um ungewöhnliche Betriebszustände handelt. Der Volumenstrom und die Temperaturdifferenz (Spreizung) gehen gemäß einer Grundformel der Wärmetechnik multiplikativ in die entzogene Wärmeleistung ein. Daher führt das Untererfüllen des Volumenstrom-Setpoints in diesem Fall zum Untererfüllen der Leistungsvorgabe. Ursprüngliche Ursache ist allerdings die starke Durchmischung des Wärmespeichers in Haus 2 welche dazu führt, dass zu niedrige Temperaturen für das Heizsystem zur Verfügung gestellt werden. Über die beschriebene Wirkungskette sind damit die Lastabweichung in Abbildung 33 und die technischen Daten in Abbildung 34 gekoppelt.

Das Problem von zu niedrigen Temperaturen in Wärmespeichern für die Versorgung der Auslegungstemperaturen des Heizsystems ist auf der Betrachtungsebene von MEMAP, welche lediglich Leistungen berücksichtigt eigentlich nicht zu erfassen. Die detaillierte wissenschaftliche Datenaufzeichnung im Laborversuch lässt es aber zu derartige Phänomene ebenfalls zu betrachten. Im Rahmen des Projektes wurde eine Lösung gefunden, wie dieses Problem auch innerhalb des MEMAP Frameworks teilweise berücksichtigt werden kann: ein Mindest-Speicherladezustand. Dieser wurde daher nachträglich in den Optimierungskern eingebaut (siehe Abschnitt E1.C). Allerdings reduziert diese Einschränkung des Speicheroperationsbereichs die Flexibilität im Gesamtsystem und damit die nutzbaren Synergieeffekte. Zudem kann es in Abhängigkeit der Schichtung im Speicher trotzdem zu Temperaturproblemen kommen. Daher wird deutlich, dass die reine Betrachtung der Leistungsflüsse auf der Management-Ebene von MEMAP allein nicht ausreichend ist. Für den tatsächlichen Betrieb mit realer Anlagentechnik im Quartier sind die technischen Größen von starker Relevanz. Im thermischen Sektor sind dies insbesondere Temperaturen, Volumenströme und Drücke, während es im elektrischen System neben Spannung und Stromstärke beispielsweise die Frequenz oder die Phasenverschiebung sind. Das Energiemanagement (MEMAP) müsste also bei der Optimierung bereits technische Restriktionen berücksichtigen, was aber zu sehr detaillierten Modellen mit hohem Parametrisierungsaufwand führen würde, die hochgradig nichtlinear sind und sich daher kaum für eine Optimierung eignen. Dies widerspricht der Anforderung von Simplizität, Erweiterbarkeit, Übertragbarkeit und Eignung für Echtzeitbetrieb. Es zeigt sich ein Zielkonflikt im Zusammenspiel von Management und Regelung bzw. Umsetzung auf technischer Ebene, welcher ein Key-Learning aus dem Projekt ist, der an verschiedenen Stellen auftaucht (z.B. auch bei den Untersuchungen zur Infrastruktur für den Wärmetausch im Quartier in Abschnitt E3.1).

Die Ergebnisse des Experiments in Abbildung 33 zeigen auch eine Stärke des MEMAP-Ansatzes. Die Abweichung der realen Wärmelast in Haus 2 von der Soll-Wärmelast kann als ungenaue Vorhersage interpretiert werden. Während MEMAP die Soll-Wärmelast als Prognose erhält, weicht die tatsächliche Wärmelast davon ab. Wie die Messergebnisse zeigen, wird die tatsächliche Wärmelast trotzdem gut gedeckt. Dies ist zum einen auf den Speicher als Flexibilität im System zurückzuführen. Zum anderen ist dies auch ein Vorteil des modellprädiktiven Regelungsansatzes. In jedem Zeitschritt wird der real gemessene Systemzustand (SOCs) als Ausgangspunkt für die Optimierung über den beweglichen Horizont genutzt und nur die ersten Setpoints der Optimierungslösung werden für den nächsten Zeitschritt umgesetzt (siehe auch modellprädiktive Regelung in Abschnitt E1.C). Dadurch ist die Regelung robust gegenüber kleineren Ungenauigkeiten in den Vorhersagen.

Simulation vs. Experiment

Abbildung 35 vergleicht für Haus 1 die Simulationsergebnisse (rechts) mit den Setpoints, welche MEMAP im Live-Betrieb für die Anlagen berechnet hat (mitte) und den Messwerten, welche

tatsächlich durch die Anlagentechnik umgesetzt wurden (links). Wie zu sehen ist, gibt es eine gute Übereinstimmung zwischen diesen Daten. Während in der Simulation innerhalb der ersten 2.5 Stunden zwei Phasen der Speicherentladung zur Wärmebedarfsdeckung vorgesehen sind, gibt es im Experiment dafür eine etwas längere Entladephase um Stunde 2.5 herum. Um Stunde 6 herum fordert MEMAP im Experiment einen stärkeren Betrieb des BHKWs, als dies in der Simulation der Fall ist. Derartige Abweichungen zwischen den Setpoints im Experiment und der Simulation sind zu erklären durch kleinere Abweichungen bei der Umsetzung der Setpoints, welche sich über die Zeit aufsummieren und zu einem insgesamt veränderten Systemzustand führen. Da MEMAP als modellprädiktiver Regler dynamisch auf diesen Systemzustand reagiert, führt dies zu Abweichungen in den Setpoints des Experiments gegenüber der Simulation. Da diese Abweichungen eher gering sind, ist davon auszugehen, dass die Setpoints im Experiment relativ gut umgesetzt werden. Dies zeigt auch der Vergleich der mittleren und der linken Spalte in Abbildung 35. Lediglich gegen Ende des Betrachtungszeitraums um Stunde 9 herum wird das BHKW trotz Anforderung nicht mehr gestartet. Hier gab es wohl ein technisches Problem.

Umsetzung der Setpoints durch die Anlagentechnik

Abbildung 36 bis Abbildung 38 zeigen im Vergleich die zeitlichen Verläufe der MEMAP-Setpoints mit den realen Leistungsmesswerten im Experiment. Für das BHKW und den Gaskessel sind zusätzlich Ausschnitte vergrößert, welche das An- und Abfahrverhalten der Anlagen detaillierter zeigen.

Das BHKW wird mit einem Sollwert für die elektrische Leistung angesteuert, die thermische Leistung ergibt sich entsprechend der Effizienzen. Da MEMAP den thermischen Sollwert vorgibt muss für die Ansteuerung des BHKWs dieser über die angenommenen fixen thermischen und elektrischen Effizienzen des BHKWs in einen Sollwert für die elektrische Leistung umgerechnet werden. Dies geschieht im selbst programmierten EMS (siehe vorangegangener Abschnitt zur Einbindung von MEMAP ins CoSES-Labor). In Abbildung 36 ist deutlich zu sehen, dass das BHKW die elektrischen Vorgaben gut umsetzt. Eine Tendenz zur Untererfüllung ist zu erkennen. Diese ist darauf zurückzuführen, dass der Eingangswert des BHKWs für die elektrische Leistung als elektrische Gesamtleistung interpretiert wird. Davon wird ein Teil für eigene interne Verbraucher (wie Kühlmittelpumpe) verwendet. Gemessen wurde die tatsächliche Einspeisung ins Netz, welche entsprechend um ein paar hundert Watt niedriger ist. Die thermische Leistung des BHKWs schwankt sehr stark um den vorgegebenen Sollwert. Dabei handelt es sich um ein anlagenspezifisches Verhalten. Dieses ist wohl auf die interne Regelung insbesondere des Volumenstroms durch das BHKW zurückzuführen und kann nicht genauer erklärt werden. Beim Anfahren des BHKWs ist zu beobachten, dass die elektrische Leistung mit einer Verzögerung von ca. 5 Minuten zur Verfügung steht, die thermische Leistung mit einer Verzögerung von ca. 10 Minuten. Beim Abschalten liefert das BHKW für ca. eine Minute weiterhin Energie, während die elektrische Leistung sehr schnell abfällt und dabei erneut kurz in den Bezug überschwingt. Genauere Erklärungen hierzu finden sich auch in einer gesonderten Veröffentlichung zum CoSES-Labor.³⁵

Der Gaskessel in Haus 2 folgt der Vorgabe der thermischen Leistung durch die MEMAP-Plattform sehr gut, wie dies in Abbildung 37 zu sehen ist. Beim An- und Abfahren kommt es zu kurzen Leistungsspitzen. Die Sollleistung steht beim Anfahren nach ca. 5 Minuten zur Verfügung. Nach dem Abschalten liefert der Kessel noch ca. für eine Minute weiterhin Energie.

Abbildung 38 zeigt die Verläufe der Speicherladezustände der beiden Wärmespeicher und gestrichelt die intern von der MEMAP-Plattform berechneten zu erwartenden Speicherladezustände. Die Grafiken zeigen hier eine sehr gute Übereinstimmung. Hier spielt der modellprädiktive Regler (MPC, siehe E1.C) in Kombination mit dem internen Speichermodell seine Stärken aus. MEMAP

³⁵ Zinsmeister, D., Lickleder, T., et al. A prosumer-based sector-coupled district heating and cooling laboratory architecture. *Submitted to Applied Energy Journal (13/12/2021)*.

nutzt das interne Speichermodell um die Speicherladezustände basierend auf den aktuell gemessenen SOC's vorherzusagen (siehe E1.C). Aufgetragen sind jeweils die SOC's welche MEMAP einen Zeitschritt zuvor für den betreffenden Zeitschritt vorhergesagt hat. Im Experiment hatte ein Zeitschritt eine Länge von 15 Minuten. In dieser Zeitspanne spielen Verluste eine untergeordnete Rolle, vielmehr wird der Ladezustand stark durch die Ein- und Ausspeicherung beeinflusst. MEMAP gibt die Setpoints für diese Ein- und Ausspeicherung vor und kann diese daher für die interne Vorhersage des zu erwartenden SOC's nutzen. Wird die vorgegebene Ein- und Ausspeicherung vom realen System ohne große Abweichungen umgesetzt, so stimmt der tatsächlich eintretende SOC ziemlich genau mit dem Vorhergesagten überein. Die Güte der Übereinstimmung, welche in der Vergrößerung in Abbildung 38 zu sehen ist, ist als sehr gut zu bewerten.

vi. Fazit der MEMAP-Tests im CoSES-Labor

- Integration gelungen, hat zur Weiterentwicklung der Plattform beigetragen (Synchronisierung, Datenmodell)
- Integrationsbedarf von Managementebene und technischer Ebene aufgezeigt, zentrale Rolle des EMS
- Relevanz der Betrachtung von technischen Größen (insbesondere Temperaturniveaus) beleuchtet
- Kommunikationskonzept und Datenmodell validiert
- Interoperabilität mit realer Anlagentechnik gezeigt
- Ausführlichere Tests mit mehreren Szenarien und längeren Zeiträumen sind notwendig: Prototypentests auf dem Weg ins Feld

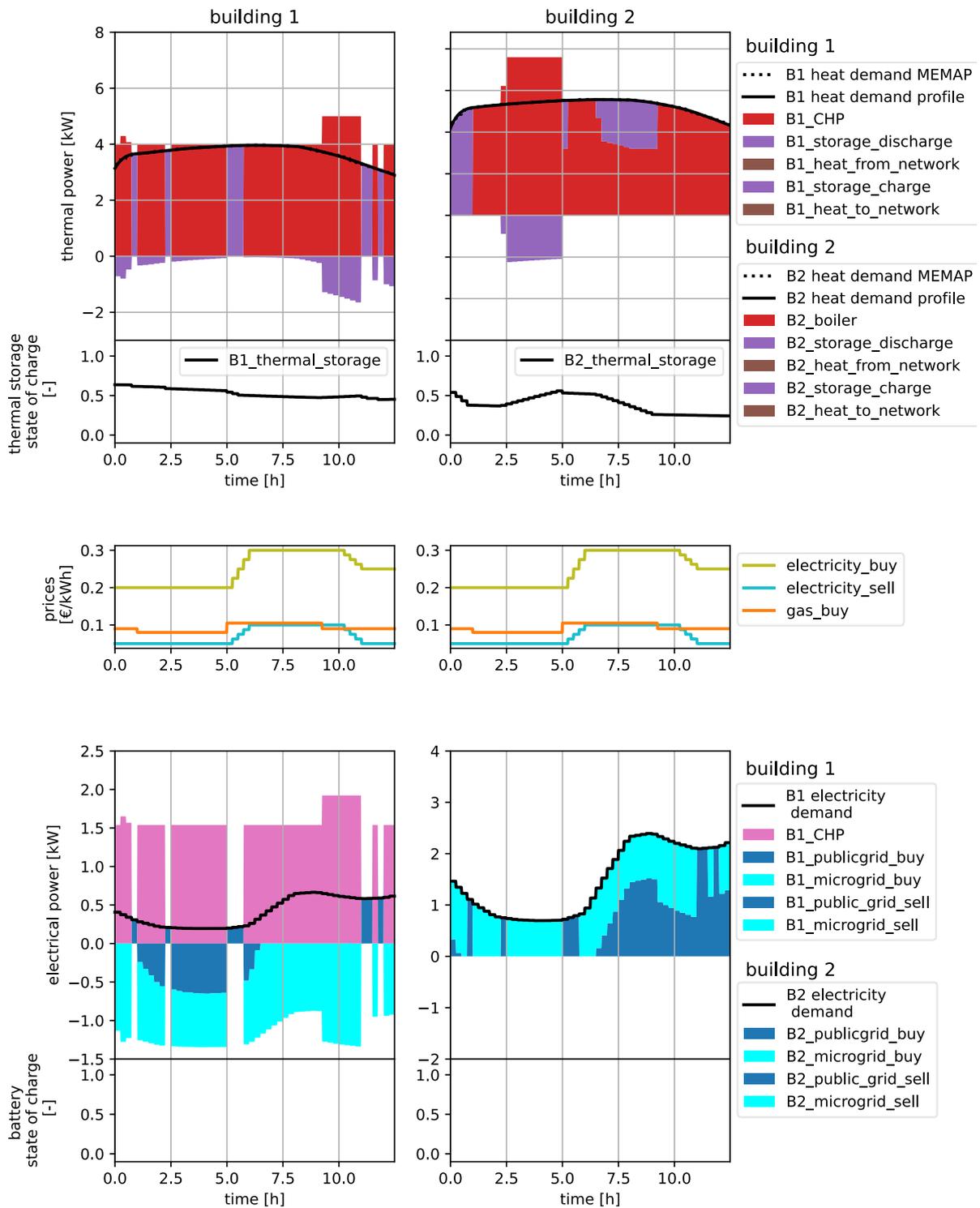


Abbildung 33: Simulationsergebnisse des Szenarios für die Laborexperimente unter Annahme perfekter Vorhersagen, Modelle und perfekter Umsetzung der Setpoints durch die Anlagen.

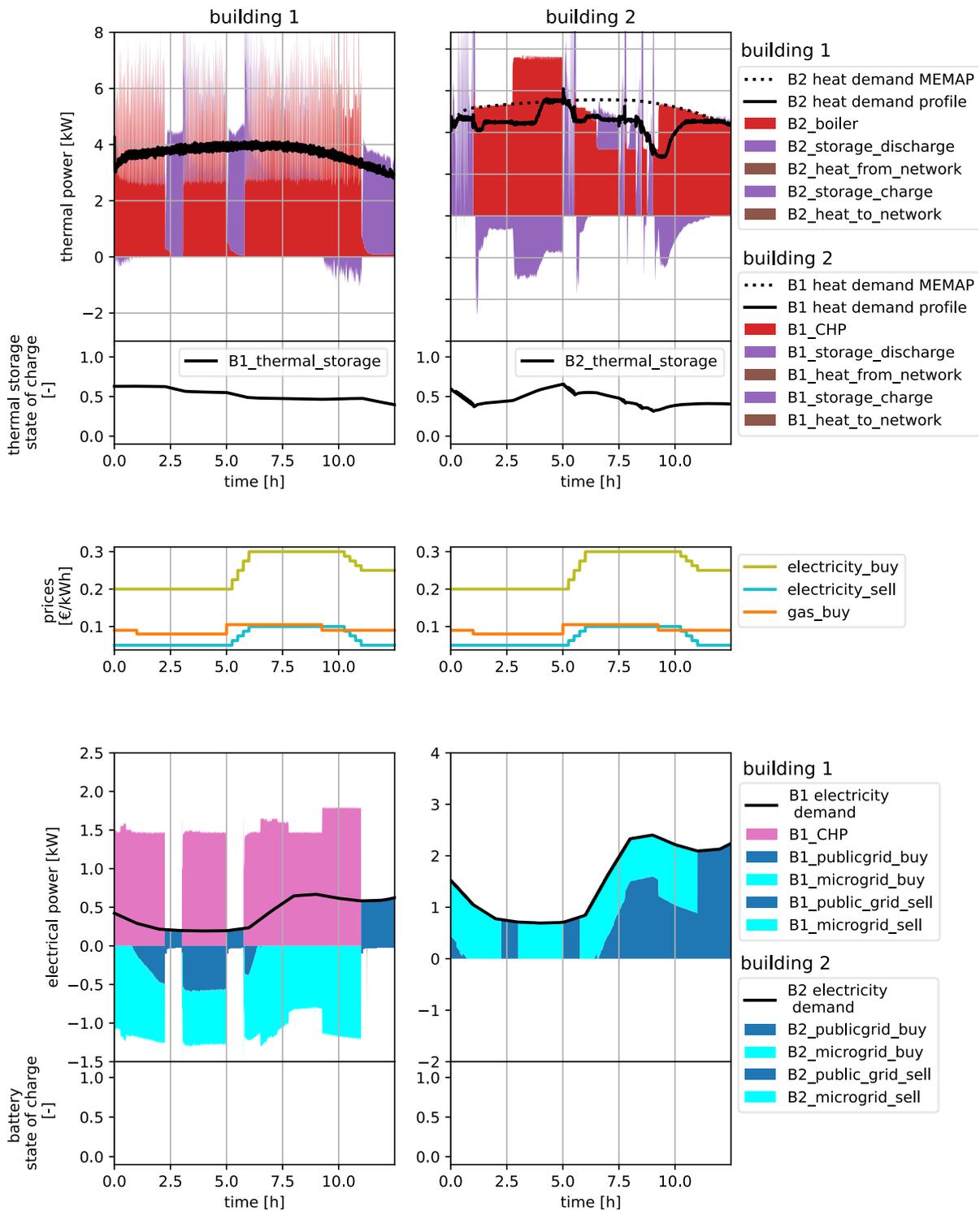


Abbildung 34: (Mess-)Ergebnisse des MEMAP-Experiments im CoSES-Labor

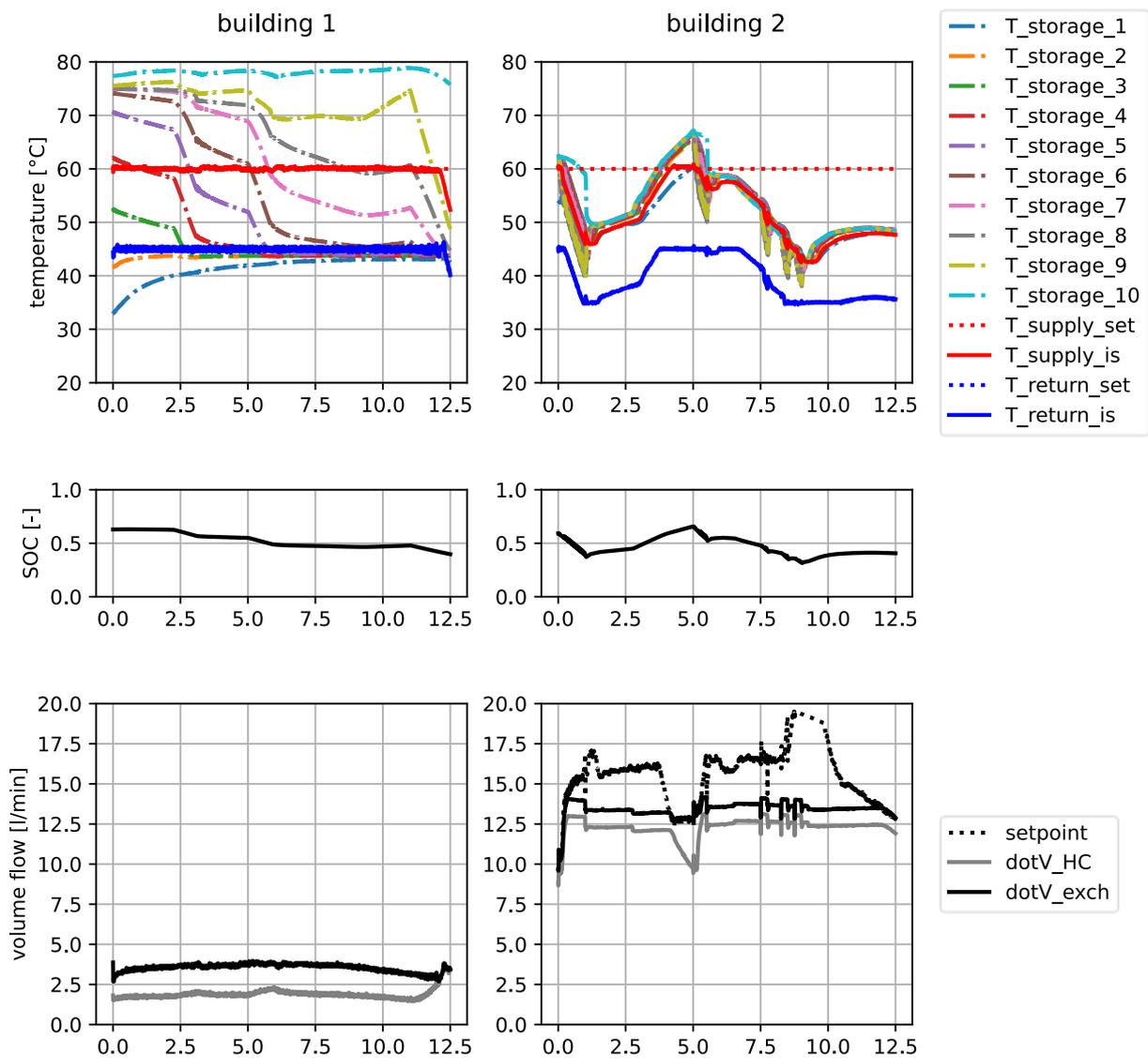


Abbildung 35: Technische Daten des Laborexperiments von MEMAP in CoSES: Vor- und Rücklauftemperaturen der Wärmesenken zur Emulation des Heizsystems, Speichertemperaturen auf verschiedenen Höhen und Ladezustände der Wärmespeicher

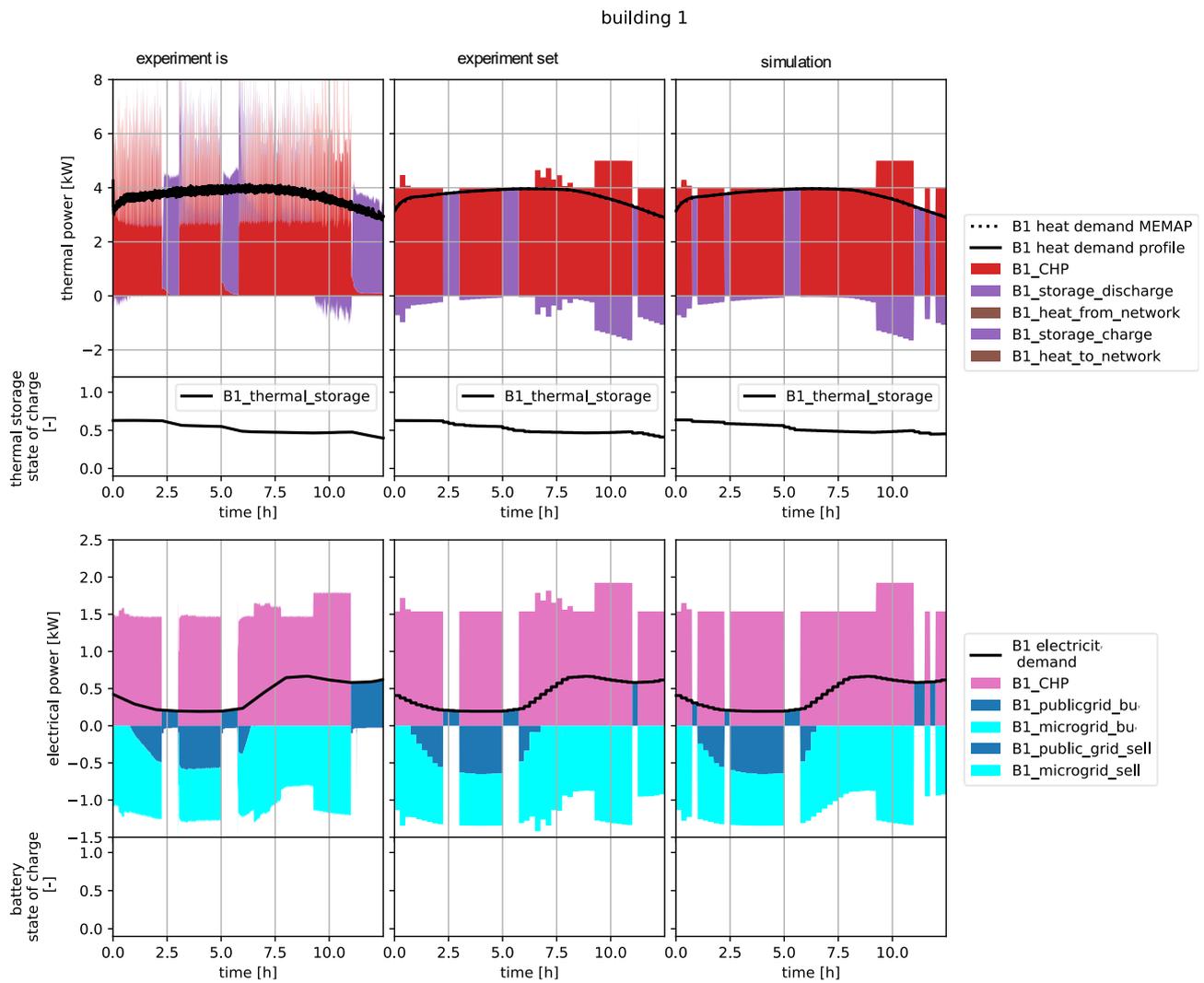


Abbildung 36: MEMAP-Experiment in CoSES: Vergleich der Simulationsergebnisse (rechts) mit den MEMAP-Setpoints (mitte) und den Messwerten (links) von Haus 1

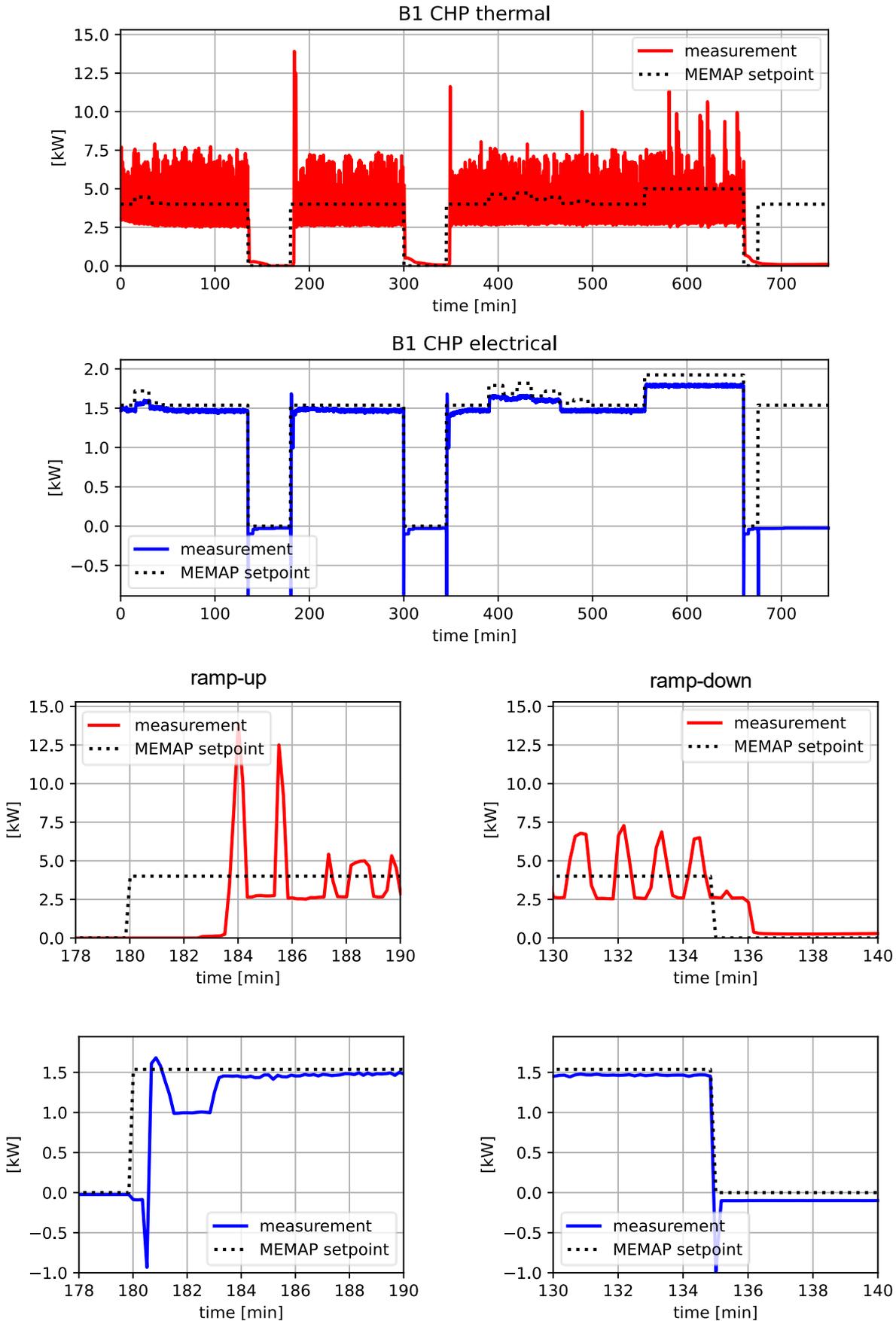


Abbildung 37: MEMAP-Experiment in CoSES: Vergleich MEMAP-Setpoints mit Messergebnissen des BHKWs, incl. zoom für An- und Abfahrt des BHKWS

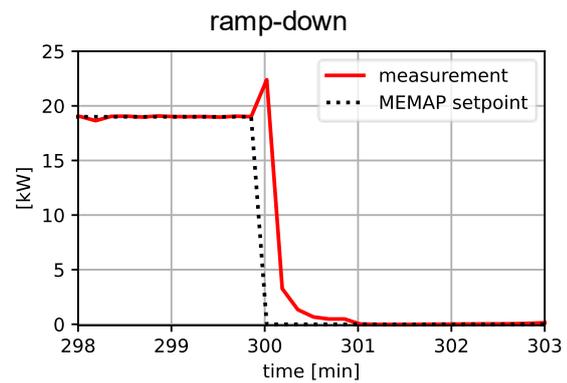
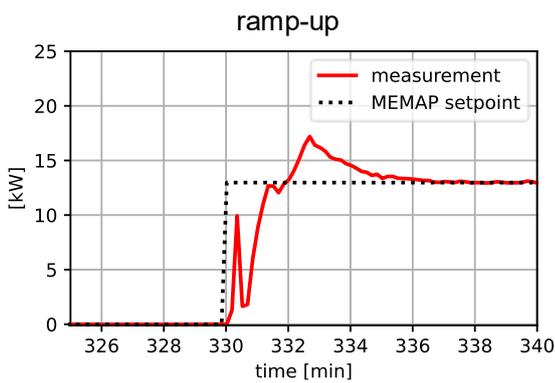
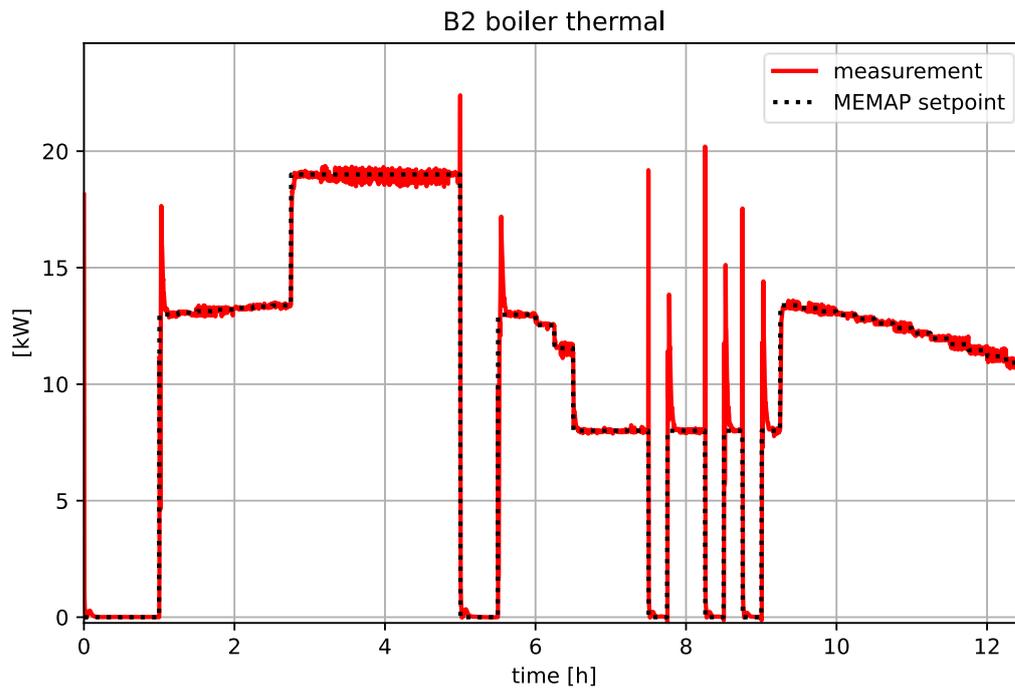


Abbildung 38: MEMAP-Experiment in CoSES: Vergleich MEMAP-Setpoints mit Messergebnissen des Gaskessels, incl. Zoom für An- und Abfahrt des Kessels

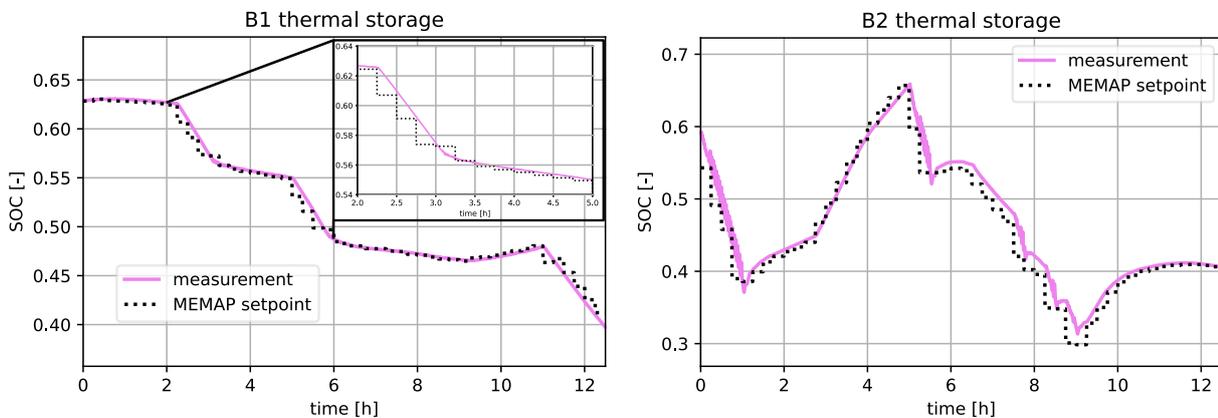


Abbildung 39: MEMAP-Experiment in CoSES: Vergleich MEMAP-Setpoints mit Messergebnissen des Speichers

B. Riemerling

i. Feldtest-Kontext

Das Gewerbegebiet Riemerling diente als Feldtest-Quartier für das Forschungsprojekt. Das betrachtete Quartier besteht aus 6 Gebäuden in der Otto-Hahn-Straße im Gewerbegebiet Riemerling West. Dieses befindet sich in 85521 Riemerling, einem Ortsteil von Hohenbrunn im Südosten Münchens. Anhand des Quartiers sollte eine mögliche Planung und Vernetzung nach den Erkenntnissen des in der Forschungsarbeit entwickelten Memap-Konzeptes durchgeführt werden.

Das Quartier besteht aus einem Bürogebäude, einem Hotel und einer Schule, sowie drei gemischt genutzten Gebäuden aus Büro, Holzverarbeitung im Mittelstandsbereich, Lagerhalle und einen geringen Werkwohnungsanteil.

Ziele (Aufnahme realer Lasten)

- Ziel des Feldtestes in Riemerling soll die praktikable Umsetzung eines Fernwärmenetzes nach dem MEMAP-Prinzip sein. Daraus leiten sich folgende Unterziele ab:
- Bestandsaufnahme der Gebäude
- Bestandsaufnahme der Energiezentralen
- Bestandsaufnahme der Räumlichen Trennung
- Bestandsaufnahme der Verbräuche und Lasten
- Bestandsaufnahme der öffentlichen Sparten
- Auslegung des Rohrnetzes
- Auslegung des Wärmeverbundes
- Kostenberechnung der Planungen
- Wirtschaftlichkeitsberechnung einzelner Ausbaustufen

ii. Herausforderungen bei Datenaufnahme

Neben den technischen Herausforderungen gab es auch nicht unerhebliche koordinative Herausforderungen bei der Aufnahme der Daten.

Durch die Vielzahl an Eigentümern, welche nicht gleichzeitig Nutzer oder Betreiber der Anlagen waren, kam es im Laufe des Projektes zu erheblichen zeitlichen Verzögerungen in der Zugänglichkeit. Dadurch wurden Aufnahmeverfahren gesucht die zeitlich schnell vor Ort umsetzbar sind und zugleich der Detailgrad hoch aufgelöst ist. Hierbei haben wir dann auf die Methodik der 3D-Laserscantechnik gesetzt, welche Aufnahmen einer Zentrale in 2h vor Ort ermöglichte wobei die Nachbearbeitung der Daten im Büro erfolgen konnte.

Beim messtechnischen Überflug des Gewerbegebietes mit einer Drohne sind zudem behördliche Auflagen zu erfüllen. So sind Flüge nur zwischen 100-120m erlaubt. Die gesetzlichen Bestimmungen sind nach deutschen Luftverkehrs-Ordnung (LuftVO) §21 einzuhalten. Es muss die Zustimmung aller Nutzer und Eigentümer für einen Überflug eingeholt werden. Zudem müssen ab dem 01.12.2021 der kleine Drohnenführerschein vorgelegt werden.

Die technische Herausforderung bestand die großen Datenmengen der 3D-Laserscans in das Modell so zu verknüpfen das die Aufnahmen zueinander richtig im Koordinatensystem eingefügt werden. Außerdem musste das Modell mit den Datenmengen noch bearbeitbar bleiben. Daher wurden die Scannpunktswolken den Forschungsteilnehmern nicht zur Verfügung gestellt, da es zum einen reine optische Modelle waren ohne technischen Inhalt und zum anderen Hardwarestruktur bei den Partnern sehr wahrscheinlich nicht vorhanden ist, um grafisch die 3D Scans überhaupt abzurufen.

iii. Umsetzung der Datenaufnahme

Zu der Aufnahme von statischen Daten der Bauteile wurden außerdem noch dynamische Daten für den Verbrauch und die Lasten aufgenommen. Diese Daten bilden mit den Komponenten die Grundlage der Planungen.

Nachdem in den jeweiligen Gebäuden nur alte analoge Regelungstechnik in sehr geringem Umfang vorhanden ist und somit keinerlei Daten mit den existierenden Komponenten ausgetauscht werden können, wurden in den einzelnen Heizungszentralen neue Ultraschallwärmemengenähler montiert. Aufgrund der nicht vorhandenen Beruhigungsstrecken war allerdings klar, dass diese Messwerte eine gewisse Ungenauigkeit aufweisen werden, was aber bewusst akzeptiert wurde, um zumindest eine Annäherung an das tatsächliche Lastverhalten der Objekte erfassen zu können. Die Daten der Zähler wurden per Modbus an LoRa-Sender übergeben, die diese per Funk an einen LoRa-Server übermittelten (siehe Abbildung 39). Die weitere Übertragung erfolgte über das Internet mittels einer VPN-Verbindung an einen dafür bereitgestellten Server mit einem lokalen EMS, welches die Daten minütlich aufzeichnete. Auch für die Übertragung vom LoRa-Server zum lokalen EMS wurde das bereits beschriebene OPC UA Protokoll verwendet.

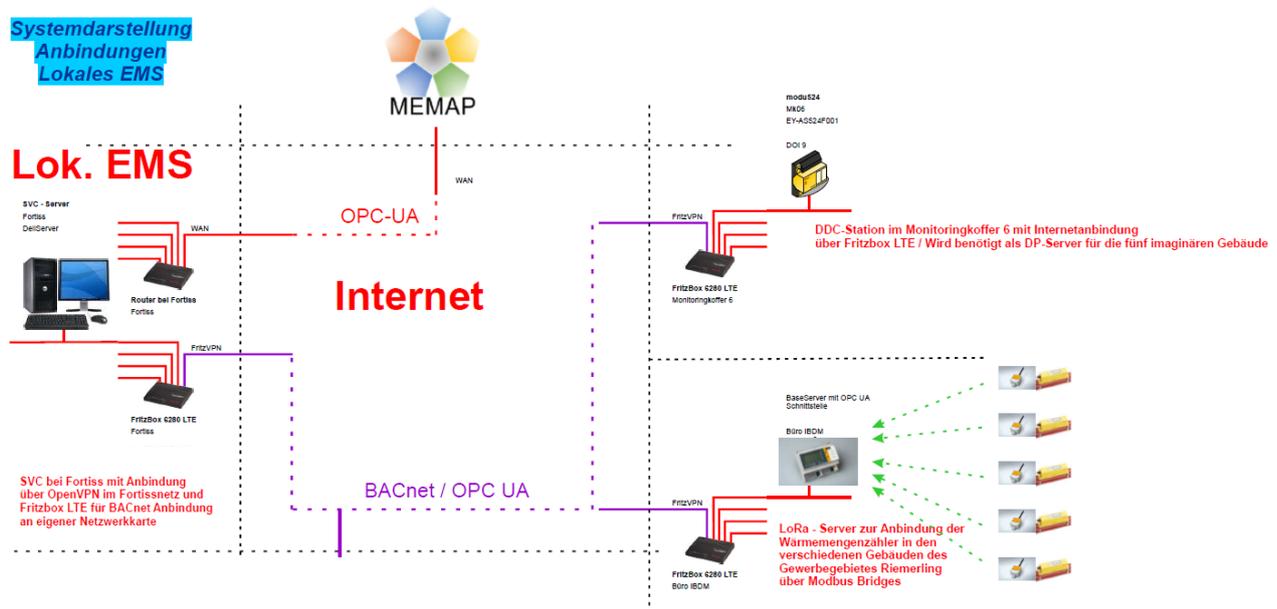


Abbildung 40: Schematischer Aufbau der Datenerfassung aus den Objekten über das lokale EMS zu MEMAP

Desweiteren wurde zunächst probiert Stromzähler über optische Sensoren auszulesen. Dies war technisch an den Zählern nicht umsetzbar. Es wurden nach Lösungen gesucht die Daten automatisch zu ermitteln über eine geeignete Messeinrichtung. Diese wurde in neuen Stromzähler gefunden und mit den Eigentümern abgestimmt. Dabei handelt es sich um Zähler der Fa. Discovery die anhand von Spannungssequenzen einzelne Stromverbraucher voneinander unterscheiden kann. Leider konnten, trotz intensiver Bemühungen im Projektzeitraum nur zwei der 6 Zähler ausgetauscht werden. Die Lieferzeit von einem Zähler wurde von 8 Wochen auf 18 Monate erhöht. Die Lasten der übrigen Eigentümer wurden anders ermittelt. Für die Schule und den Bürobetrieb eines Gebäudes konnten die Zähler verwendet werden. Für den hohen Stromverbraucher im Bereich der Holzverarbeitung konnten wir auf Lastmessungen in einem 2-monatigen Zeitraum zurückgreifen. Bei dem Hotel und den übrigen Bürobereichen wurden Standardlastprofile des BDEW hinterlegt und über den Verbrauch der letzten 3 Jahre gelegt.

Nach dem Abmodellieren der Punktwolken mussten die Daten aus der Vor-Ort-Aufnahme über die VDMA-Listen in das Modell geschrieben werden. Durch die BIM-CAD Software und der Bauteilbasierten Arbeitsweise konnte für jede Pumpe, jede Wand und jeden Erzeuger wie

Rohrleitung spezifische einmalige Werte in Ihren jeweiligen Eigenschaften geschrieben werden. Z. B. eine Wand ist xx cm tief, lang, hoch und hat einen U-Wert von 0,2 W/m²K.

Durch die Datenaufnahme konnte ein neues Rohrnetz für den MEMAP-Verbund ausgelegt werden. Dabei wurden Wärmetauscher, Speicher, Pumpen, Regulierventile und in einer Variante auch ein BHKW bestimmt und durchgerechnet. Die Daten konnten dann für die Wirtschaftlichkeitsanalyse weiterverwendet werden.

C. Infrastruktur für Wärmetausch im Quartier

MEMAP betreibt ein sektorübergreifendes Energiemanagement von Quartieren auf der Ebene der Energie- und Leistungsflüsse. Darüber hinaus stellt sich insbesondere für die thermische Seite die Frage, wie die resultierenden Leistungssollwerte technisch umgesetzt werden können, z.B. in Bezug auf Volumenströme, Temperaturen und Druckunterschiede. Diese Frage bezieht sich auf Wärmenetze mit dezentralen Prosumern als Nachfolge von zentralen konventionellen Fernwärmesystemen und lässt sich analog übertragen auf die Kälteversorgung. Prosumer sind Einheiten, die als Verbraucher oder Erzeuger für das übergeordnete Energiesystem agieren können und im Laufe der Zeit zwischen diesen Modi wechseln. Motiviert durch die Idee von MEMAP wurde an der TUM die technische Umsetzung und Steuerung von Prosumer-dominierten Wärmenetzen untersucht und mehrere Paper hierzu veröffentlicht.

Zentrales Element für Wärmenetze mit Prosumern sind die Wärmeübergabestationen. Im Unterschied zu konventionellen Nah- und Fernwärmenetzen müssen die Wärmeübergabestationen in Wärmenetzen wie sie der MEMAP-Idee entsprechen nicht nur den kontrollierten Bezug von Wärmeenergie aus dem Netz ermöglichen, sondern auch deren gezielte Einspeisung zum Austausch mit anderen. Hierfür braucht es geeignete thermohydraulische Netzarchitekturen mit dezentralen Aktuatoren in den Wärmeübergabestationen. Ein geeignetes Netzwerkkonzept wurde auch im Zusammenhang mit dem CoSES-Labor entwickelt. Abbildung 40 zeigt dieses anhand eines beispielhaften bidirektionalen Prosumer-Wärmenetzes mit fünf Teilnehmern. Im Produzentenmodus ist die Pumpe der jeweiligen Wärmeübergabestation aktiv, im Bezugsmodus (Konsument) das Regelventil.

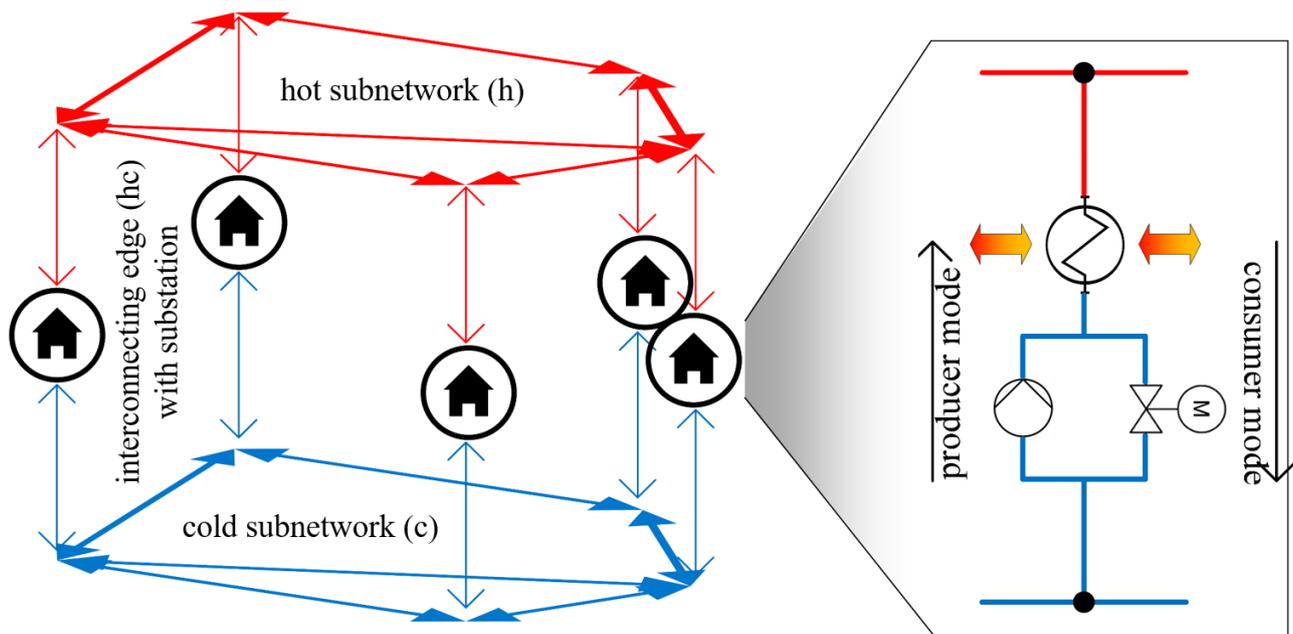


Abbildung 41: Schema eines beispielhaften bidirektionalen Prosumer-Wärmenetzes mit den Wärmeübergabestationen³⁶

Für den Betrieb dieser Netzwerkarchitektur ist die intelligente Steuerung der dezentralen Aktoren eine große Herausforderung. Daher werden Methoden zur Analyse von Prosumer-dominierten Wärmenetzen benötigt, die auch die hydraulischen Aktoren und die Wärmeübertragung zu den Prosumern einbeziehen. Es wurde eine ganzheitliche mathematische Systemdarstellung abgeleitet, die es erlaubt, die Beziehungen zwischen den Regelgrößen solcher Netze und ihrem thermohydraulischen Beharrungszustand zu untersuchen. Dieses thermohydraulische Modell wurde veröffentlicht in einem Paper.³⁷ Es basiert auf der Kombination von Bilanzgleichungen mit gängigen physikalischen Modellen für die Netzkomponenten. Explizit berücksichtigt werden der Wärmeübergang zur Sekundärseite, flexible Prosumer-Modi und das Verhalten der dezentralen Regelventile in Abhängigkeit von ihren Steuereingängen. Das resultierende Gleichungssystem wird im Zusammenhang mit zwei Anwendungsfällen diskutiert: a) Simulation des Systemzustands bei gegebenen Steuereingängen und b) Bestimmung der notwendigen Steuereingänge für den angestrebten Wärmehaushalt (optimale Steuerung). Es werden exemplarische Simulationsergebnisse vorgestellt. Für den Anwendungsfall der Simulation wird ein Python-Code (ProHeatNet_Sim) auf Github unter Open-Source-Lizenz bereitgestellt, der auf dem abgeleiteten Modell basiert.³⁸

Das Modell stellt eine Verknüpfung her zwischen dem übergeordneten Energiemanagement (Leistungsflüsse) wie es durch die MEMAP-Plattform erfolgt und dem thermohydraulischen Systemzustand (Temperaturen, Drücke, Volumenströme) der betrachteten thermischen Netze. Gleichzeitig stellt das Modell eine Verknüpfung her zwischen dem Zustand des thermohydraulischen

³⁶ Lickleder, T., Hamacher, T., Kramer, M., & Perić, V. S. (2021). Thermohydraulic model of Smart Thermal Grids with bidirectional power flow between prosumers. *Energy*, 230, 120825. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120825>

³⁷Lickleder, T., Hamacher, T., Kramer, M., & Perić, V. S. (2021). Thermohydraulic model of Smart Thermal Grids with bidirectional power flow between prosumers. *Energy*, 230, 120825. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.120825>

³⁸ https://github.com/thomaslickleder/ProHeatNet_Sim

Systems und den Steuereingängen für den Betrieb. Die Modellierung führte zu einem tieferen Verständnis der Systemkomplexitäten: Es zeigte sich, dass für thermische Netze mit bidirektionalen Leistungs- und Volumenströmen die Komplexität der Modellierung des hydraulischen Netzzustandes mit der Anzahl der Netzverbindungen exponentiell ansteigt. Dies gilt nicht nur für unser Modell, sondern für alle Modelle, die bidirektionale thermische Netze abdecken wollen. Der Grund dafür sind die a priori unbekanntes Fließrichtungen in den Netzleitungen von Prosumer-dominierten Wärmenetzen. In konventionellen, unidirektionalen Fernwärmesystemen ist dies nicht der Fall und daher ist die Modellierung weniger komplex. Die a priori unbestimmten Strömungsrichtungen sowie die Nichtlinearitäten zwischen den Volumenströmen und den Wärmeübergangsparametern sind eine große Herausforderung für Regelungsansätze, die das thermohydraulische Systemmodell explizit in den Regler einbeziehen wollen. Die Volumenströme einschließlich ihrer Richtungen sind Variablen der Optimierung, werden aber auch im Vorfeld benötigt, um die Bilanzgleichungen für das Reglermodell zu formulieren.

Basierend auf dem beschriebenen Netzinfrastrukturkonzept wurde eine Modelica-Bibliothek entwickelt, um verschiedenste Netzkonfigurationen von Prosumer-basierten Netzen simulativ untersuchen zu können. Mit Hilfe von Modellierungs- und Simulationsumgebungen wie Dymola können durch die benutzerfreundliche modulare Bibliothek über eine grafische Oberfläche verschiedene Konfigurationen erstellt und dann sowohl deren stationäres als auch das dynamische Verhalten untersucht werden. Die Bibliothek (ProsNet) ist frei verfügbar auf Github³⁹. Sie wurde auch genutzt, um das oben beschriebene thermohydraulische Modell (ProHeatNet_Sim) zu validieren. Die Validierung inkl. der Dokumentation der Modelica-Bibliothek wurde in einem wissenschaftlichen Paper veröffentlicht.⁴⁰

Beide oben beschriebenen Modellierungsansätze wurden für Untersuchungen zu allgemeinen Eigenschaften und Herausforderungen von prosumer-dominierten Wärmenetzen genutzt. Die Erkenntnisse wurden ebenfalls in einem wissenschaftlichen Paper zusammengefasst und veröffentlicht.⁴¹

Es zeigt sich, dass die technische Umsetzung des Tauschs von Wärmeenergie im Verbund mit einigen Herausforderungen verbunden ist. Hinsichtlich der notwendigen Infrastruktur können bisher verwendete Verfahren für die Auslegung von Fernwärmenetzen nicht direkt übernommen werden. Es besteht weiterer Forschungsbedarf, um sinnvolle Auslegungsfälle für Prosumer-dominierte Netze mit hoher Variabilität zu ermitteln. Hinsichtlich des Betriebs führen die starken Abhängigkeiten der Teilnehmer untereinander zur Notwendigkeit eines koordinierten Managements, wie es beispielsweise der zentrale MEMAP-Ansatz ermöglicht. Wie in den oben referenzierten Publikationen herausgearbeitet wurde, besteht jedoch auch auf der technischen Ebene eine starke Abhängigkeit der Prosumer untereinander. Beispielsweise zu erwähnen ist hier das Phänomen des gegenseitigen Blockierens von dezentralen Pumpen.⁴¹³⁷ Um die Wärmeströme daher tatsächlich auf der technischen Ebene umsetzen zu können, muss das physikalische Netzverhalten in Form von Volumenströmen, Temperaturen und Drücken berücksichtigt werden. Eine Möglichkeit hierfür sind detaillierte physikalische Modelle. Als übergreifende Hypothese kann festgehalten werden, dass der Energieaustausch zwischen Prosumern über kleine Entfernungen technisch sinnvoller ist und bei einer größeren Anzahl von Prosumern, die gleichzeitig Energie austauschen, sehr komplex zu steuern ist. Die höhere Flexibilität von Prosumer-dominierten Wärmenetzen und deren Kompatibilität

³⁹ <https://github.com/thomaslickleder/ProsNet>

⁴⁰ Elizarov, I., & Lickleder, T. (2021). ProsNet – a Modelica library for prosumer-based heat networks: description and validation. *Journal of Physics: Conference Series*, 2042(1), 012031. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012031>

⁴¹ Lickleder, T., Zinsmeister, D., Elizarov, I., Perić, V., & Tzscheuschler, P. (2021). Characteristics and Challenges in Prosumer-Dominated Thermal Networks. *Journal of Physics: Conference Series*, 2042(1), 012039. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2042/1/012039>

mit der Idee des lokalen Energietauschs wird mit einer höheren Komplexität in Design und Betrieb erkaufte.

Die Integration von Management-Ebene (MEMAP) und technischer Betriebsebene zum Wärmetausch im Quartier ist eine zentrale Herausforderung, die im Projekt ermittelt wurde und in Folgearbeiten weiter untersucht wird. So beschäftigt sich die TUM beispielsweise im Rahmen des Forschungsprojektes „Optimierte Sektorkopplung in Quartieren durch intelligente thermische Prosumernetze“ (OSkit, FKZ: 03EN3032A) mit der technischen Implementierung von thermischen Prosumernetzen und deren Interaktion mit dem Stromnetz. Hierfür ist exakt die beschriebene Integration von Managementebene und technischer Betriebsebene vonnöten.

(E4) Building Information Model (BIM)

Das Building Information Model (BIM) ist die digitale Basis für die Baubranche. Es stellt einheitliche Daten für alle möglichen Prozessschritte im Bauwesen und schafft so Mehrwerte für Werkzeuge, Prozesse und Kommunikation zwischen Menschen. Es soll ein Bauwerk über alle Lebenszyklen hinweg abgebildet werden, sodass BIM als eine digitale Arbeitsmethode für das fachübergreifende Planen, Bauen und Betreiben von Bauwerken verstanden werden kann. Alle Beteiligten greifen jederzeit auf denselben Informationsstand zu.

Das Ziel in MEMAP war die Einbindung von BIM in unsere digitale Plattform, sodass ein durchgängiger digitaler Prozess von der Planung über den Betrieb erreicht werden kann. Dieser Abschnitt beschreibt die Arbeit in Zusammenhang mit BIM, von der Datenerfassung – d.h. der Erstellung eines BIM Modells für das Testgebiet Riemerling bis hin zur Anpassung von Daten, um eine Konsistenz mit MEMAP herstellen zu können. Dazu gehört der Datenimport in das MEMAP Planungswerkzeug – um bereits existierende BIM-Modelle in Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen berücksichtigen zu können, sowie die Einbindung der im MEMAP-Testgebiet entstehenden Live-Daten in die BIM Welt. Mit diesen Arbeiten wurde letztendes die Durchgängigkeit unseres Ansatzes im MEMAP-Kontext von der Bestandsaufnahme bis zum Betrieb demonstriert.

A. Erstellung eines BIM Modells von Riemerling

i. Punktwolken und die Überführung in BIM

Zur Grundlagenermittlung im Rahmen der BIM Modellierung wurde mit mehreren lokalen Teilnehmern mit der Bestandsaufnahme begonnen. Da im Grunde keine ausreichenden gebäudespezifischen Dokumentationen, technische Unterlagen, etc. vorlagen wurde mehrere Ansätze verfolgt ein BIM Modell zu erschaffen und mit Daten zu füllen.

Hierbei wurden zunächst verschiedene Ansätze getestet:

- Bestandsaufnahme durch Foto Dokumentation
- Bestandsaufnahme durch GEO Daten aus dem Internet (siehe Anhang GEO Daten Internet)
- Händische Eingabe von Daten mit Hilfe der zur Verfügung stehender technischen Angaben bzw. Standards in ein BIM Modell

Die erste detaillierte technische Datenaufnahme erfolgte nach den etablierten VDMA 24197-2 Einheitsblättern „Energetische Inspektion von Komponenten gebäudetechnischer Anlagen Teil 2: Heiztechnische Geräte und Anlagen“. Die Einheitsblätter gibt es nur als PDF-Dokument, daher wurden die Listen in ein Excel Dokument übertragen und formatiert. Bei der Eingabe der Daten musste festgestellt werden, dass aus energetischer Sicht irrelevanten Daten und andererseits fehlende Datenabfragen in den Einheitsblättern vorliegen. Auch war eine praxisnahe Eingabe nach den VDMA Einheitsblättern nicht möglich. Daher entwickelten wir Eingabemasken die eine ausreichende aber nicht überflüssige Eingabe von Daten zulässt.

Aufgrund der oben beschriebenen Herausforderungen bzgl. Der Zugänglichkeiten mit den jeweiligen Eigentümern erfolgte die weitere Bestandsaufnahme durch Lasertechnik-basiertes Scanning (siehe Abbildung 41) durchgeführt. Das 3D-Scanning ist eine automatische Aufnahmemethode für die Digitalisierung von Gebäuden, Bestandsanlagen in der Gebäudetechnik oder auch Skulpturen. Aber auch in der Forensik oder zur Ermittlung von Unfällen wird das 3D-Scanning heutzutage angewendet. Das Scanning ermöglicht ein berührungsloses Vermessen von Gegenständen jeglicher Art in 3D.

Hierzu wird ein vom 3D-Scanner ein Lichtstrahl (Laserstrahl) ausgesendet. Befindet sich ein Gegenstand in einer entsprechenden Reichweite, wird der Lichtstrahl vom Gegenstand reflektiert

und vom 3D-Scanner wieder aufgenommen und als einzelner Punkt in der Aufnahme gespeichert. Dieser Vorgang wird je nach gewünschter Qualität millionenfach wiederholt.

Das Verfahren wurde anfangs für die Aufnahme von Innenräumen wie z.B. Technikzentralen eingesetzt. Im Zuge der Projektumsetzung wurden Außenaufnahmen erzeugt, um eine Verknüpfung in den Außenbereich zu ermöglichen. Ziel der Aufnahme war es, über das interne GPS-Signal, die 3D-Aufnahmen im Koordinatensystem zu verorten. Im weiteren Verlauf der Digitalisierungsmaßnahme wurde ein Drohnenflug über das Gewerbegebiet durchgeführt. Mit Drohne wurde eine Fläche von ca. 230 m x 135 m aufgenommen, dabei wurden ca. 475 Bilder gemacht. Die Fotoaufnahmen wurden schließlich mit Hilfe von einer Fotogrammetriesoftware ausgewertet und zu einem 3D-Modell gerechnet. Diese Software erzeugt über das Verfahren der Fotogrammetrie von der 3D-Scanning-Lichtreflexion als Ergebnis eine 3D-Punktwolke. Diese Punktwolke wird anschließend als Vorlage für die 3D-Modellierung im BIM-System hinterlegt. Je nach Projektanforderung, kann das Gebäude oder auch z.B. eine Technikzentrale nachgebaut werden.

Für das MEMAP-Projekt wurde eine mittlere Aufnahmequalität ausgewählt, welche zu einer Aufnahmedauer von ca. fünf Minuten entspricht. Für die Aufnahme einer Technikzentrale sind im Schnitt ca. 9 Aufnahmen erforderlich gewesen. Die Genauigkeit der Systeme ist dabei unterschiedlich: Beim 3D-Scanning kann eine Genauigkeit von ca. 0,5 bis 1 mm/m erreicht werden, bei der Nutzung der Fotogrammetrie wird eine Genauigkeit von 5 bis 10 cm/m erzielt.

Um eine einwandfreie Einbindung der 3D-Punktwolke im BIM-Projekt zu ermöglichen, ist eine Verortung der Aufnahmen durch eine Vermessung der Referenzkugel und der Bodenkontrollpunkte erforderlich. Hierbei werden Korrektur-Koordinaten vom entsprechenden Landesvermessungsamt abgeholt. Die von den Geräten gespeicherten Koordinaten in den Aufnahmen sind von der Anzahl der zugänglichen Satelliten abhängig; hier spielen die Faktoren wie Wetter oder bauliche Hindernisse eine entscheidende Rolle.

Für die Aufnahmen wurden folgende Geräte- und Softwaretypen verwendet:

3D-Scanner	Faro 130 Focus 3D, Reichweite 130 m
- Auswertung	Faro Scene 5.53 / Autodesk Recap Pro 4.2
Drohne	DJI Phantom 4 Pro, Kamera mit 16mPixel Auflösung, MFT-Sensor
- Auswertung	Autodesk Recap Pro 4.2 und Pix4D (zum Test)

Grundsätzlich können Punktwolken für folgende Anwendungen verwendet werden.

- Nachmodellierung von Gebäude und deren
 - Gebäudehülle
 - Anlagentechnik
 - Innenausstattung in 3D
- Erstellung von Videos für Präsentationen
- Analyse von Oberflächen
- Geplante Weiterverwendung des Modells für ein mögliches MEMAP 2:
- Dokumentation von Baufortschritten
- Analyse Baufortschritt

Die Daten wurden in das von Autodesk entwickelte Werkzeug REVIT eingepflegt. REVIT ist dabei ein gängiges CAD Tool im Baubereich, welches BIM unterstützt. REVIT arbeitet nicht auf einer herkömmlichen CAD basierten Grafikumsetzung (bisher nicht objektorientiert), sondern in einer dreidimensionalen, objektorientierten, AEC-spezifischer Umgebung.

Ein Auszug der Bilder mit den Punktwolken und dem resultierenden BIM Modell ist in Abbildung 41 bis Abbildung 45 gezeigt.



Abbildung 42: Die aufgenommenen 3D-Punktwolken für das BIM Modell.

Die Wege zur Datenaufnahme in MEMAP:

- Bestandsaufnahme durch Foto Dokumentation
- Bestandsaufnahme durch Lasertechnik (Punktwolken)
- Bestandsaufnahme durch GEO Daten aus dem Internet
- Bestandsaufnahme durch Behördenabfragen (Alle Sparten)
- Bestandsaufnahme durch Ablesen, aufschreiben und händische Eingabe ins BIM Modell

Folgende Bauteile wurden hierbei aufgenommen:

- Energiezentralen
 - Energieerzeuger (Kessel, Übergabestationen etc.)
 - Pumpen
 - Regelventile aller Art
 - Rohrleitungsverlauf in der Zentrale
 - Außendeckungsgefäße
- Außengelände
 - Straßenverläufe
 - Geländearten (Parkplatz, Grünstreifen, Wald etc.)
- Trassenverläufe im Gebäude in den Außenbereich zu nebenstehenden Gebäuden in die jeweiligen Energiezentrale
- Hausübergabestationen für die jeweilige Planung

Übernahme in ein BIM Modell

- Modellierung von Energiezentralen
- Modellierung von Raumhüllen der Energiezentralen
- Modellierung von Gebäudehüllen
- Modellierung von Technikräumen
- Erstellung eines ersten BIM Videomodells in einem Testgebiet

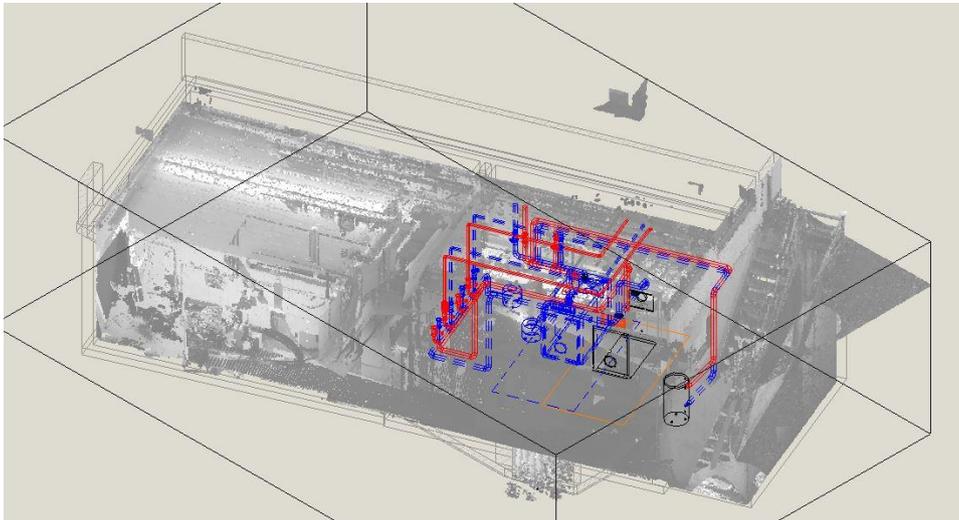


Abbildung 43: Bestandsaufnahme der Heizzentrale eines Teilnehmers – Teil 1

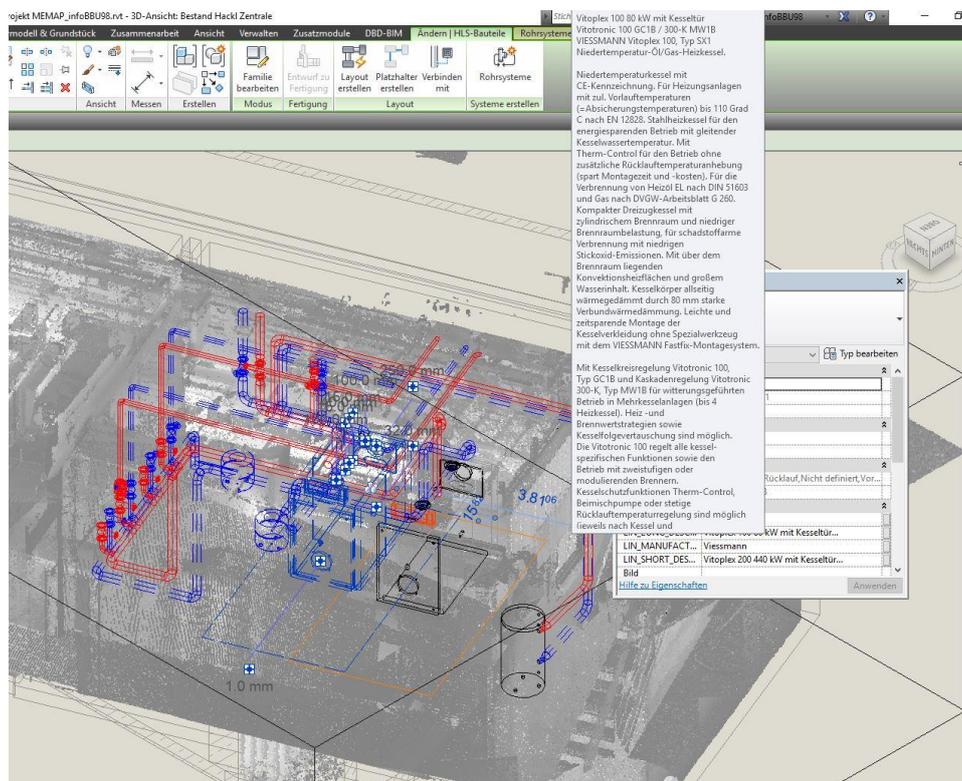


Abbildung 44: Bestandsaufnahme der Heizzentrale eines Teilnehmers – Teil 2

Die Daten wurden in REVIT (ein CAD / BIM Tool) eingepflegt und aktualisiert. Als Datenaustauschformat standen IFC-Dateien zur Verfügung. IFC-Dateien orientieren sich nach dem IFC Standard, wobei es unterschiedliche Versionierungen und Detailgrade gibt. Ein Export des

erstellten BIM Modells mittels IFC zu einem anderen BIM Tool Anbieter (Allplan) ist im Folgenden gezeigt.



Abbildung 45: Eine Sicht auf die final verfügbare MEMAP BIM-Modell Version, welche ins Allplan BIMPlus Werkzeug exportiert wurde. Neben den Gebäuden sind auch die energetisch relevanten Komponenten wie Kessel, Leitungen etc. im Modell verfügbar.

Das erstellte BIM Modell liegt am Abschluss der Datenerfassung im REVIT Werkzeug vor. Die Export Funktionalität ermöglicht eine weitergehende Nutzung der Daten auch in anderen Tools, welche wir im Folgenden genauer beschreiben.

B. BIM Daten mit dem MEMAP Datenmodell

Die Quartiersoptimierung in MEMAP benötigt einige Daten, die über die grafischen Datenpunkte hinausgehen. Insbesondere benötigt man viele technische Daten von Komponenten, wie beispielsweise die Betriebsparameter von Kessel, Wärmepumpen, BHKWs, aber auch Verbrauchsdaten für Wärme- und Stromverbräuche sind unabdingbar. Das BIM Modell musste also zum einen diese weiteren Daten enthalten. Außerdem mussten wir für externe Tool zugreifbar machen.

Um dieses Ziel zu erreichen wurden den Bauteilen, die für MEMAP relevant sind, ein zusätzliches Merkmal als Teil ihrer Eigenschaften in REVIT eingefügt. Durch die Parametrierbarkeit jedes Bauteils, konnten den Objekten spezifische Parameter verliehen werden. Diese Parameter sind in einer Text-Datei abgelegt und können als Bibliothek für beliebige Anwender benutzt werden. Für alle Anwender, die nicht Revit nutzen, müssen die Parameter neu eingelesen werden, um diese dann im IFC-Format für das Planungstool verfügbar zu machen. Das Objekt hatte unter anderem den Parameter "API-Komponententyp". D.h. alle BIM Objekte, die eine solche Eigenschaft trugen, sind für MEMAP relevant.

Als nächsten Schritt konnte den Objekten mit der MEMAP Eigenschaft alle für MEMAP relevanten Datenpunkte (siehe E1 – Datenmodell) zugeordnet werden. Der ICF Export musste dann die individuellen Eigenschaften auch exportieren, damit das BIM Modell auch in einer anderen BIM Umgebung genutzt werden konnte. Das exportierte BIM Modell war am Ende ca. 120 MB groß und hatte die Bauteile und ihre Daten wie in Abbildung 45 abgebildet hinterlegt.

Der vierte Versuch gelang schließlich. Hierfür gab es einen Kontakt zum BIMplus System der Firma Allplan. Diese konnte IFC Modelle gut importieren, hatte eine gut dokumentierte API und bot damit letztendlich erfolgreich die Möglichkeit, auf die Daten zuzugreifen. Hierfür mussten folgende Schritte durchgeführt werden: 1. Authentifizieren und Autorisieren, 2. alle Komponenten die eine Eigenschaft vom Typ "API-Komponente" haben als Liste rausgeben lassen, 3. die Liste mit den IDs einzeln im System abfragen. Das Ergebnis war eine Liste mit Objekten, die nun leicht in das Planungswerkzeug geladen werden konnten.

Die Durchgängigkeit mit BIM und dem MEMAP Szenario im Planungsprozess konnte somit erfolgreich gezeigt werden. Lediglich die gemessenen Lastprofile waren nicht im BIM nicht hinterlegt. Die Zähler konnten jedoch genau markiert und über das Sauter System theoretisch nachgeladen werden. Das war allerdings über das Planungswerkzeug schon zuvor gezeigt worden.

D. Live-Daten im BIM Modell

Im Zuge der Projekt-Verlängerung und in Zusammenarbeit mit den Entwicklern einer Data-Rig-Plattform konnte ein zusätzlicher, besonders für IBDM interessanter Use Case durchgeführt werden, bei dem die Live-Verbrauchsdaten direkt im BIM Model bzw. auf der BIM Plattform angezeigt werden konnten. Hierfür bot die MEMAP Plattform mit den vorhandenen OPC-UA-Schnittstellen die perfekte Grundlage. Die Data-Rig-Plattform konnte dazu also in Form eines OPC-UA-Clients erweitert werden, welcher die Daten des MEMAP-OPC-UA-Server mittels Publish-Subscribe abfragen konnte. Der Datenfluss ist unten in Abbildung 46 gezeigt.

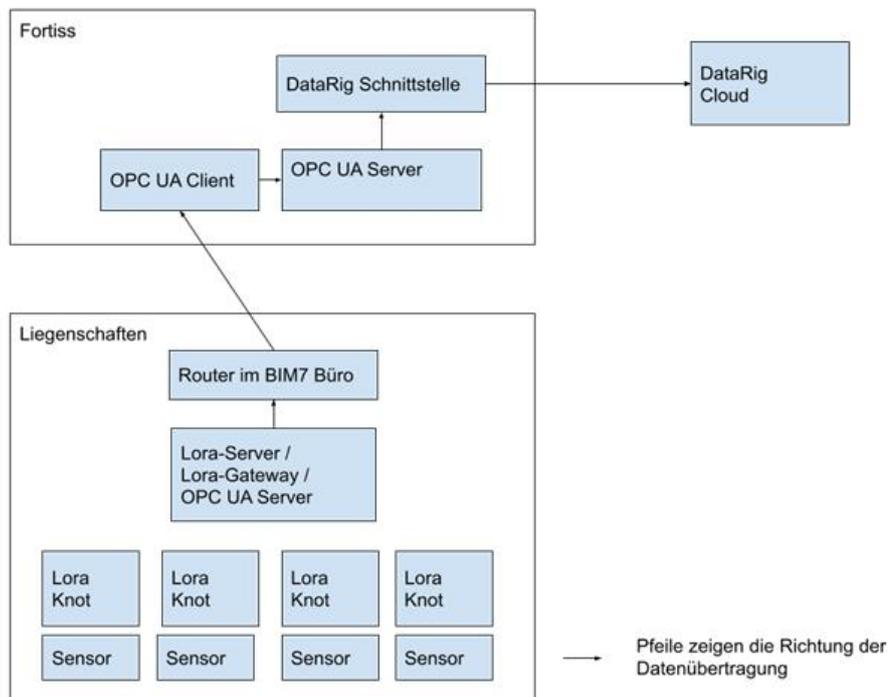


Abbildung 47: Datentransfer für die Live Daten Visualisierung

Anschließend konnte die Live-Visualisierung auf die Daten auf der Data-Rig Plattform zugreifen und diese als Label an einem beliebigen Punkt im BIM Modell anzeigen. Wie in Abbildung 47 dargestellt, konnten die aufgezeichneten Daten auch in einem Dashboard angezeigt und über verschiedene Zeiträume analysiert werden. Dieses Werkzeug ist vor allem für die Bestandsmessanalyse interessant und kann die Planung der MEMAP Umgebung deutlich vereinfachen. So können Lastspitzen leichter identifiziert, Ergebnisse transparent verdeutlicht und Messdatenausfälle über Alarmmeldungen schnell erkannt werden. Zudem ist die Plattform unabhängig von der Art der BIM-CAD-Software, die verwendet wird, da der Export über die IFC-Schnittstelle möglich ist. Außerdem bestünde die Möglichkeit diese Messdaten ebenfalls wieder für dritte Anwendungen zu exportieren.

Diese Art des Exportes konnte aber nicht mehr im Projekt umgesetzt werden und kann Bestandteil eines erweiterten ganzheitlicheren Systemansatzes sein.

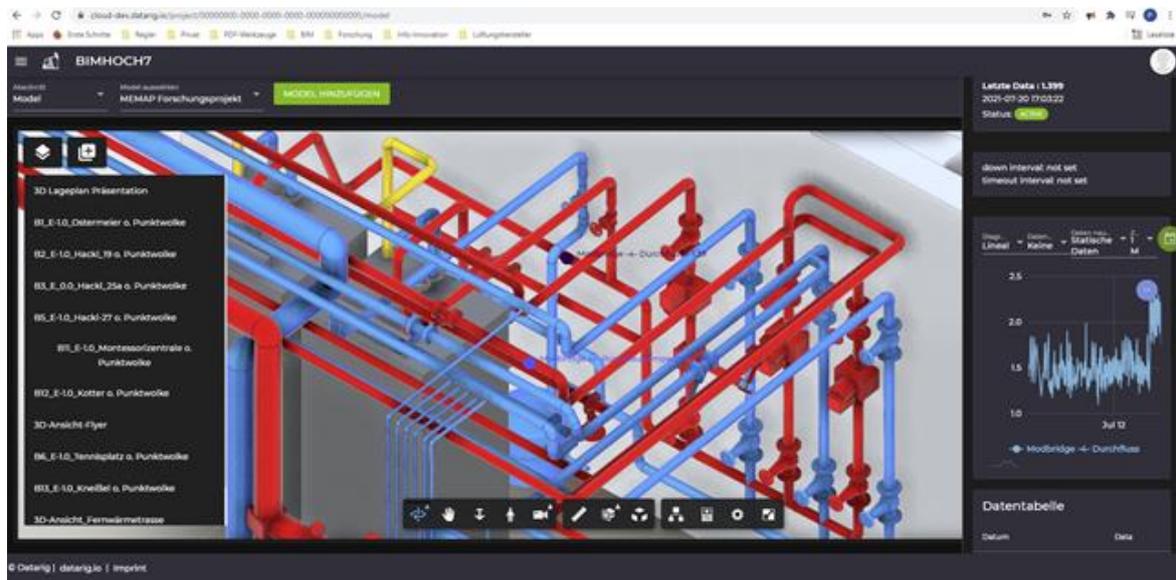


Abbildung 48: Sensoren im Modell, Live-Daten und Historie

(E5) Planungswerkzeug und Simulationen

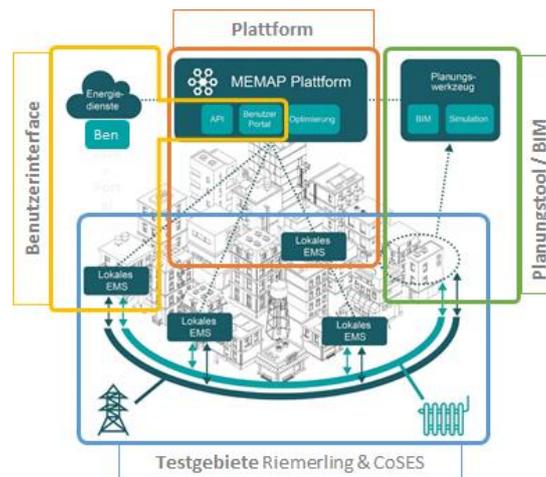


Abbildung 49: Übersicht Projektbereiche

Das Planungswerkzeug (grüner Kasten in Abbildung 48) war ein zentraler Teil des Projekts. Es diente vor allem dazu die grundlegende Idee von MEMAP auf einer Simulationsbasis zu demonstrieren, um die Funktionalität und Fehlerfreiheit der Algorithmen zu testen, die Algorithmen früh im Projekt zu evaluieren, Testszenarien zu fahren, Datenpunkte und das Datenmodell zu verfeinern und vieles mehr. Das Planungswerkzeug wurde als Frontend im Nicht-Live-Betrieb verwendet, damit schnelle Analysen durchgeführt werden können, wie beispielsweise Wirtschaftlichkeitsberechnungen, oder um potenziellen Verwertungspartner die Fähigkeiten und Einsparpotentiale von MEMAP zu demonstrieren. Außerdem diente uns das Planungswerkzeug als Instrument, um die Durchgängigkeit mit BIM zu demonstrieren.

Das Werkzeug wurde in vielen Demonstrationen und bei Workshops präsentiert (siehe auch E8). Im Folgenden beschreiben wir die Hauptfunktionalitäten vom Planungswerkzeug und zeigen anhand von Screenshots, wie man das Tool bedienen kann.

A. Funktionsübersicht, Systemarchitektur

Das Planungstool in MEMAP ist eine grafische Oberfläche oder GUI (Graphical User Interface), die einen benutzerfreundlichen Zugriff auf die gebäudeübergreifende Multi-Energie-Simulation ermöglicht. Wie bereits in E1.A beschrieben, geschieht das über Anbindung an den Simulationskern der MEMAP Plattform.

Das Planungstool verwendet dafür dieselben Anlagenklassen wie die Plattform und bietet einen Layout-Bereich (siehe Abbildung 49) in dem die zu simulierende Konfiguration vom Benutzer angelegt werden kann. Dies geschieht im Wesentlichen in denselben Hierarchie-Stufen wie in Abbildung 10 (Gebäude/EMS und darunter Anlagen) durch Drag&Drop aus der linken Werkzeuggeste.

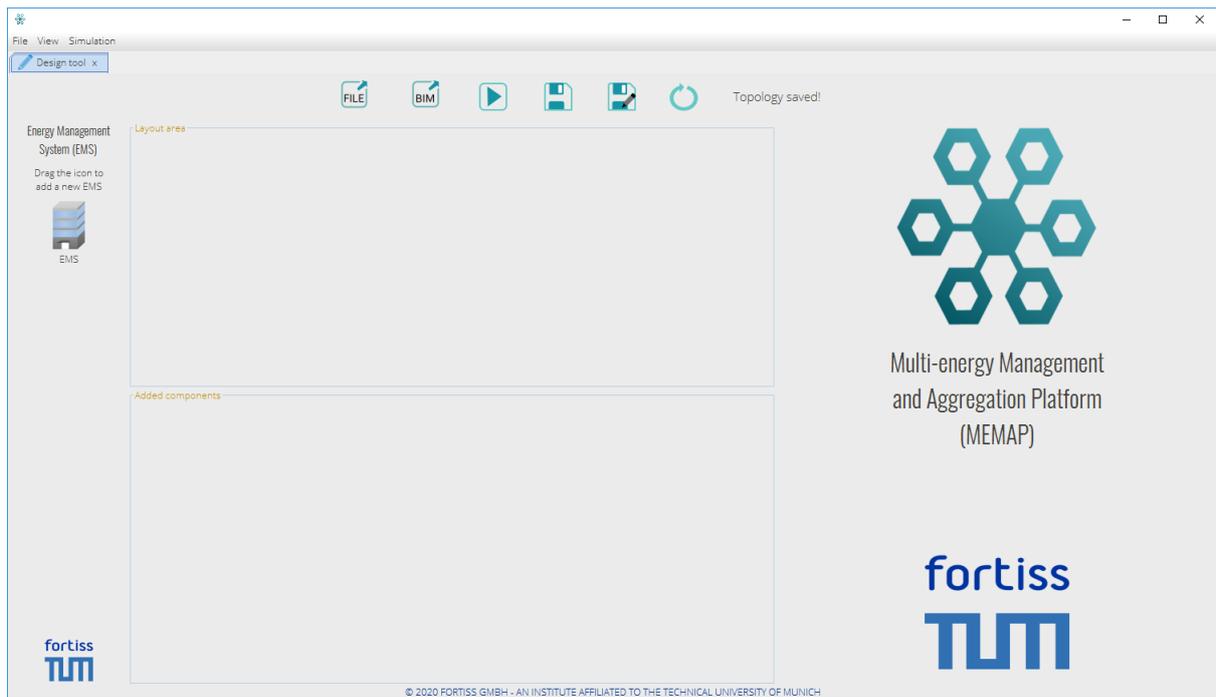


Abbildung 50: Startbildschirm der Benutzeroberfläche des MEMAP Planungstools

Sobald ein Element in den Layoutbereich gezogen und angeklickt wurde, erscheint auf der rechten Seite ein Konfigurationsfenster, in dem alle notwendigen Daten in den entsprechenden Feldern hinterlegt werden können. Für die zeitvariablen Inputs (siehe E1.B) werden die Dateipfade zu den entsprechenden Zeitreihen angegeben. Dies geschieht benutzerfreundlich durch Navigation im Explorer, wie man es von anderen Anwendungen kennt. Allerdings ist darauf zu achten, dass das Format der hinterlegten CSV Dateien, den Vorgaben entspricht, die im Konfigurationsfenster als Beispiel angegeben werden (siehe Abbildung 50). Nach dem erfolgreichen Verlinken können die Dateien direkt im Planungstool visualisiert werden, um zu testen, ob das Format vom Programm lesbar ist. Die Zeitschrittlänge spielt dabei keine Rolle, sondern wird entsprechend den Angaben der Simulationsparameter vor der Simulation interpoliert.

i. Anwendungsbeispiel

In Abbildung 50 ist zu sehen, wie von einem Benutzer sechs Gebäude aus dem Testgebiet Riemerling in den Layout-Bereich gezogen wurden und diese per Mausklick und Ziehen mit einem Wärmenetz verbunden wurden. Die Eigenschaften dieser Verbindungen (Länge, Verluste, Maximalleistung) können dabei beim Draufklicken in einem kleinen Popup-Fenster eingestellt werden. Sobald ein Gebäude in der Layout-Area angeklickt wird, verändert sich die linke Leiste im Planungstool und es ist möglich dem Gebäude Anlagen und einen Verbrauch zuzuordnen. Die Anlagen müssen wie oben beschrieben dann noch parametrisiert werden. Beim Verbrauch wird wieder ein Lastprofil hinterlegt, wobei sich hier Wärme und Stromverbrauch in verschiedenen Spalten der gleichen Datei befinden.

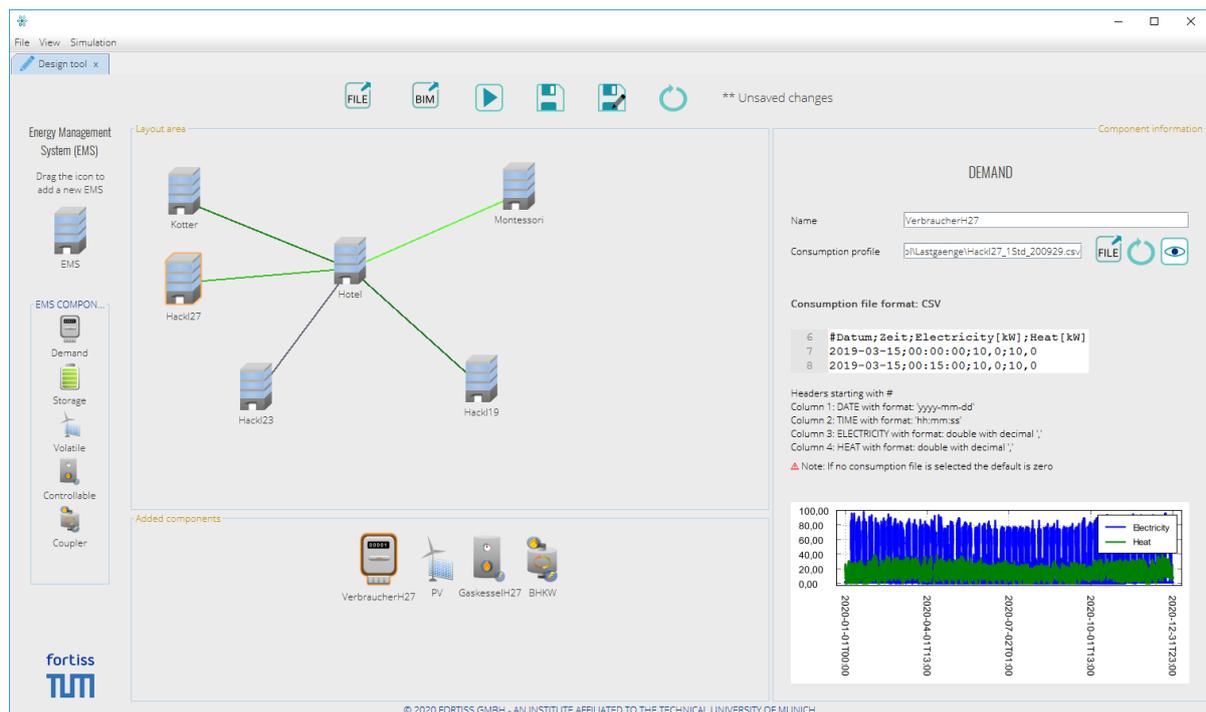


Abbildung 51: Simulation eines vernetzten Quartiers mit dem MEMAP-Planungswerkzeug

In der oberen Menüleiste befinden sich weitere Funktionen des Planungswerkzeugs. Hier kann eine Konfiguration aus der Layout-Area gespeichert oder geladen werden. Bei „Speichern“ bzw. „Speichern unter...“ (Symbole mit Diskette) wird dazu lokal ein JSON erzeugt und abgelegt, welches alle bereits eingegebenen Informationen enthält und zu einem späteren Zeitpunkt wieder geladen werden kann. Für das Laden einer Konfiguration gibt es im Planungstool eine weitere Möglichkeit, und zwar das Importieren aus einem BIM-Modell, was ausführlich im vorigen Abschnitt (E4).K beschrieben wurde und was wir in einem Video demonstriert haben. Der Link zum Video ist rechts als QR-Code eingefügt.



Hat man nun sein Simulationsszenario erstellt, kann man in der Menüleiste über den Play-Button zu den globalen Simulationseinstellungen wechseln, die in Tabelle 13 dargestellt sind. In Abbildung 51 sind diese im rechten Fenster zu sehen und beinhalten die Eingabe für Länge des MPC Horizont, der Art des Lösungsalgorithmus, sowie den Zeitraum und die Zeitschrittweite/Auflösung der Simulation. Weiter unten können Preise für den Netzbezug und dessen Emissionswerte hinterlegt werden. Es ist aber auch möglich variable Preisentwicklungen abzubilden, um zu simulieren, wie MEMAP dann vorausschauend seine Speicher be- und entladen würde. Der zeitliche Bereich, den MEMAP bei jedem Simulationsschritt sieht, wird dabei über den MPC Horizont (in Zeitschritten, vgl. Zeitschrittlänge) angegeben und wird für jeden Simulationsschritt entsprechend aus den hinterlegten Preiskurven und Lastprofilen herausgeschnitten. Je nach Länge des angegebenen Horizonts, kann hier bei jedem Schritt also besser oder schlechter vorausgeplant werden. Auf diese Weise kann mit Hilfe des Planungswerkzeugs das einzigartige vorausschauende Verhalten simuliert werden, welches im Live-Betrieb durch die dann verfügbaren Vorhersagen und Prognosen möglich wäre. Dabei wird im Planungswerkzeug indirekt immer von korrekten und genau so eintreffenden Vorhersagen ausgegangen.

Tabelle 14: Tabelle mit allen globale Optimierungsparameter für den MEMAP Optimierungskern.

Parameter	Auswahlmöglichkeiten		
ALGORITHMUS	LINEAR PROGRAMING (LP)		MIXED INTEGER LINEAR PROGRAMING (MILP)
WÄRMEVERBINDUNG	VERLUSTFREI	WÄRMENETZ	KEINE
MPC SCHRITTGRÖSSE	BELIEBIG EINSTELLBAR		
MPC HORIZONTWEITE	BELIEBIG EINSTELLBAR (INT)		
OPTIMIERUNGSZIEL (MIN.)	KOSTEN		CO ₂ EMISSIONEN
SOLVER	LP SOLVE (kostenfrei)		
EINKAUFSPREIS (STROM)	FEST	ZEITABHÄNGIG	
VERKAUFSPREIS (STROM)	FEST	ZEITABHÄNGIG	
EINKAUFSGRENZE (STROM)	FEST	ZEITABHÄNGIG (HLZF)	
EINKAUFSPREIS (GAS)	FEST	ZEITABHÄNGIG	
EMISSIONSFAKTOR (NETZSTROM)	FEST	ZEITABHÄNGIG	

Für die Einstellung der Simulationsparameter im Live-Betrieb, kann ebenfalls das Planungswerkzeug verwendet werden. Analog zu der Wärmenetztopologie können diese über das Planungswerkzeug konfiguriert und per JSON-File exportiert werden, um die Einstellungen für den Live-Betrieb zu übernehmen.

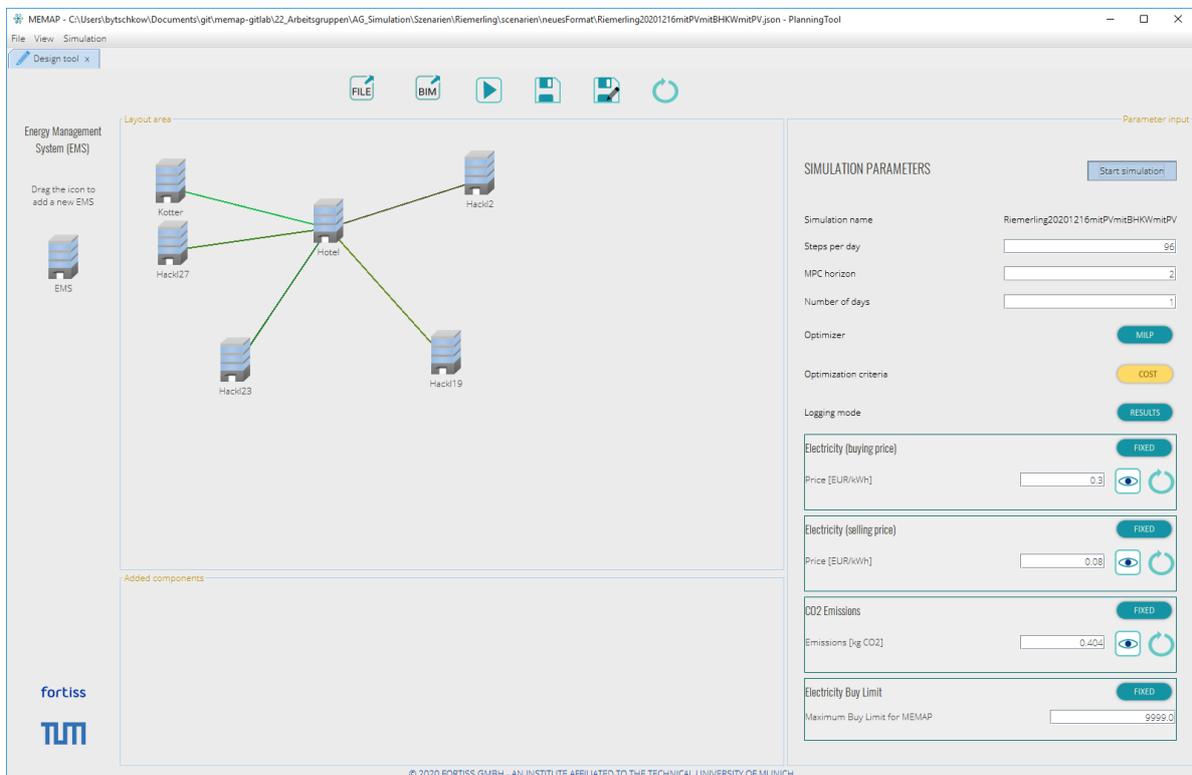


Abbildung 52: Einstellung der Simulationsparameter über die Benutzeroberfläche

Sind alle Simulationsparameter eingestellt, kann die Berechnung über den entsprechenden Button gestartet werden. Es ist wichtig zu wissen, dass die Simulation immer für jedes vorhandene Gebäude einzeln und dann zusätzlich für alle Gebäude im Verbund durchgeführt wird. Dies hat den Nachteil, dass die Simulation nur erfolgreich durchläuft, wenn jedes Gebäude theoretisch auch die Anlagenleistung besitzt, um seinen eigenen Bedarf zu decken. Der Vorteil an dieser Methodik besteht aber darin, dass der optimierte Betrieb der einzelnen Gebäude (mit demselben Algorithmus) als Referenz genommen werden kann, um die Einsparungen einer Verbund-Optimierung zu quantifizieren. Hätte man nur die Ergebnisse der Quartiersoptimierung, könnte keine Aussage darüber getroffen werden, ob diese dem Gebäudeverbund nun einen energetischen, monetären oder klimarelevanten Vorteil bringen würde.

Nach einer kurzen Zeit mit Ladebalken erscheinen dann die Ergebnisse in zwei zusätzlichen Reitern über der Menüleiste, womit dann die insgesamt drei Segmente sichtbar sind:

- Design Tool
- Results Overview
- Detailed Results

Mit dem ersten Reiter kommt man wieder zurück in den Layoutbereich und kann sein Simulationsszenario anpassen. Unter dem zweiten nun aktivierten Reiter werden die wichtigsten Kennzahlen der Simulation und die Einsparungen gegenüber dem Einzelbetrieb angezeigt. Man kann sich diese, wie in Abbildung 52 gezeigt, in der linken Leiste nochmals für die einzelnen Gebäude ausgeben lassen.

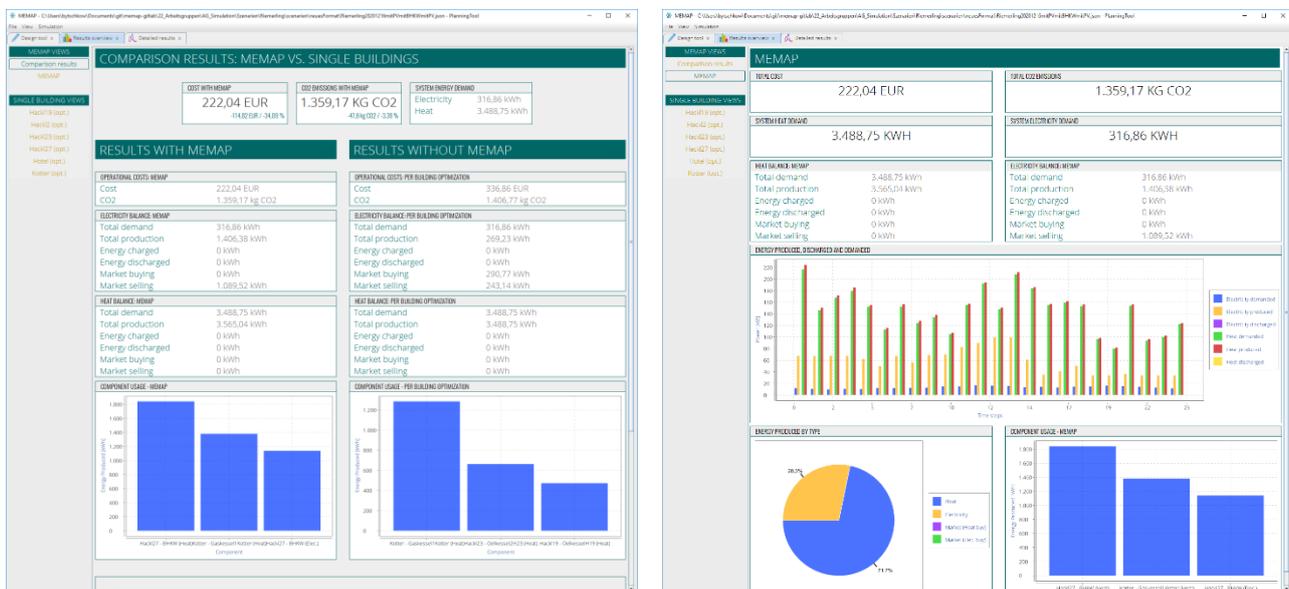


Abbildung 53: Übersicht-Ergebnisdarstellung der Planungstool-Simulation

Mit diesen detailliert aufbereiteten Ergebnissen können spannende Analysen ausgearbeitete werden, die eine weitere Ausbaustufe oder Änderungsplanung unterstützen können. Ebenso kann aber auch das Potential eines weiteren Gebäudes im Verbund somit aufgezeigt werden.

Die anlagengenauen Ergebnisse können dann unter dem Reiter ‚Detailed Results‘ gefunden werden und sind in Abbildung 53 dargestellt. Hier kann auf Anlagenebene das zeitliche Verhalten untersucht und miteinander verglichen werden. Auch die Zeitreihen der externen Faktoren (z.B. Preissignale) können hier nochmals dazu eingeblendet werden. Die Auswahl mehrere Objekte kann damit über ein Anklicken der Elemente in der linken Leiste unter Drücken der Shift-Taste erreicht werden.

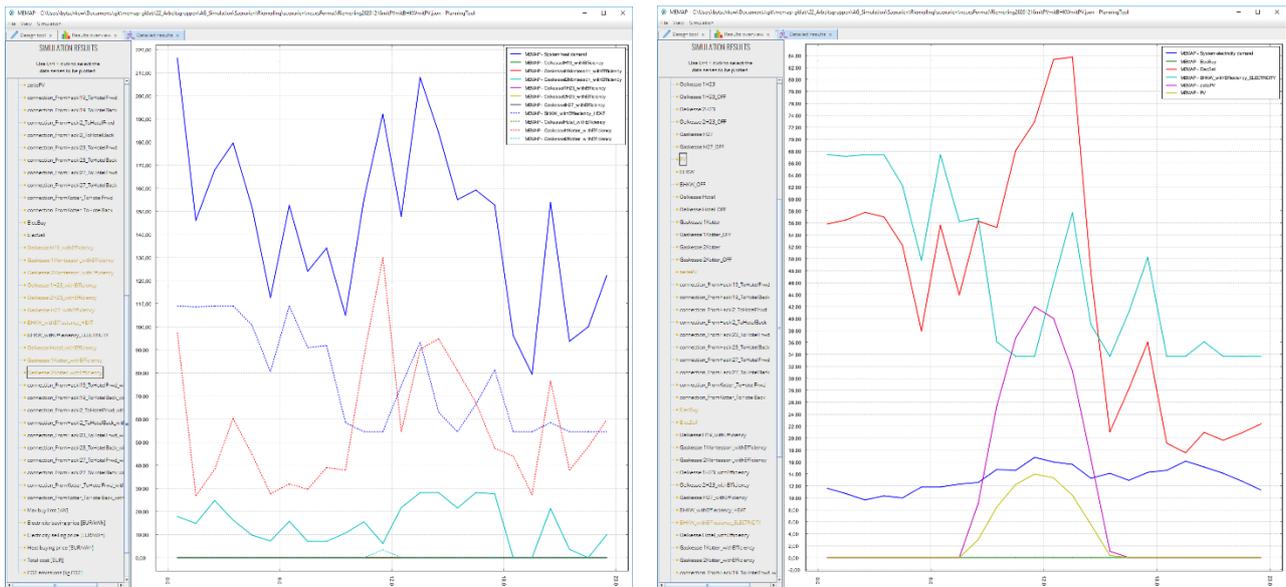


Abbildung 54: Details Ergebnisdarstellung der Planungstool-Simulation

ii. Integration von Daten aus dem Plattformbetrieb

Für den Einsatz des Planungswerkzeugs für die Erweiterungsplanung bestehender Quartiere, konnte in MEMAP mithilfe des entwickelten, einheitlichen Datenmodells eine Brücke zwischen Live-Betrieb und Planungsvorgang geschlagen werden. Sobald eine MEMAP-Instanz in einem Quartier im Einsatz ist und die Datenaggregation über OPC UA erfolgt ist, wird vor dem ersten Optimierungsvorgang die Quartiers-Topologie in ein JSON überführt (vgl. Abbildung 11). Dank des durchgängigen Datenmodells der Anlagenklassen und Ihrer Parameter (siehe E2) kann diese Datei dann vom Planungswerkzeug wie ein gespeichertes Layout geladen werden und die Konfiguration aus dem Bestand erscheint mit der korrekten Parametrierung im Layoutbereich des Planungswerkzeugs und kann für weitere realistische Planungsschritte oder für die Evaluierung des bisherigen Betriebs verwendet werden.

Diese Durchgängigkeit der Gebäude- und Anlagendaten von BIM, zum lokalen EMS per OPC UA, hin zur Benutzeroberfläche und schließlich zum Planungstool, ist eines der zentralen und wichtigsten Ergebnisse des Projekts. Es zeigt die sich durch eine einheitliche Datenbasis eröffnenden Möglichkeiten auf und war die Basis für das erfolgreiche Zusammenwirken aller von den Partnern entwickelten Komponenten.

B. Simulationen zum Anwendungsfall Energietausch

Für die Simulation des Anwendungsfalls Energietausch wurden verschiedene Settings ausgewählt und über eine im Projekt entwickelten standardisierte Szenarien-Beschreibung festgelegt, um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse zu gewährleisten. Hier wurden neben den Anlagenparametern und Lastprofilen auch die verwendeten Brennstoff- und Strompreise, Speicherstände bei Beginn und der Simulationszeitraum festgehalten. Ein Beispiel ist im Anhang unter „(A6) Beispiel Szenariobeschreibung“ angefügt.

Dabei wurden folgende Szenarien untersucht:

1. CoSES-Szenario (siehe Abschnitt E3.G) zur Vorbereitung auf die Laborexperimente
2. Zwei Häuser Modell mit volatilen Erzeugern, Speichern und Kopplern
3. Fünf Häuser Modell mit unterschiedlichen Anlagen und Wärmenetz

Das 1. Szenario wurde bereits in Abschnitt E3.G ausführlich beschrieben, weshalb im Folgenden nur kurz die Ergebnisse der Szenarien 2 und 3 im Anwendungsfall „Energietausch“ beschrieben werden.

In allen drei Szenarien wurden mit dem Verwenden der Lastprofile perfekte Prognosen angenommen: In jedem Simulationsschritt (z.B. jeder Stunde), wird mit den verfügbaren Daten für den Zeitraum des eingestellten MPC Horizonts in die Zukunft geschaut und nur mit diesen Informationen optimiert. Ein Speicher ‚sieht‘ somit in der Simulation für diesen Zeitschritt beispielsweise nur den Strompreis in diesem Horizont und anhand dessen wird festgestellt, ob er auflädt oder nicht. Nur das Simulationsergebnis des ersten Zeitschritts aus diesem Horizont wird behalten, alle anderen werden verworfen (siehe Abbildung 15).

Was bei den Simulationsläufen im Projekt also nicht berücksichtigt werden konnte, sind die Unsicherheiten und Abweichungen von realen Prognosen. Diese sind beim Strompreis für gewisse Zeiträume zwar sehr klein und zuverlässig, aber bei Vorhersagen zu solaren Erträgen und insbesondere den verhaltensabhängigen Strom- und Wärmebedarfen können diese abhängig von der Länge des Horizonts sehr groß werden. Es ist aufgrund der intrinsischen Eigenschaften von modellprädiktiven Reglern davon auszugehen, dass kleinere Vorhersagefehler zumeist gut kompensiert werden können. Der Einfluss von Vorhersagefehlern wird umso größer, je näher der Zeitpunkt, auf den sich die fehlerhafte Vorhersage bezieht am aktuellen Zeitschritt liegt. Um dieses Thema und auch die Fähigkeit des Optimierers, darauf zu reagieren, jedoch genauer zu untersuchen, hätte es eine systematische Analyse verschiedener Abweichungen bedurft, die im Projekt leider nicht bearbeitet werden konnten. Dies ist ein möglicher Anknüpfungspunkt für weitere Untersuchungen.

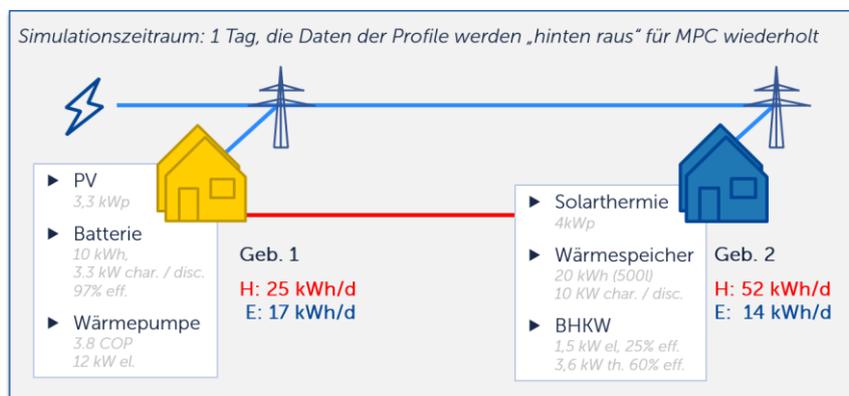


Abbildung 55: Anlagenkonfiguration und Setting für das Zwei Häuser Modell

i. Zwei Häuser Modell

Im zwei Häuser Modell sollte das grundlegende Prinzip von MEMAP, sowie die Anwendung und das Zusammenspiel der komplexeren Anlagenklassen *Volatile Erzeuger* (Solarthermie, Photovoltaik), *Speicher* (Wärmespeicher, Batterie) und *Koppler* (BHKW, Wärmepumpe) erprobt und für einen Tag (24 Std = 96 Zeitschritte) simuliert werden. Die Übertragung von Wärme und Strom wird in diesem Szenario zur Vereinfachung als unbegrenzt und verlustfrei angenommen. Die Anlagen wurden dabei so auf die zwei Häuser aufgeteilt, dass eines vermehrt Stromtechnologien (Geb. 1) und das andere Wärmetechnologien (Geb. 2) besaß. Die Anlagen und Parameter sind in Abbildung 54 dargestellt. Wie am Anfang dieses Abschnitts beschrieben, wurde für jedes Haus einzeln zunächst eine Optimierung auf Gebäudeebene durchgeführt, um zu simulieren, wie jedes Haus seinen eigenen Wärme- und Stromverbrauch am kosteneffizientesten mit den eigenen Anlagen und Erzeugungs- und Lastprognosen decken könnte. Es ist zu erwarten, dass dies durch das damit verbundene

vorausschauende Lademanagement der Speicher bereits eine Verbesserung zum Standardfall im Bestand darstellt. Betrachtet man die Simulationsergebnisse für die Stromseite für Gebäude 1 in Abbildung 55, bekommt man einen Eindruck davon, wie komplex das zeitliche Zusammenspiel verschiedener Anlagen allein für den Sektor Strom sein kann. Da eine Analyse auf diesem Level für mehrere Gebäude und größere Zeiträume nicht mehr handhabbar wird, wurde das 2-Häuser Modell im Projekt vor allem zur Plausibilitätsprüfung der Optimierungsergebnisse verwendet.

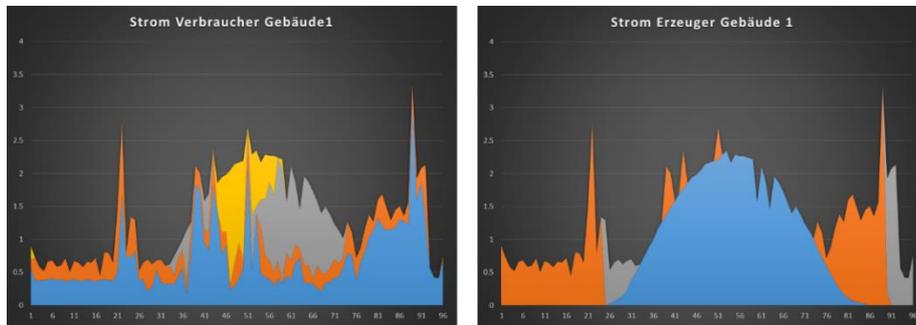


Abbildung 56: Simulationsergebnisse eines Gebäudes über einen Tag. Zeitliche Darstellung der Stromsenken (linke Abbildung): Verbrauch (blau), Wärmepumpe (orange) Batterie laden (grau), sowie der Stromquellen (rechte Abbildung): PV (blau), Batterie entladen (orange), Netzbezug (grau).

Die bilanziellen Ergebnisse für den simulierten Tag geben dagegen einen besseren Aufschluss über die grundsätzlichen Änderungen der Anlagensteuerung und sind in Abbildung 56a dargestellt: Gebäude 1 deckt seinen Wärmebedarf vollständig mit der Wärmepumpe, die damit den Stromverbrauch des Gebäudes erhöht. Dieser kann durch diesen zusätzlichen Verbrauch nicht vollständig durch Photovoltaik und Batteriespeicher gedeckt werden, sodass in gewissen Zeiten Strom vom Netz zugekauft werden muss (siehe Abbildung 55b).

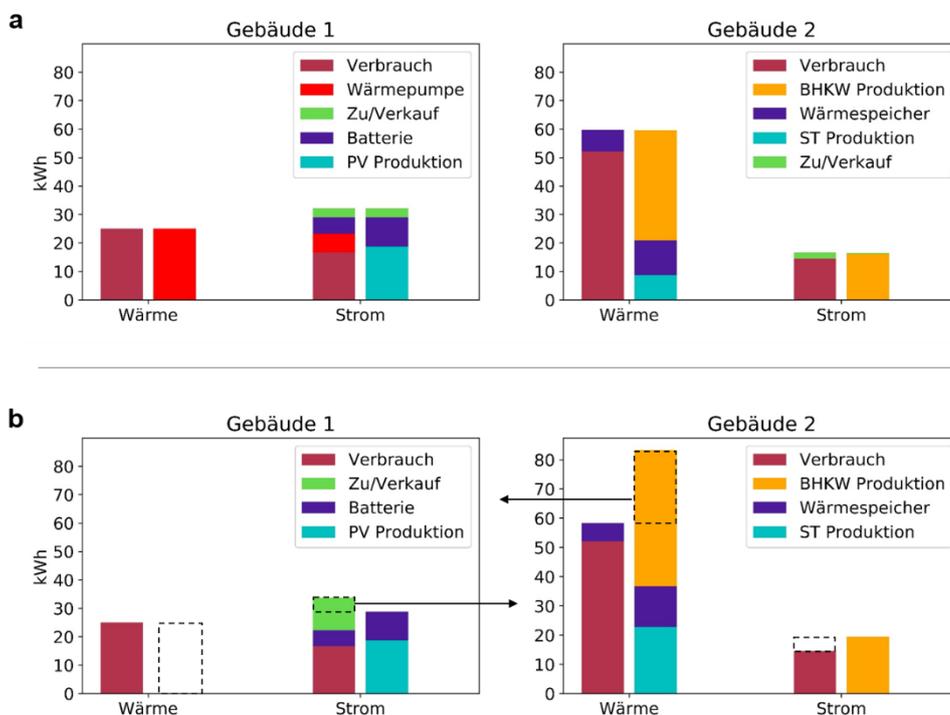


Abbildung 57: Ergebnisse der Zwei-Gebäude-Simulation über 48 Stunden a) für beide Gebäude einzeln ohne die Möglichkeit Energie zu Tauschen und b) im MEMAP Anwendungsfall Quartiersoptimierung mit Energietausch

Gebäude 2 betreibt sein BHKW (Wärme- und Stromproduktion) um seinen Strombedarf zu decken, da dies trotz eines kleinen Wirkungsgrada von 25% günstiger ist, als Strom aus dem Netz zu beziehen (4 kWh Gas ergeben hier 1 kWh Strom, kosten aber bei 5,9 ct/kWh Gas nur 23,6 ct im vgl. zum Strom mit 30 ct/kWh). Dies führt in diesem Beispiel dazu, dass die Solarthermieanlage abgeregelt werden muss, da die vom BHKW gleichzeitig produzierte Wärme zur Deckung des Bedarfs beiträgt und die Wärmespeicher schon voll sind. Gleichzeitig wird das BHKW unwirtschaftlich nur im Teillastbetrieb verwendet und läuft nicht auf voller Leistung.

In Abbildung 56b sind die bilanziellen Ergebnisse gezeigt, wenn die beiden Gebäude energetisch gekoppelt sind und MEMAP anhand der Last- und Preisvorhersagen alle Anlagen kostenoptimiert steuern würde. Es wird schnell deutlich, dass Gebäude 1 seine Wärmepumpenproduktion an diesem Tag abgeschaltet hat und stattdessen die BHKW-Wärme von Gebäude 2 nutzt. Da das BHKW jetzt sein Potential besser abrufen kann und mit der nun voll produzierenden Solarthermie auch Gebäude 1 mit insgesamt 25 kWh Wärme mitversorgt, wird von Gebäude 1 der Überschussstrom aus PV und dem BHKW-Betrieb für zusätzliche Erträge (15 ct/kWh) ans Netz oder Drittverbraucher verkauft. Somit fließen zusätzlich auch 4.89 kWh Strom von Gebäude 2 zu Gebäude 1 und die Gesamtkosten im Verbund können an diesem Beispieltag um 29% reduziert werden, allerdings mit leicht höheren CO₂-Emissionen an diesem Tag.

Effekte des Optimierungsziels

Wird bei Optimierung jedoch nach CO₂-Einsparungen optimiert, ändert sich das Bild entscheidend: Wie in Abbildung 57 zu sehen ist, wird nun die Wärmepumpe zu einem hohen Grad mit zusätzlich eingekauftem Netzstrom genutzt und Strom und Wärme werden zur Deckung des Bedarfs von Gebäude 1 an Gebäude 2 geleitet. Auf den ersten Blick ist das nicht naheliegend, da der Emissionsfaktor für 1 kWh Strom aus dem Netz mit 474 g / kWh höher ist als die 202 g / kWh des BHKW-Primärenergieträgers Gas. Da allerdings mit 1 kWh Strom in der Wärmepumpe 3,8 kWh Wärme produziert werden, ist die Nutzung der Wärmepumpe klimafreundlicher: Beim BHKW mit einem Wirkungsgrad von 65% würde bei gleicher Wärmeproduktion 5,8 kWh Gas verbraucht und demnach 1.181 g CO₂ entstehen. Wenn man den dabei erzeugten Strom (vermiedener Netzbezug) mitbetrachtet bleiben noch 489 g CO₂ für die so erzeugte Wärme und damit 15 CO₂ weniger als bei dem Betrieb der Wärmepumpe.

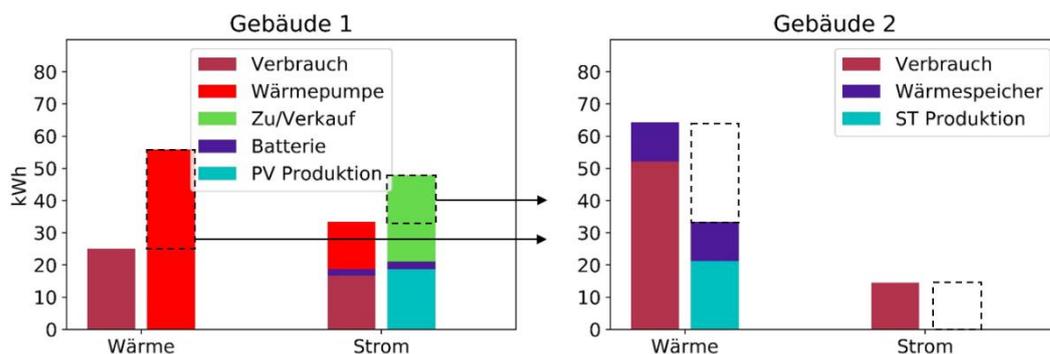


Abbildung 58: Optimierung nach CO₂-Emissionen

Dieser Effekt kann allerdings noch verstärkt werden, wenn der Emissionsfaktor des Stroms in die Planung mit einfließt. Ist es beispielsweise ein windiger Sonnentag, ist der Emissionsfaktor des Stromnetzes sehr gering und die Wärmepumpe kann klimafreundlich Energie produzieren und diese in den Wärmespeichern puffern. Die finale Version des MEMAP-Planungstools ist in der Lage, analog zu einem zeitvariablen Strompreis auch einen zeitvariablen CO₂-Faktor für den Netzbezug

zu hinterlegen. Im Betrieb der MEMAP-Plattform könnte dieser nach dem Merit-Order Prozess am Spotmarkt für die nächsten 24h ermittelt und verwendet werden.

In diesem Beispiel wird allerdings auch sehr deutlich, welchen gewaltigen Einfluss die gewählten Parameter auf die Auswahl der optimalen Anlagen hat. Eine kleine Veränderung hinter dem Komma bei Preisen und Effizienzen lassen die Entscheidung womöglich anders ausfallen. Genau deshalb bietet ein solches Planungswerkzeug eine entscheidende Hilfestellung für die Planung von Multi-Energie Quartieren und Gebäudeverbänden.

ii. Zwei Gebäude Mock-Up Server

Das Zwei-Häuser-Modell wurde aufgrund seiner vielseitigen Demonstrationswirkung als virtuelles Live-Modell implementiert. Dazu wurden in Python die zwei Gebäude-EMS nachgebildet, die alle 15 Sekunden den nächsten Wert aus den Lastprofilen und Simulationsergebnissen der Einzelgebäudesimulation simulierten, welche als CSV hinterlegt waren. Die zwei Programme liefen auf einem Raspberry Pi im projekteigenen VPN und waren mit zwei OPC-UA-Server ausgestattet. Diese stellten Daten zur Verfügung implementierten erstmals das im Projekt entwickelte Datenmodell, um die Verknüpfung zur Plattform zu testen.

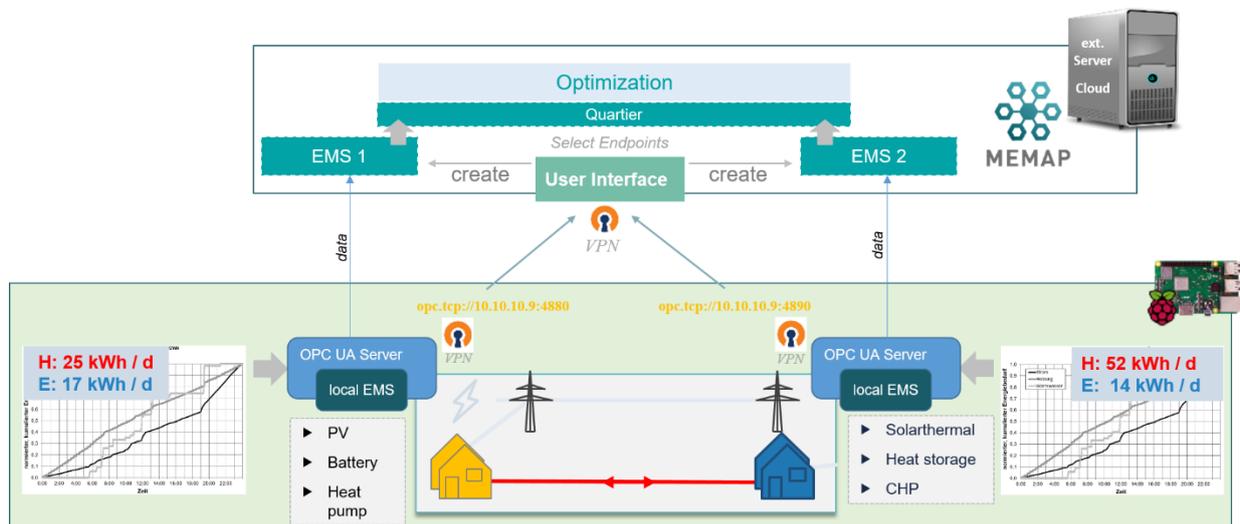


Abbildung 59: Virtualisierung des Zwei-Häuser-Szenarios auf einem Raspberry Pi Computer, der mit der MEMAP-Plattform kommuniziert und die Optimierungsergebnisse auf den virtuellen EMS umsetzt.

iii. Fünf Häuser Modell mit Wärmenetz

Am Beispiel der fünf Wohn- und Geschäftsgebäude des Testgebietes Riemerling bei München, wird nun eine deutlich komplexere, aber trotzdem realitätsnahe Anlagenkonfiguration gewählt. Es wurden entsprechend skalierte Verbrauchs- und Erzeugungsprofile verwendet, um eine erste Abschätzung des Einsparpotentials des Energieverbundes zu berechnen. Im Vergleich zu Abschnitt (E6) Fallstudie / Wirtschaftlichkeitsanalyse, wurden hier skalierte Standardlastprofile und approximierten Wärmeverbindungen angenommen, allerdings wurden als Erweiterung zum Zwei-Häuser-Modell hier erstmals nur bestimmte Wärmeverbindungen, Leitungsverluste und Obergrenzen für die über eine Wärmeleitung übertragbare Wärme berücksichtigt.

Für die Analyse werden die Ergebnisse auf Basis der Verbrauchskosten verglichen, Investitions- und Betriebskosten sind im Moment noch nicht berücksichtigt und werden ebenfalls im nächsten Abschnitt hinzugenommen. Es wird davon ausgegangen, dass die Gebäude untereinander mit einem auf das Gebiet zugeschnittenen bidirektionalen Nahwärmenetz verbunden sind und dass alle

Teilnehmer die gleiche Vorlauftemperatur benötigen. Eine vereinfachte Netztopologie und entsprechende Leitungslängen für die Berücksichtigung der Transportverluste sind in Abbildung 59a in das Satellitenbild eingezeichnet.

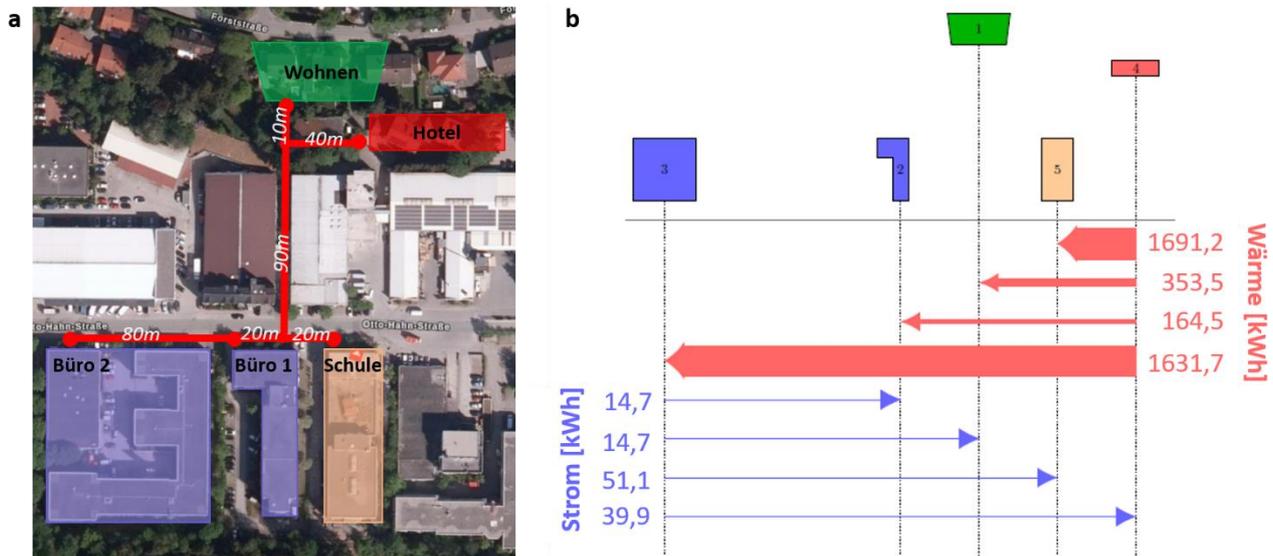


Abbildung 60: a) Energieverbund aus fünf Gebäuden mit einem bidirektionalen Nahwärmenetz. b) Der bilanzierte Energietausch zwischen den Gebäuden wählt stets die kosteneffizienteste Anlage zur Versorgung des Quartiers.

Um den Mehrwert eines mit MEMAP vernetzten Quartiers zu demonstrieren, wurden zunächst wieder die Energiekosten der einzelnen Gebäude über einen Zeitraum von 7 Tagen berechnet. Die Wärme- und Stromversorgung jedes einzelnen Teilnehmers erfolgt in diesem Fall über die eigenen Anlagen. Die Summe der Einzelkosten für eine solche jeweils eigenständige Energieversorgung der fünf Gebäude liegt bei 711,6 Euro, wie in Abbildung 60 dargestellt ist.

	1	2	3	4	5	Summe	MEMAP	
							Kosten	CO ₂
Kosten	48 €	17 €	223 €	224 €	200 €	712 €	528 € (-25,8 %)	670 € (-5,9 %)
CO ₂	126 kg	90 kg	898 kg	722 kg	680 kg	2.515 kg	2.558 kg (+1,7 %)	1.977 kg (-21,4 %)

Abbildung 61: Summe der Einzelkosten nach Optimierung auf Gebäude-Ebene verglichen mit den Kosten im Energieverbund mit Optimierung durch MEMAP (relative Änderungen in grau).

Mit dem Planungswerkzeug kann nun der Energieverbund der fünf Gebäuden analysiert werden. Die zeitgesteuerte intelligente Vernetzung durch MEMAP optimiert den Einsatz der zur Verfügung stehenden Energieerzeuger unter Verwendung des Nahwärmenetzes. Aus Abbildung 59b wird ersichtlich, wie die sehr effiziente Wärmeversorgungsanlage des Hotels im betrachteten Zeitraum in Summe mehr in das Wärmenetz einspeist als die anderen Teilnehmer. Gleichzeitig kann das im großen Bürogebäude sitzende BHKW im selben Zeitraum netto überschüssigen Strom an die Teilnehmer liefern. Wie in Abbildung 60 auf der rechten Seite zu sehen ist, können dadurch im Vergleich mit den Einzelsimulationen, mit identischen Strompreis-, Sonnen- und Verbrauchsprofilen mit dem MEMAP-System die Kosten in unserem Beispiel um rund ein Viertel auf 528,2 Euro reduziert werden. Eine ähnliche Reduktion (um mehr als ein Fünftel) kann mit einem anderen Anlagenverhalten bei einer Optimierung nach CO₂ erreicht werden.

C. Simulationen zum Anwendungsfall atypischer Netznutzung

Weitere spannende Anwendungsfälle für die Plattform MEMAP neben dem Energietausch im Verbund sind netzunterstützende Dienstleistungen, welche derzeit durchaus lukrativ für private oder gewerbliche Personengruppen sind. Es wurden in Abschnitt E1.C vor allem folgende Anwendungen genauer untersucht und mit konkreten Stakeholdern besprochen:

- Regelleistung
- Lastspitzenkappung
- Atypische Netznutzung (Hochlastzeitfenster)
- Anheben der Betriebsstunden

All diese Anwendung basieren darauf, dass eine Dienstleistung an den Netzbetreiber erbracht wird, welche sich netzunterstützend auswirken und daher auch vergütet wird. Im Folgenden wird auch mit Hilfe des MEMAP Planungswerkzeugs die atypische Netznutzung genauer betrachtet.

i. Grundsätzliche Betrachtung atypischer Netznutzung und Hochlastzeitfenster

Die atypische Netznutzung im Hochlastzeitfenster beschreibt die gezielte Lastreduzierung zu Zeiten, in denen das Stromnetz überdurchschnittlich belastet wird. Diese Zeiten sind abhängig von Werktag, Jahreszeit und Netzebene. Als Anschauungsbeispiel dienen die vom Bayernwerk vorgegebenen Hochlastzeitfenster (nachfolgend „HLZF“ genannt), welche in Tabelle 14 hinterlegt sind. Die Bestimmung dieser Hochlastzeitfenster ist im Beschluss BK4-13-739 der Beschlusskammer 4 der Bundesnetzagentur geregelt und wird individuell von den Netzbetreibern für jedes Jahr errechnet und im Internet veröffentlicht.⁴²

Um die atypische Netznutzung in Anspruch zu nehmen, muss beim Netzbetreiber ein entsprechender Antrag gestellt werden. Dieser wird nur bewilligt, wenn drei Voraussetzungen erfüllt werden: Bagatellgrenze, Mindestverlagerungspotential und Erheblichkeitsschwelle.

⁴² Birkeneder, D., *Konzeptionierung und Implementierung einer Software zur bedarfsgerechten Dimensionierung von Batteriespeichersystemen*. Deggendorf: Technische Hochschule Deggendorf (2020).

Tabelle 15: Hochlastzeitfenster Bayernwerk 2020

Hochlastzeitfenster 2020			
Netzebene	Jahreszeit	Zeitraum	
HöS/HS	Frühling		
	Sommer		
	Herbst	07:15 - 13:30 Uhr,	15:30 - 19:00 Uhr
	Winter	07:15 - 08:45 Uhr,	09:45 - 10:00 Uhr, 17:45 - 19:00 Uhr
HS	Frühling		
	Sommer		
	Herbst	16:15 - 19:00 Uhr	
	Winter	08:00 - 10:00 Uhr,	17:00 - 19:15 Uhr
HS/MS	Frühling		
	Sommer		
	Herbst	08:00 - 09:00 Uhr,	10:30 - 11:45 Uhr, 16:15 - 19:00 Uhr
	Winter	07:30 - 10:00 Uhr,	16:45 - 19:15 Uhr
MS	Frühling		
	Sommer		
	Herbst	16:45 - 19:00 Uhr	
	Winter	08:00 - 09:00 Uhr,	16:30 - 19:30 Uhr
MS/NS	Frühling		
	Sommer		
	Herbst	17:15 - 18:30 Uhr	
	Winter	17:00 - 19:30 Uhr	
NS	Frühling		
	Sommer		
	Herbst	17:30 - 18:30 Uhr	
	Winter	17:00 - 19:30 Uhr	

Bagatellgrenze

Die Bagatellgrenze beschreibt den minimalen finanziellen Effekt. Die Einsparungen durch die atypische Netznutzung müssen sich auf mindestens 500 € im Jahr belaufen. Sind sie geringer, so wird eine Wirtschaftlichkeit durch die zu erbringenden Bearbeitungskosten der Antragsstellung und Bewilligung gefährdet.⁴²

Mindestverlagerungspotential

Um eine signifikante Lastverschiebung zu erreichen, wurde ein Mindestverlagerungspotential von 100 kW festgelegt. Dies bedeutet, dass die Differenz zwischen der allgemeinen Jahreshöchstlast und der Höchstlast im Hochlastzeitfenster nicht geringer als 100 kW betragen darf. Dadurch wird eine Nutzung für kleinere Unternehmen unter 300 kW Jahreshöchstlast erschwert, da eine derart große Lastverschiebung meist nicht möglich ist. Für Unternehmen mit Jahreshöchstlasten unter 100 kW wird die atypische Netznutzung völlig ausgeschlossen.

2016 wurde im Rahmen des Gesetzesentwurfs BK4-13-739A01 in der Beschlusskammer 4 diskutiert, das Mindestverlagerungspotential auf 1000 kW anzuheben, um eine zu großflächige Ausbreitung der atypischen Netznutzung zu vermeiden, da der wirtschaftliche Aspekt dahinter den eigentlichen Zweck der Netzbelastungsreduktion in den Schatten stellte. Der Entwurf wurde jedoch vorerst zurückgestellt. Sollte er zu einem späteren Zeitpunkt wieder aufgenommen werden, so würde ein Großteil der derzeitigen Nutzer die Voraussetzungen nicht mehr erfüllen.⁴²

Erheblichkeitsschwelle

Als dritte Voraussetzung muss die Erheblichkeitsschwelle überschritten werden. Die Funktionsweise ist ähnlich zum Mindestverlagerungspotential, allerdings ist die Erheblichkeitsschwelle abhängig von

der Netzanschlussebene und wird prozentual berechnet. Die entsprechenden Schwellen sind in Tabelle 15 hinterlegt.⁴²

Tabelle 16: Erheblichkeitsschwellen

Netz-/Umspannebene	Erheblichkeitsschwelle
Höchstspannung	5 %
Höchstspannung/Hochspannung	10 %
Hochspannung	10 %
Hochspannung/Mittelspannung	20 %
Mittelspannung	20 %
Mittelspannung/Niederspannung	30 %
Niederspannung	30 %

Die Schwelle beschreibt analog zum Mindestverlagerungspotential, die Differenz zwischen Jahreshöchstlast und Höchstlast im Hochlastzeitfenster, in Abhängigkeit von der Jahreshöchstlast:

$$\text{Erheblichkeit} = \frac{\text{Jahreshöchstlast} - \text{Höchstlast im HLZF}}{\text{Jahreshöchstlast}} * 100 \%$$

Die benötigten Werte sind ebenso wie bei der normalen Lastspitzenkappung die Mittelwerte der 15-Min-Schritte des Jahresverbrauchslastgangs. Während das Mindestverlagerungspotential eine Einschränkung für kleinere Betriebe darstellt, so ist die Erheblichkeitsschwelle eine Problemstellung für größere Industriebetriebe > 1000 kW. Derart große Verbraucher haben meist einen gleichmäßigen Strombezug aufgrund von Gegebenheiten wie dem Gleichheitsfaktor, Mehrschichtbetrieben, Lastmanagementsystemen, etc. Dadurch wird es häufig problematisch, die Erheblichkeitsschwelle zu überschreiten.⁴²

Die atypische Netznutzung mit einem Energiespeichersystem

Die atypische Netznutzung kann zum Beispiel über einen Energiespeicher abgedeckt werden. Dazu wird der Energiefluss am Netzanschlusspunkt gemessen und sobald der Bezug eine vordefinierte Leistungsgrenze während des Hochlastzeitfensters überschreitet, die Differenz zu der Batterie ausgegeben. Diese Funktion wird bei FENECON z.B. über ihr eigenes Energiemanagementsystem umgesetzt. Mit der MEMAP Plattform ergibt sich die Möglichkeit weitere Erzeuger und Verbraucher detaillierter einzubinden und Prognosen zu verarbeiten.

Mit einem Energiespeichersystem kann Energie im Hochlastzeitfenster gezielt ausgegeben werden, um die Bezugsleistung zu verringern. Ebenso kann Energie außerhalb der Hochlastzeit bezogen werden, um die Jahreshöchstlast zu erhöhen und die Voraussetzungen Mindestverlagerungspotential und Erheblichkeitsschwelle zu erfüllen.

Im Energiemanagement müssen die Hochlastzeiten eingetragen werden, um den Betrieb zu ermöglichen. Dafür gibt es die entsprechende FENECON FEMS-App „Hochlastzeitfenster“. Der technische Aufbau unterscheidet sich nicht zur allgemeinen Lastspitzenkappung. Auch die Optimierung über Schwellwertsteuerung & Lademanagement kann unverändert implementiert werden, um Grenzfälle des Batteriespeichers abzudecken.

Werden alle Voraussetzungen erfüllt und der Antrag auf atypische Netznutzung ist bewilligt, so wird das Leistungsentgelt des betreffenden Jahres nicht anhand des Leistungspreises und der Jahreshöchstlast ermittelt, sondern stattdessen aus dem Produkt aus Leistungspreis und Höchstlast im Hochlastzeitfenster. Da diese Fenster selten über das ganze Jahr und nie über den kompletten Tagesverlauf anfallen, sind die Anforderungen an einen Energiespeicher, welcher die gleichen Einsparungen wie in der klassischen Lastspitzenkappung erreichen soll, geringer. Auch die kombinierte Verwendung einer zweiten Anwendung wie beispielsweise der Eigenverbrauchsoptimierung kann in Betracht gezogen werden.⁴²

ii. Notwendige Daten

Um diese Anwendung gezielt im Planungstool darstellen zu können, wurde zunächst geklärt, welcher Input zur Datenerfassung notwendig ist:

Allgemeine Daten

Die Allgemeinen Daten werden als optional gesehen, da diese nicht zur Berechnung herangezogen werden. Hier handelt es sich v.a. um nutzerbezogene Daten sowie den Umsetzungszeitraum und beteiligte Stakeholder.

Verbrauchs- und Produktionsdaten

Im Idealfall gibt es einen oder mehrere Lastgänge aus den letzten Jahren, welcher den zukünftig geplanten Verbrauch widerspiegelt. Sollte das nicht der Fall sein, können Standardlastgänge herangezogen werden. Als Standardlastprofil (SLP) wird eine für eine bestimmte Verbrauchergruppe repräsentative Lastverteilung im Viertelstundentakt über ein komplettes Jahr bezeichnet. Verbrauchergruppen sind beispielsweise der normale Haushalt (SLP Haushalt H0) oder eine Landwirtschaft mit Milchvieh (SLP Landwirtschaft L1)⁴³

Strompreise

Obwohl die Strompreise für die technische Simulation nicht benötigt werden, so sind sie zur Bewertung der Ergebnisse und der Betrachtung der Wirtschaftlichkeit von essenzieller Bedeutung, da sie diese entscheidend beeinflussen.

Anwendung

Im letzten Schritt benötigt man die Daten, welche spezifisch für das HLZF gebraucht werden. Dabei handelt es sich um den zuständigen Netzbetreiber sowie die Jahreshöchstlast.

Um die Simulation zunächst nachzustellen, werden konkrete Testkunden angeworben, bewertet und die Berechnungen durchgeführt. Hier mit dem Ziel, den Nutzen des Speichersystems für den Nutzer zu bewerten.

iii. Simulation mit dem Planungswerkzeug

Im Rahmen des Projekts wurde mit dem MEMAP Planungstool eine vereinfachte Simulation eines Kundenszenarios in Bezug auf das HLZF und das Verhalten des Energiespeichers durchgeführt. Um ein möglichst realistisches Szenario zu simulieren, wurde ein konkretes Kundenprojekt der Firma FENECON sowie die zugehörige Datengrundlage zur Erstellung der Rahmenbedingungen verwendet.

⁴³ BDEW, *Standardlastprofile Strom*. (3. 06 2020), <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/> abgerufen am 14.11.2021

Die Voreinstellungen sowie die Durchführung der Simulation können dem YouTube Video unter folgendem QR-Code entnommen werden:

SCAN ME



Die MEMAP-Plattform ermittelt anhand der Simulation den optimalen Betrieb des Speichersystems. In der Auswertung der Simulation können u.a. die Verbrauchskurve, die eingekaufte Energie sowie das Verhalten des Speichersystems im betrachteten Zeitfenster angezeigt werden.

Zusammenfassung des Videos

Es wird gezeigt wie das Verhalten eines Energiespeichersystems durch das MEMAP-Simulationsprogramm richtig simuliert, bzw. dargestellt werden kann.

Dafür wurden im Beispiel zwei Gebäude eingetragen. Einmal das Lager welches als Verbraucher fungiert. Hierfür wurde bereits der Verbrauchslastgang als csv - Datei eingefügt, sowie die csv der HLZF. Auf der anderen Seite wurde ein Speichersystem mit 180 kWh Kapazität eingefügt.

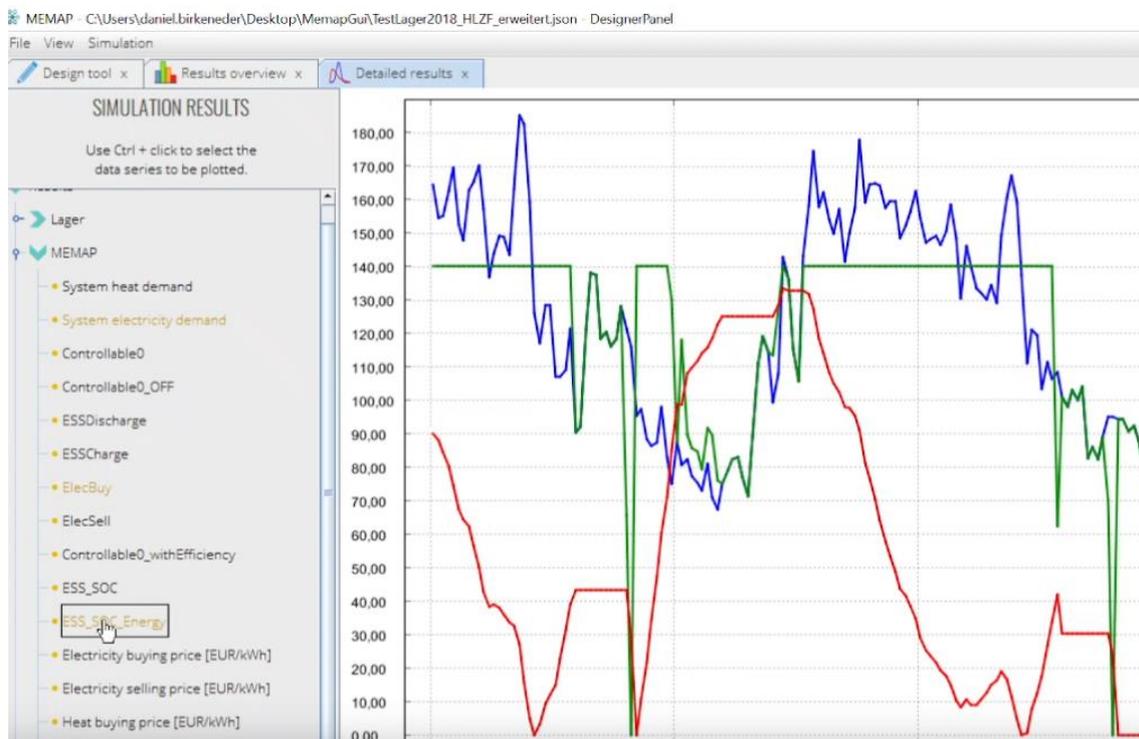


Abbildung 62: Visualisierung des Beispielszenarios HLZF in der MEMAP-Anwendung. Blau: Verbrauch, Grün: Netzbezug, Rot: Verhalten Speichersystem.

Im Video werden zwei Tage betrachtet. Das Energiemanagementsystem soll dort in den HLZF die Lastspitzen kappen sowie dazwischen den Speicher beladen und falls noch Energie frei ist, diese gewinnbringend weiter verwerten.

Abbildung 61 zeigt die Auswertung des im Video aufgezeigten Beispiels. Dabei ist die Verbraucherkurve in blau zu erkennen, der Netzbezug in grün und das Verhalten des Stromspeichersystems in der roten Linie. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Lastspitzen in den relevanten Zeiten erfolgreich gekappt werden und das Speichersystem zwischen den Zeitfenstern beladen wird.

Maßnahmen für sicheren Betrieb

Da die Dimensionierung nicht von den Lastgängen der kommenden Jahre abhängig gemacht wird, kann es in Ausnahmesituationen auch dazu kommen, dass die Batterie des Energiespeichers zu klein dimensioniert wird. Daher ist es sinnvoll verschiedene Verbraucher in einem mehrstufigen Lastmanagement abzuschalten, um die Spitzenlast zu senken. Konkret bieten sich hier an geplante Ladesäulen an, da sich dabei im schlimmsten Fall die Beladung des E-Autos lediglich verzögert. Allerdings kann man auch andere, nicht kritische Verbraucher, in Betracht ziehen, wie beispielsweise aktive Kühlungen, Klimaanlage und elektrische Heizungen, welche für geringe Zeiten heruntergeregelt oder ausgeschaltet werden können. Natürlich ist dies nur eine Empfehlung der FENECON und kein Ausschlusskriterium.

iv. Fazit

Die Anschaffung eines Batteriespeichers ist eine mögliche Lösung, um atypische Netznutzung zu betreiben. Durch die Durchführung der atypischen Netznutzung kann eine relevante Einsparung im Netzentgelt erzielt werden.

Da sich die Energiebranche im Wachstum befindet, werden regelmäßig Gesetze und Vorschriften, welche den Betrieb sowohl von erneuerbaren Energieerzeugern als auch von Energiespeichern bestimmen, geändert und erweitert. Um auf diese Änderungen flexibel reagieren zu können, ist es von Vorteil, ein dynamisches Planungstool sowie Steuerungen zu installieren, da dadurch mehrere Erzeuger und Verbraucher angepasst und integriert werden können und an die neuen Gegebenheiten optimal angeglichen werden können.

Aus Sicht der FENECON liegt der große Mehrwert des Planungstools in der zeitlichen Begrenzung. Mit dem Planungstool kann z.B. eine Anwendung für zwei Stunden betrachtet werden und in den nächsten Stunden kann bereits eine andere Anwendung im Fokus stehen. Entscheidet sich ein Kunde beispielsweise zur Anwendung Hochlastzeitfenster ist diese oft nur einige Stunden am Tag relevant. Für die nachfolgenden Stunden, wird das Energiemanagementsystem des Speichersystems vorgeben, dass dieser sich wieder belädt, um für das nächste Zeitfenster bereit zu stehen. Mithilfe der Simulation kann geprüft werden, ob es zusätzliche Anwendungsbereiche in der Zwischenzeit gibt, bei denen das Speichersystem unterstützen kann. Zudem können auch in den Hochlastzeitfenstern zusätzliche Verbraucher oder Erzeuger mitgeregelt werden, damit der Hebel größer ist und die eine gewisse Redundanz geschaffen wird. Alles in allem ermöglicht es dem Nutzer eine intelligentere und vorausschauende Planungsgrundlage, womit die Anlagen effizienter und gewinnbringender genutzt werden können.

(E6) Fallstudie / Wirtschaftlichkeitsanalyse

A. Randbedingungen

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung einer Quartierslösung wurde anhand des Gewerbegebiets Riemerling im Südosten von München durchgeführt. Das Gewerbegebiet besteht aus einem Bürogebäude, einer Schule, einem Hotel und mehreren Produktionsbereichen und verfügt auf der Wärmeseite über vollständig autarke Gebäude ohne Vernetzung. Die Erwärmung der Gebäude erfolgt mit öl- oder gasbetriebenen Heizkesseln unterschiedlicher Bauart und Alter.

i. Installierte Anlagentechnik

Wärmeerzeuger

Die nachfolgende Tabelle 16 zeigt die Kennwerte der installierten Wärmeerzeuger im Quartier:

Tabelle 17: Allgemeine Datengrundlage: Heißwasserkessel

	Kesselart	BJ	Max . th. Leistung	Nennwirkungsgrad bez. (Hi)
Montessori	Gas-Niedertemp.kessel	1997	105 kW	70%
	Gas-Niedertemp.kessel	1991	225 kW	70%
Hotel	Öl-Brennwertkessel	2008	50 kW	80%
Hackl 19	Ölkessel	1972	537,8 kW	60%
Hackl 23/25	Ölkessel	2005	90 kW	80%
	Ölkessel	2005	250 kW	80%
Hackl 27	Gaskessel	1998	165 kW	70%
Kotter	Gas-Brennwertkessel	2005	130 kW	80%
	Gas-Brennwertkessel	2005	130 kW	80%

Für die Beschreibung des Brennstoffkonsums im Teillastverhalten wurden konstante Wirkungsgrade angenommen. Diese basieren auf Schätzungen bzw. Erfahrungswerten, wobei das Baujahr und die Kesselart berücksichtigt wurden.

Lediglich in einem Gebäude befindet sich noch eine kleine Solarthermieanlage zur Unterstützung der Warmwasserbereitung.

Photovoltaik-Anlage Hackl 27

Auf dem Hackl 27 –Gebäude befindet sich eine PV-Anlage, die mit folgenden Eingabeparametern in den Berechnungen berücksichtigt wurde:

Tabelle 18: Allgemeine Datengrundlage: Photovoltaik-Anlage Hackl 27

	Hackl 27 Photovoltaik
Berechnungsmethode	Solarstrahlungsdaten
Anlagenpeakleistung	60 kWp
Performance Ratio	0,75
Temperaturkoeffizient der Leistung	-0,38 %/°C
Neigungswinkel	ca. 10°
Azimutwinkel	ca. -20°
Temperaturkorrekturfaktor	Rack montiert (-3°C)
Reflexionsfaktor	Asphalt 0,15

Eine Kälteversorgung ist im gesamten Areal nicht vorhanden und wurde daher auch nicht in der Wirtschaftlichkeitsanalyse berücksichtigt.

ii. Ökologische Eingabeparameter

Die ökologischen Eingabefaktoren umfassen die CO₂-Emissionsfaktoren sowie die Primärenergiefaktoren. Beide Faktoren wurden dem neuen Gebäudeenergiegesetz (GEG) entnommen.

Tabelle 19: Allgemeine Datengrundlage: CO₂-Emissionsfaktoren

	CO ₂ -Emissionsfaktor
Erdgas	240 g/kWh
Heizöl L	310 g/kWh
Strom	560 g/kWh

Tabelle 20: Allgemeine Datengrundlage: Primärenergiefaktoren

	Primärenergiefaktor
Erdgas	1,1
Heizöl L	1,1
Strom	1,8

iii. Ökonomische Eingabeparameter

Die ökonomischen Eingabeparameter umfassen im Wesentlichen die Strompreise, die Brennstoffpreise sowie die Wartungskosten. Zusätzlich werden Preissteigerungsfaktoren für Strom, Gas und Heizöl berücksichtigt.

Strompreise

Die nachfolgende Tabelle 20 dokumentiert die vertraglichen Stromlieferpreise der einzelnen Gebäude:

Tabelle 21: Allgemeine Datengrundlage: Vertragliche Stromlieferpreise (Angaben inkl. MwSt.)

	Arbeitspreis (brutto)	Grundpreis (brutto)	Leistungspreis	Grundlage
Montessori	26,74 ct/kWh	100,25 €/a	/	Stromabrechnung
Hotel	24,32 ct/kWh	86,87 €/a	/	Stromabrechnung
Hackl 19	34,19 ct/kWh	/	/	Statistisches Bundesamt
Hackl 23/25	23,35 ct/kWh	466,03 €/a	18,8 €/kW	SWA-Angebot
Hackl 27	23,7 ct/kWh	466,04 €/a	18,8 €/kW	SWA-Angebot
Kotter	25,58 ct/kWh	99,69 €/a	/	Ø d. Stromabrechnungen

Die Eigentümer der Montessori-Schule, des Hotels und des Kotter-Gebäudes haben ihre Stromabrechnungen zur Verfügung gestellt. Beim Kotter-Gebäude wird jeder Mieter separat abgerechnet. Folglich wurde der Durchschnitt verwendet. Für die drei Hackl-Gebäude konnten die Abrechnungsunterlagen nicht eingesehen werden. Daher wurde für Hackl 19 der Strompreis vom Statistischen Bundesamt verwendet. Für Hackl 23/25 und Hackl 27 ist dieser Strompreis aber nicht anwendbar, da die beiden Gebäude zu den Großverbrauchern gehören. Aus diesem Grund wurde bei den Stadtwerken Augsburg ein Angebot für die entsprechenden Verbrauchs- bzw. Leistungsdaten angefragt und dieses der Berechnung zugrunde gelegt.

Stromerlöse

Für die PV-Anlage des Hackl 27-Gebäudes wurde, da der tatsächliche Inbetriebnahmezeitpunkt nicht bekannt ist, der Januar 2017 angenommen, was eine Einspeisevergütung von 10,69 ct/kWh

entspricht. Zusätzlich wird der selbst verbrauchte Strom bei PV-Anlagen größer 10 kWp mit 40 % der EEG-Umlage beaufschlagt (entspricht 2,71 ct/kWh Eigenverbrauch).

Brennstoffpreise

Die nachfolgende Tabelle 21 dokumentiert die vertraglichen Brennstoffpreise der Wärmeerzeugung in den einzelnen Gebäuden.

Tabelle 22: Allgemeine Datengrundlage: Brennstoffpreise (Angaben inkl. MwSt.)

	Energieträger	Arbeitspreis (brutto)	Grundpreis (brutto)	Grundlage
Montessori	Gas	4,46 ct/kWh	572,39 €/a	Gas-Abrechnung
Hotel am Wald	Heizöl	6,11 ct/kWh	/	Handzettel Öllieferungen
Hackl 19	Heizöl	6,99 ct/kWh	/	Statistisches Bundesamt
Hackl 23/25	Heizöl	6,99 ct/kWh	/	Statistisches Bundesamt
Hackl 27	Gas	5,89 ct/kWh	/	Statistisches Bundesamt
Kotter	Gas	4,885 ct/kWh	395 €/a	Gas-Abrechnung

Da für einige Gebäude keine Daten zur Verfügung standen, musste dort auf Werte des statistischen Bundesamtes zurückgegriffen werden.

Wartungskosten

Die laufenden Kosten für die Reinigung, Pflege und Instandhaltung der technischen Anlagen werden mit den in der folgenden Tabelle 22 aufgeführten Wartungskosten berücksichtigt.

Tabelle 23: Allgemeine Datengrundlage: Wartungskosten

	Wartungskosten (netto)
Heizkessel > 250 kW	850 €/a
Heizkessel ≤ 250 kW	225 €/a

Preissteigerungsfaktoren

Die in der Berechnung berücksichtigten Preissteigerungsfaktoren sind in Tabelle 23 zusammengefasst:

Tabelle 24: Allgemeine Datengrundlage: Preissteigerungsfaktoren pro Jahr

	Preissteigerungsfaktor	Grundlage
Strompreis	2,45 %/a	Preisentwicklung der letzten Jahre gem. Statistisches Bundesamt
Öl-Preis	1,78 %/a	
Gas-Preis	- 0,56 %/a	
Wartungskosten	2,00 %/a	Inflationsrate

iv. Bestandaufnahme der Anlagen und aufgenommene Lastprofile

Alle Details zu den im Testgebiet Riemerling aufgenommenen Anlagenparametern und Lastdaten finden sich im Anhang unter (A1) Energiebedarf und Lastgänge für die Wirtschaftlichkeitsberechnung.

B. Simulation

i. Simulation 1: Ist-Zustand

Grundlagen

Als Grundlage für die weiteren Simulationen wurde zuerst der Ist-Stand der Anlagen in der Simulationssoftware abgebildet, um eine Vergleichsbasis für den Energieverbund und die möglichen Optimierungsansätze zu erhalten.

Auswertung

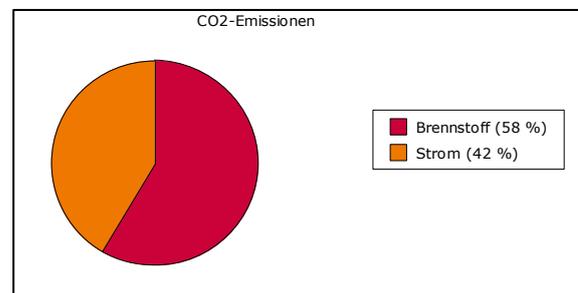
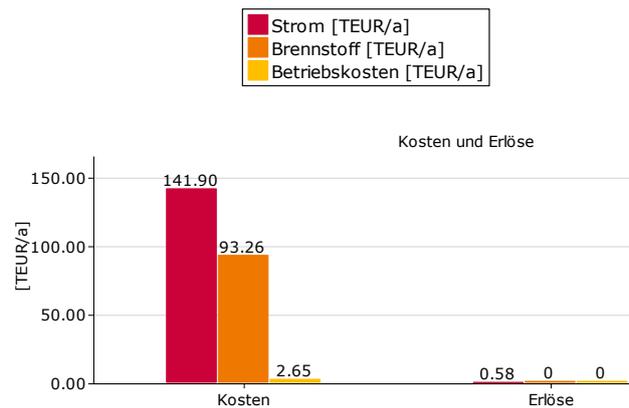
Für die Auswertung werden die Simulationsergebnisse in einer allgemeinen Darstellung (vgl. Tabelle 1-17) auf die folgenden wesentlichen Kennwerte reduziert:

- Gesamtkosten (bestehend aus der Summe der Stromkosten, der Brennstoffkosten und der Wartungskosten abzüglich der Erlöse für die Stromeinspeisung)
- CO₂-Emissionen
- Primärenergieeinsatz

Für den Ist-Zustand der sechs Gebäude in Riemerling ergibt die Simulation die in Tabelle 24 dargestellten Ergebnisse:

Tabelle 25: Simulationsergebnisse: Riemerling Ist-Zustand

Kennwerte	Ist-Zustand
Gesamtkosten	237.230 €/a
Stromkosten	141.900 €/a
Brennstoffkosten	93.257 €/a
Wartungskosten	2.650 €/a
Stromerlöse	577 €/a
CO₂-Emissionen	744,5 t/a
Strom	310,1 t/a
Brennstoff	434,4 t/a
Primärenergieeinsatz	2,76 GWh/a
Strom	1,00 GWh/a
Brennstoff	1,76 GWh/a



Zusammenfassung

Die Auswertung zeigt, dass die Wärmeversorger der einzelnen Gebäude teils stark überdimensioniert sind. Dadurch arbeiten die Anlagen nicht im optimalen Wirkungsbereich und unnötige Kosten sind die Folge.

ii. Simulation 2: Gebäudeverbund

Grundlagen

Die für den Gebäudeverbund notwendigen zusätzlichen Eingabeparameter für das Wärmenetz und dessen Investitionskosten basieren auf einer Rohrnetzrechnung durch den Verbundpartner IBDM.

Die Tabelle 25 fasst die neuen Eingabeparameter zusammen:

Tabelle 26: Eingabeparameter für die Simulation des Gebäudeverbundes

Parameter	Wert
Druckverlust im Netz (pauschal)	0,42 bar
Förderstrom Netzpumpe (pauschal)	12,79 m ³ /h

Stromtarif Netzpumpe	25,13 ct/kWh
Wärmeverlust Fernwärmenetz (pauschal)	5 %
Investitionskosten Fernwärmenetz	756.230 €

Bei der Pumpendimensionierung sowie bei der Berechnung des Gesamtwärmeverlustes wird davon ausgegangen, dass die Wärme nur vom Kotter-Gebäude aus in das Wärmenetz eingespeist wird. Dieser Annahme liegen Versuchs-Simulationen zugrunde, bei denen das Kotter-Gebäude in einem Gebäudeverbund ohne Verluste knapp 99 % der Wärme bereitstellte.

Dimensionen im Fernwärmenetz

Für die Erarbeitung der in Tabelle 25 dargestellten Eingabeparameter werden als Grundlage die Dimensionen des Fernwärmenetzes benötigt. Daher wurde die folgende Netzstruktur erarbeitet.

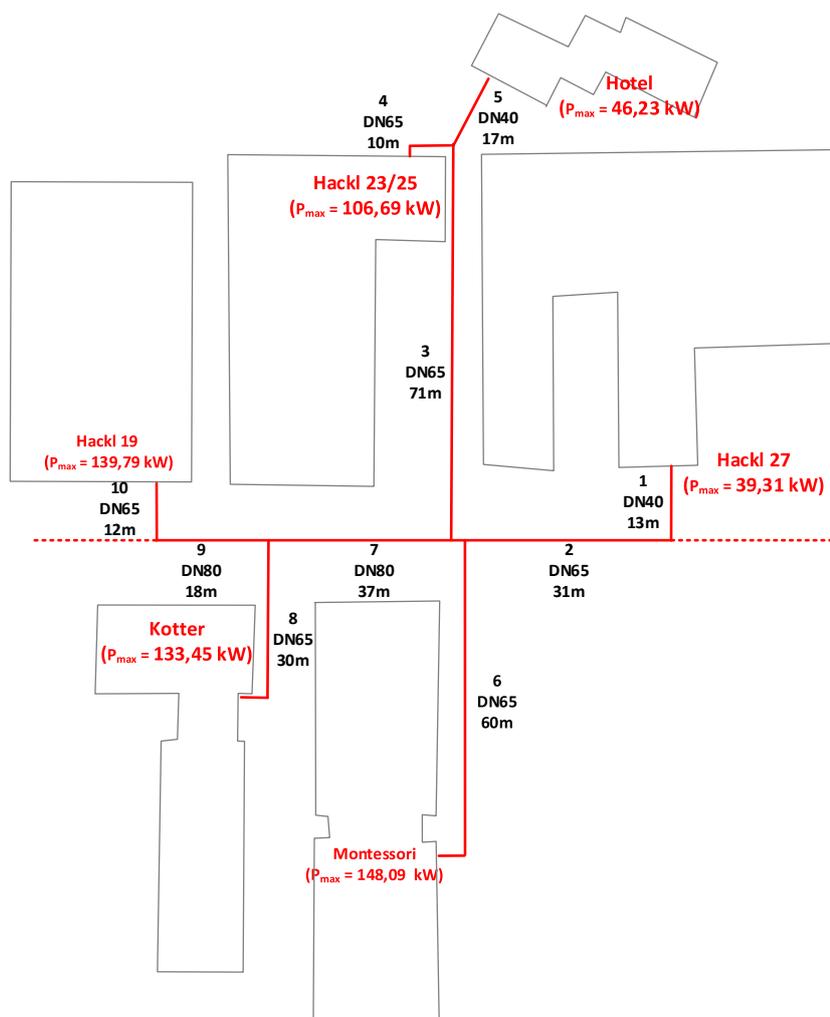


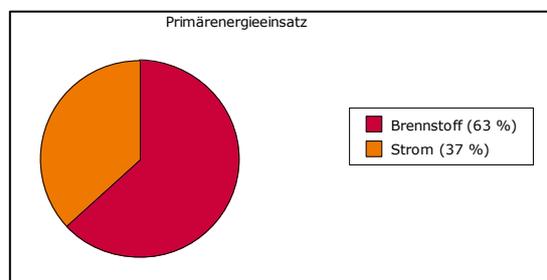
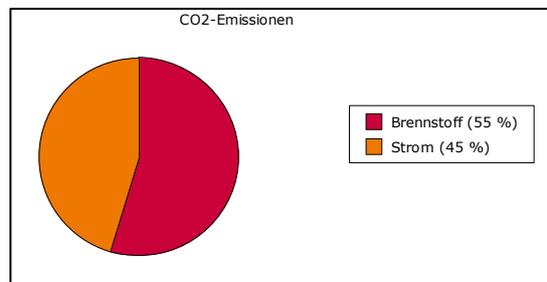
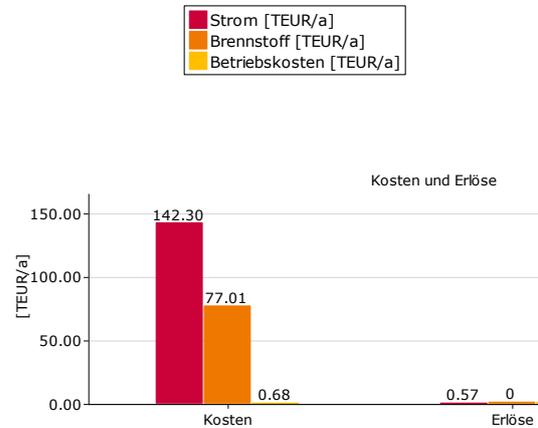
Abbildung 63: Ausgelegtes Wärmenetz für Testgebiet Riemerling mit angepassten Nennweiten

Auswertung

Die Simulation des Gebäudeverbundes ergibt die in Tabelle 26 dargestellten Ergebnisse:

Tabelle 27: Simulationsergebnisse: Gebäudeverbund

Kennwerte	Gebäudeverbund
Investitionskosten	756.230 €
Gesamtkosten	219.418 €/a
Stromkosten	142.300 €/a
Brennstoffkosten	77.012 €/a
Wartungskosten	675 €/a
Stromerlöse	569 €/a
Einsparungen (ggü. Ist-Zustand)	17.812 €/a (7,5 %)
CO₂-Emissionen	685,0 t/a
Strom	311,0 t/a
Brennstoff	374,0 t/a
Einsparungen (ggü. Ist-Zustand)	59,5 t/a (7,9 %)
Primärenergieeinsatz	2,71 GWh/a
Strom	1,00 GWh/a
Brennstoff	1,71 GWh/a



Ein bewertender wirtschaftlicher und ökologischer Vergleich des Gebäudeverbundes gegenüber dem Ist-Zustand erfolgt in Abschnitt B.xlvii (S.146)

Zusammenfassung

Grundsätzlich lässt sich folgendes festhalten:

Trotz der erhöhten Wärmeverluste verringern sich die Brennstoffkosten deutlich, was auf den fast ausschließlichen Betrieb der beiden wirtschaftlichsten Kessel im Verbund zurückzuführen ist, und

auch gesamthaft ergibt sich eine deutliche Kostenreduzierung. Demgegenüber stehen allerdings hohe Investitionskosten, die sich auf rund 756.230 € belaufen.

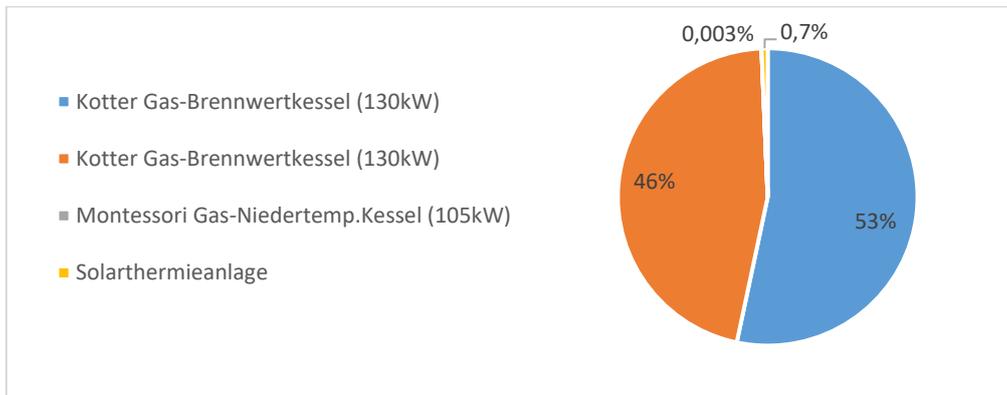


Abbildung 64: Anteilig abgegebene Wärmemenge im Verbundbetrieb

iii. Simulation 3: Gebäudeverbund mit BHKW

In diesem Abschnitt soll der Gebäudeverbund aus dem vorherigen Abschnitt optimiert werden. Dafür wird aufgezeigt, ob und wie sich ein Blockheizkraftwerk (BHKW) ökologisch und wirtschaftlich in das Energiekonzept integrieren lässt.

Grundlagen

Für den optimierten Gebäudeverbund mit einem integrierten BHKW müssen zusätzliche Eingabeparameter definiert werden, die in nachfolgender Tabelle 27 zusammengefasst sind.

Tabelle 28: Neue Eingabeparameter für den Gebäudeverbund mit BHKW

Neue Eingabeparameter	
Elektrische Leistung BHKW	70 kW
Thermische Leistung BHKW	109 kW
Elektrischer Wirkungsgrad	34,30%
Investitionskosten	165.250 € (brutto)
Wartungskosten	0,99 ct/Bh
KWK-Zuschlag	8 ct/kWh bzw. 6 ct /kWh > 50kW
Einspeisevergütung	4 ct/kWh
Vermiedene Netznutzungsentgelte (VNEE)	1 ct/kWh
EEG-Umlage (Anteil EEG-Umlage)	6,792 ct/kWh (40%)

Um eine hohe Wirtschaftlichkeit zu erreichen, sollte bei der BHKW Dimensionierung aufgrund der hohen Wartungskosten eine möglichst lange Vollast-Laufzeit angestrebt werden, daher wurde das

BHKW auf die Deckung der Wärmegrundlast ausgelegt, was unter Zuhilfenahme der Jahresdauerlinie des Wärmebedarfs im Testgebiet erfolgte.

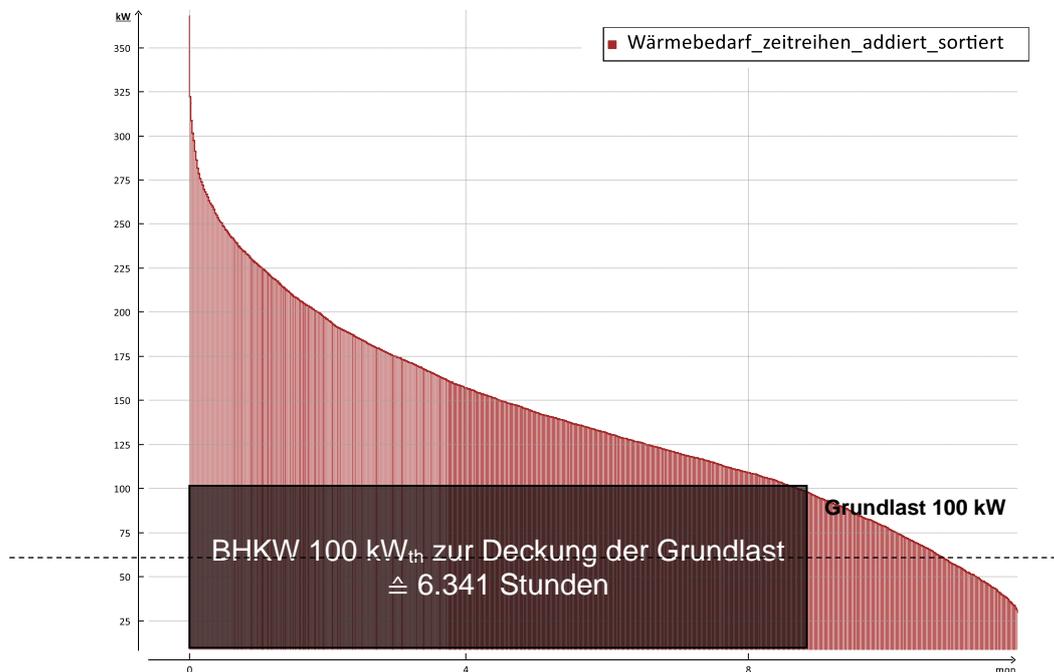


Abbildung 65: Jahresdauerlinie Wärmebedarf

Der BHKW-Betrieb ist bis zu einer Teillast von 50 % üblich. Darunter nehmen die Wirkungsgrade ab und der Betrieb wird unwirtschaftlich. Dies wurde in der Simulation entsprechend berücksichtigt.

Investitionskosten BHKW

Die Investitionskosten in Höhe von 165.250 € (brutto) ergeben sich aus den Kennwerten der Arbeitsgemeinschaft für sparsamen und umweltfreundlichen Energieverbrauch e.V. Hinzu kommen Transportkosten (bis hin zur Abnahme) sowie Kosten für die Einbindung in Höhe von 6 bzw. 39 % (der Modulkosten). Da die Daten von 2014/15 stammen, wird aufgrund der Inflation zusätzlich eine Preissteigerungsrate von 2 %/a angenommen.

Kostenmodell

Mit dem „Gesetz für die Erhaltung, die Modernisierung und den Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung“ wird Strom, der aus KWK-Anlagen erzeugt und in das öffentliche Netz eingespeist wird, vergütet. Die nachfolgende Tabelle fasst die Preisbestandteile zusammen:

Tabelle 29: Preisbestandteile bei KWK-Anlagen

Preis-Bestandteil	Wert	Grundlage
Staatlicher KWK-Zuschlag	8 ct/kWh bzw. 6 ct /kWh >50kW	Elektrische Nennleistung und Art der Anlage
Einspeisungsvergütung („üblicher Strompreis“)	4 ct/kWh	

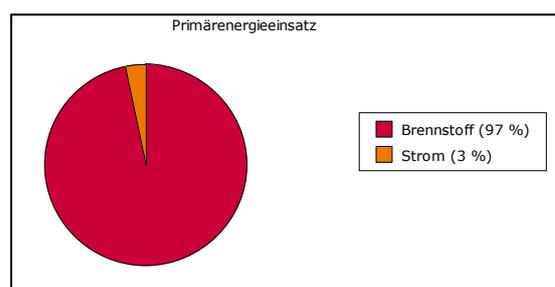
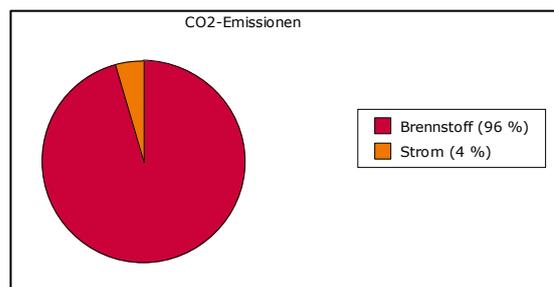
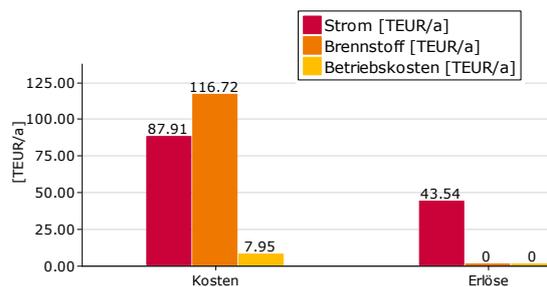
Vermiedene Netznutzungsentgelte (VNEE)	1 ct/kWh	Keine festgesetzte Vergütung, wird mit Netzbetreiber verhandelt
EEG-Umlage (Anteil)	6,792 ct/kWh (40%)	Erneuerbare-Energien-Gesetz

Auswertung

Die Simulation des Gebäudeverbundes mit BHKW (70 kW_{el} und 109 kW_{th}) ergibt die in Tabelle 29 zusammengefassten Ergebnisse:

Tabelle 30: Simulationsergebnisse: Gebäudeverbund mit BHKW

Zusammenfassung	Gebäudeverbund mit BHKW (70 kW _{el} und 109 kW _{th})
Investitionskosten	921.790 €
Gesamtkosten	169.031 €/a
Stromkosten	87.908 €/a
Brennstoffkosten	116.720 €/a
Wartungskosten	7.948 €/a
Stromerlöse	43.545 €/a
Einsparungen (ggü. Ist-Zustand)	68.199 €/a (28,7 %)
CO₂-Emissionen	517,2 t/a
Strom	23,0 t/a
Brennstoff	494,2 t/a
Einsparungen (ggü. Ist-Zustand)	227,3 t/a (30,5 %)
Primärenergieeinsatz	2,73 GWh/a
Strom	0,47 GWh/a
Brennstoff	2,26 GWh/a



Zusammenfassung

Grundsätzlich lässt sich folgendes festhalten: Durch den Einsatz eines BHKW lässt sich innerhalb des Energieverbunds im Testgebiet eine Einsparung von knapp 29% erzielen. Demgegenüber stehen Investitionskosten von knapp 922.000 €, so dass sich eine Amortisation von unter 14 Jahren ergibt.

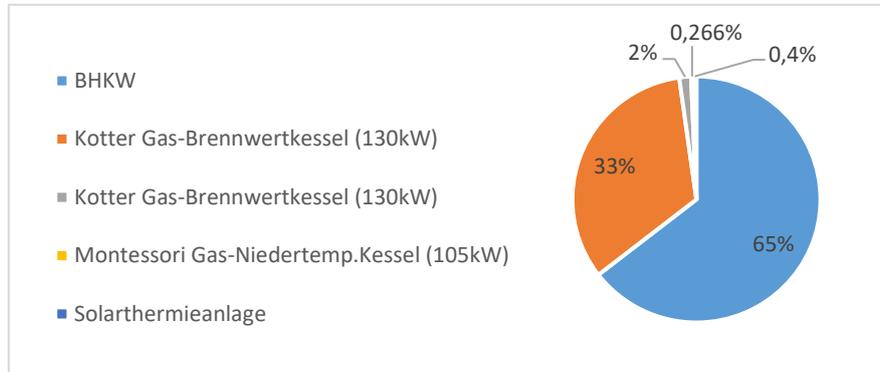


Abbildung 66: Anteilige Wärmeversorgung im Verbundbetrieb mit BHKW

Das BHKW versorgt mit 65 % knapp 2/3 des gesamten Wärmebedarfes und damit die gesamte Grundlast. Ein Kötter-Kessel übernimmt ein weiteres Drittel. Die übrigen Wärmeversorger kommen kaum zum Einsatz.

iv. Simulation 4: Gebäudeverbund mit BHKW und PV

Da eine PV-Anlage ihren Maximalertrag in der Regel zu Zeiten erzielt, in denen das BHKW aufgrund geringen Wärmebedarfs nicht in Betrieb ist, wurde in einer letzten Simulation versucht, den Netzbezug mittels PV-Anlagen noch weiter zu reduzieren.

Grundlagen

Der Strombedarf des Quartiers liegt unter der Woche tagsüber, wenn auch der PV-Ertrag vorhanden ist, deutlich über den Nachtstunden, so dass, bei entsprechender Auslegung, während der Stillstandszeiten des BHKW, ein fast vollständiger Eigenverbrauch zu erwarten ist. Für die nachfolgende Simulation wird eine PV-Anlage mit 180 kWp angesetzt. Dies entspricht einer Fläche von 900 m², die das Kötter-Gebäude zusammen mit der Montessori Schule leicht zur Verfügung stellen könnte.

Dimensionierung Photovoltaik-Anlage

Da die Lastspitzen ausschließlich tagsüber auftreten, könnten diese durch eine zusätzliche PV-Anlage abgedeckt werden.

Mittels Google Maps und Bayern Viewer kann eine grobe Abschätzung der zur Verfügung stehenden Dachflächen vorgenommen werden.



Abbildung 67: Verfügbare Dachflächen im Quartier

Gemäß der überschlägigen Abschätzung in Abbildung 66 kommen rund 2.350 m² Dachfläche für die PV-Anlage in Frage.

Eingabeparameter

Die nachfolgende Tabelle fasst die zusätzlichen Parameter zusammen:

Tabelle 31: Eingabeparameter für zusätzliche PV-Anlage

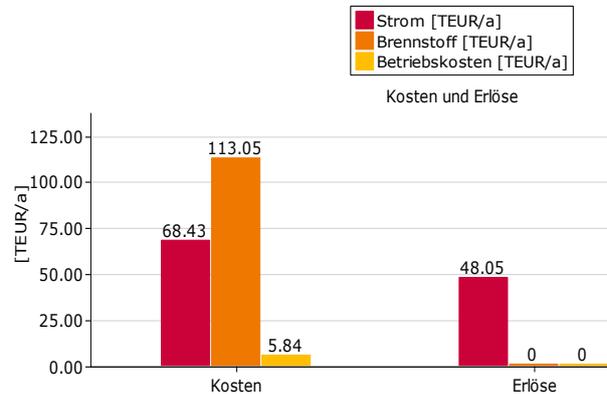
	Zusätzliche PV-Anlage
Berechnungsmethode	Durch Solarstrahlungsdaten
Anlagenpeakleistung	180 kWp
Performance Ratio	0,75
Temperaturkoeffizient der Leistung	-0,38 %/°C
Neigungswinkel	0°
Azimutwinkel	ca. -20°
Temperaturkorrekturfaktor	Rack montiert (-3°C)
Reflexionsfaktor	Asphalt 0,15
Investitionskosten	252.000 €
Einspeisevergütung	6,5 ct/kWh

Auswertung

Die Simulation des Gebäudeverbundes mit BHKW und zusätzlicher PV-Anlage ergibt die in Tabelle 31 zusammengefassten Ergebnisse:

Tabelle 32: Simulationsergebnisse: Gebäudeverbund mit BHKW und PV

Kennwerte	Gebäudeverbund mit BHKW und PV
Investitionskosten	1.232.260 €
Gesamtkosten	139.270 €/a
Stromkosten	68.430 €/a
Brennstoffkosten	113.050 €/a
Wartungskosten	5.840 €/a
Stromerlöse	48.050 €/a
Einsparungen (ggü. Ist-Zustand)	97.960 €/a (41,3 %)
CO₂-Emissionen	401,5 t/a
Strom	-71,4 t/a
Brennstoff	472,9 t/a
Einsparungen (ggü. Ist-Zustand)	343,0 t/a (46,1 %)
Primärenergieeinsatz	1,94 GWh/a
Strom	-0,23 GWh/a
Brennstoff	2,17 GWh/a



Zusammenfassung

Durch die PV-Anlage können die jährlichen Gesamtkosten sowie der CO₂-Ausstoß weiter reduziert werden. Insgesamt werden nur noch 231,7 MWh Strom aus dem öffentlichen Netz bezogen. Demnach werden 62 % des Strombedarfes im Quartier selbst produziert und verbraucht.

v. Vergleich der Simulationsergebnisse

In den vergangenen Abschnitten wurde der Ist-Zustand der sechs Gebäude im Riemerlinger Quartier simuliert und die Ergebnisse eingehend untersucht. Darauf aufbauend wurden die folgenden gebäudeübergreifenden Energiekonzepte erarbeitet, simuliert und ausgewertet:

- Gebäudeverbund
- Gebäudeverbund mit BHKW (100 kW_{el} und 173 kW_{th})
- Gebäudeverbund mit BHKW (100 kW_{el} und 173 kW_{th}) und PV-Anlage (180 kWp)

Die Simulationsergebnisse der Energiekonzepte werden in Tabelle 32 den Simulationsergebnissen des Ist-Zustandes gegenübergestellt:

Tabelle 33: Vergleich der Simulationsergebnisse

Kennwerte	Ist-Zustand	Gebäudeverbund	Gebäudeverbund mit BHKW (100 kW _{el} & 173 kW _{th})	Gebäudeverbund mit BHKW & PV
Investitionskosten	0 €	756.230 €	980.260 €	1.232.260 €
Gesamtkosten	237.230 €/a	219.418 €/a	166.088 €/a	139.270 €/a
Stromkosten	141.900 €/a	142.300 €/a	91.193 €/a	68.430 €/a
Brennstoffkosten	93.257 €/a	77.012 €/a	113.050 €/a	113.050 €/a
Wartungskosten	2.650 €/a	675 €/a	5.842 €/a	5.840 €/a
Stromerlöse	577 €/a	569 €/a	43.997 €/a	48.050 €/a
Einsparungen (ggü. Ist-Zustand)	0 €/a	17.812 €/a (-7,5 %)	71.142 €/a (-30,0 %)	97.960 €/a (-41,3 %)
CO₂-Emissionen	744,5 t/a	685,0 t/a	491,6 t/a	401,5 t/a
Strom	310,1 t/a	311,0 t/a	18,7 t/a	-71,4 t/a
Brennstoff	434,4 t/a	374,0 t/a	472,9 t/a	472,9 t/a
Einsparungen (ggü. Ist-Zustand)	30 t/a	59,5 t/a (-7,9 %)	252,9 t/a (-34,0 %)	343,0 t/a (-46,1 %)

Investitionskosten

Allen Einsparungen stehen hohe Investitionskosten gegenüber. Mit 756.230 € ist das Fernwärmenetz für den Gebäudeverbund die teuerste Investition. Knapp die Hälfte der Kosten wird dabei von den Erdarbeiten verursacht. Das BHKW schlägt mit rund 224.000 € zu Buche. Für die PV-Anlage werden weitere 252.000 € fällig.

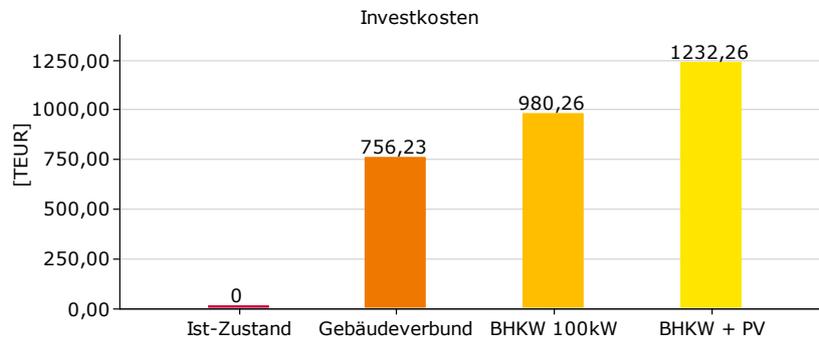


Abbildung 68: Vergleich der Investitionskosten

Energiekosten

Mit jeder Maßnahme können die Energiekosten (Strom und Brennstoff) kontinuierlich gesenkt werden. Insgesamt werden durch den Gebäudeverbund mit BHKW und PV-Anlage knapp 23 % an jährlichen Energiekosten gespart.

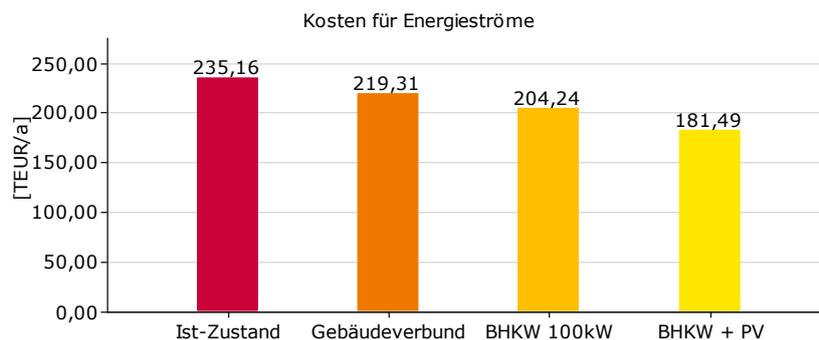


Abbildung 69: Vergleich der Energiekosten

Betrachtet man die jährlichen Gesamtkosten (bestehend aus der Summe der Stromkosten, der Brennstoffkosten und der Wartungskosten abzüglich der Stromerlöse), dann können im Gebäudeverbund mit BHKW und PV-Anlage sogar gut 41 % an jährlichen Kosten eingespart werden.

CO₂-Emissionen

Signifikante Einsparungen können auf der ökologischen Seite erzielt werden. Insgesamt kann der CO₂-Ausstoß durch die Maßnahmen um knapp 343 t/a reduziert werden. Dies entspricht einer Einsparung von 46 %.

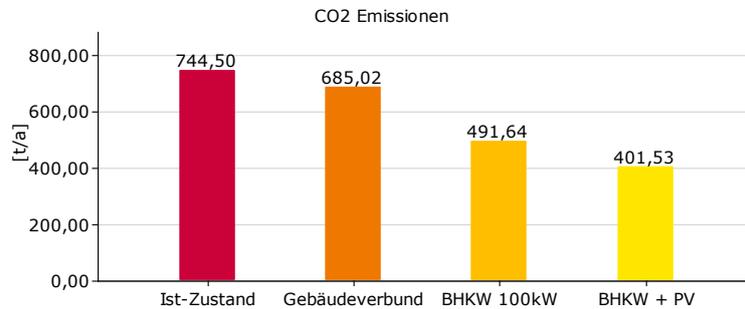


Abbildung 70: Vergleich der CO₂-Emissionen

CO₂ – Bepreisung

Wie bereits erwähnt, wird der CO₂-Ausstoß im Wärmesektor mit dem Brennstoffemissionshandelsgesetz ab dem Jahr 2021 bepreist. Es gelten die folgenden Preise:

Tabelle 34: CO₂-Preise gem. Brennstoffemissionshandelsgesetz

Jahr	CO ₂ -Preis (netto)	CO ₂ -Preis (brutto)
2021	25 €/t	29,75 €/t
2022	30 €/t	35,70 €/t
2023	35 €/t	41,65 €/t
2024	40 €/t	47,60 €/t
2025	45 €/t	53,55 €/t
2026	55 - 65 €/t	65,56 – 77,35 €/t

Im Ist-Zustand verursacht das Quartier im Wärmesektor einen CO₂-Ausstoß von 434,4 t/a. Damit ergeben sich für das Jahr 2021 Zusatzkosten in Höhe von 12.923 €. Bis zum Jahr 2026 steigen diese Kosten um knapp 2.600 € pro Jahr an. Danach werden die jährlichen Kosten zwischen 28.478 €/a und 33.599 €/a schwanken.

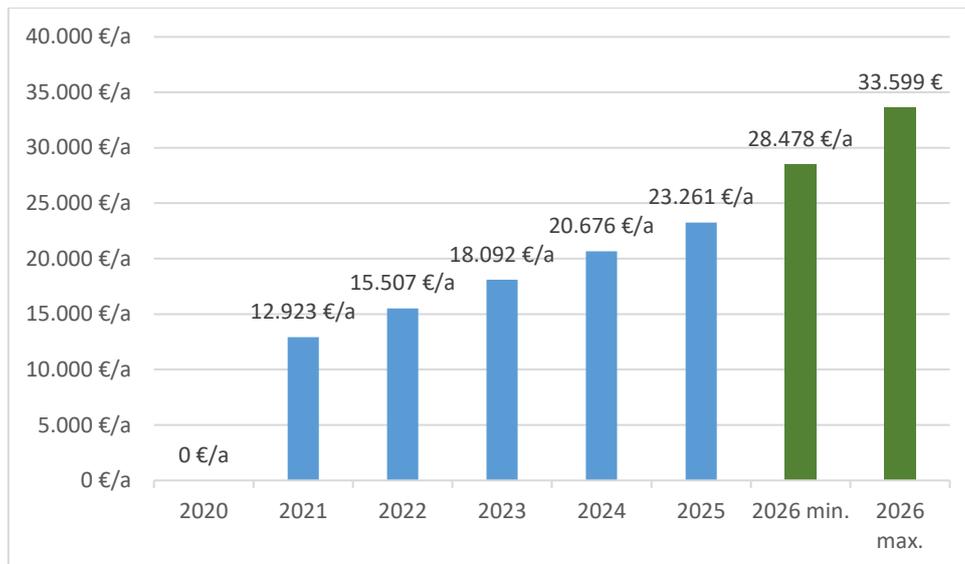


Abbildung 71: CO₂-Kosten für den Ist-Zustand

Betrachtet man die CO₂-Bilanzen (Tabelle 34), dann wird jedoch ein zentrales Problem des Brennstoffemissionshandelsgesetzes deutlich:

Tabelle 35: CO₂-Emissionen der verschiedenen Energiekonzepte

Kennwerte	Ist-Zustand	Gebäudeverbund	Gebäudeverbund mit BHKW	Gebäudeverbund mit BHKW mit PV
CO ₂ -Emission gesamt	744,5 t/a	685,0 t/a	491,6 t/a	401,5 t/a
Strom	310,1 t/a	311,0 t/a	18,7 t/a	-71,4 t/a
Brennstoff	434,4 t/a	374,0 t/a	472,9 t/a	472,9 t/a
Einsparungen gesamt (ggü. Ist-Zustand)	0 t/a	59,5 t/a (-7,9 %)	252,9 t/a (-34,0 %)	343,0 t/a (-46,1 %)

Auf der einen Seite können durch die gebäudeübergreifenden Energiekonzepte deutliche Gesamt-CO₂-Einsparungen verzeichnet werden. Die Variante mit BHKW und PV-Anlage erzielt mit einer Reduktion von knapp 343 t/a fast eine Halbierung der Emissionen.

Auf der anderen Seite steigt der CO₂-Ausstoß im Wärmesektor durch den Einsatz des BHKWs. Folglich würden die Kosten aufgrund der CO₂-Bepreisung steigen, obwohl die Gesamt-Emissionen deutlich reduziert werden.

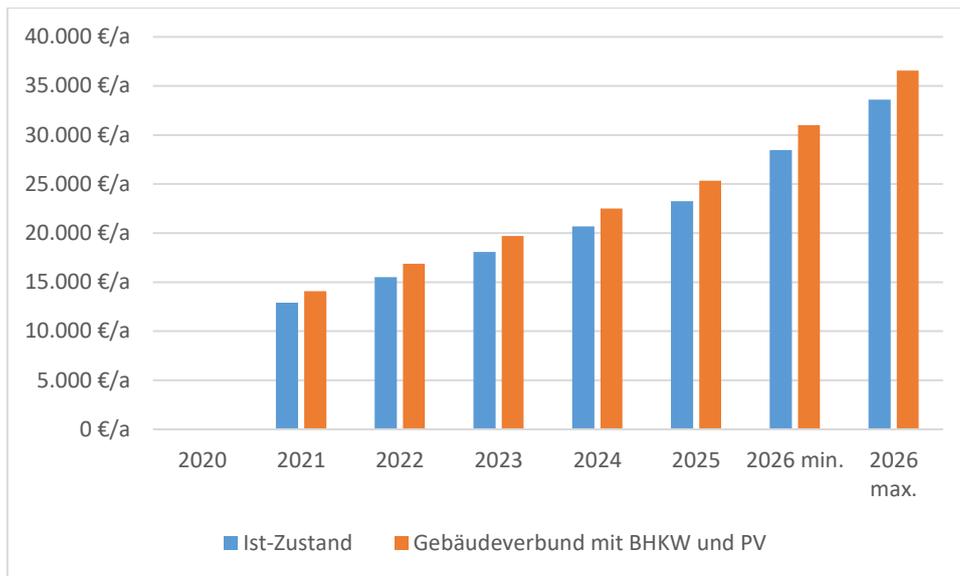


Abbildung 72: CO₂-Kosten im Vergleich

Abbildung 71 verdeutlicht, dass die CO₂-Kosten im Ist-Zustand geringer ausfallen als beim Gebäudeverbund mit BHKW und PV-Anlage. Und dies, obwohl der Gesamt-CO₂-Ausstoß im Ist-Zustand signifikant höher ist.

Dem kann nur entgegengewirkt werden, indem die CO₂-Bepreisung auch auf dem Stromsektor zur Anwendung kommt.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte nicht abschließend geklärt werden, ob die Politik eine Lösung für dieses Szenario vorgesehen hat. Fest steht allerdings, dass das Brennstoffemissionshandelsgesetz in dieser Form keine Anreize für erdgasbetriebene KWK-Anlagen bietet, auch wenn diese die Gesamt- CO₂-Emissionen reduzieren können.

C. Bewertung und Ausblick

Insgesamt wurden drei aufeinander aufbauende Energiekonzepte erarbeitet, simuliert und die Ergebnisse ausgewertet. Nachfolgend erfolgt eine Bewertung der einzelnen Energiekonzepte.

i. Gebäudeverbund

Das erste Energiekonzept sieht einen Gebäudeverbund vor, bei dem die Gebäude über ein Fernwärmenetz miteinander verbunden werden.

Die Simulation des Ist-Zustandes hat gezeigt, dass die Wärmeversorger im Quartier stark überdimensioniert sind. Reduziert man im Gebäudeverbund die Kesselanzahl und konzentriert sich dabei auf die neueren Gaskessel im Kotter-Gebäude und in der Montessori-Schule, dann erreicht man im Verbundbetrieb einen wirtschaftlicheren und ökologischeren Anlagenbetrieb.

Die Vor- und Nachteile können folgendermaßen zusammengefasst werden:

Tabelle 36: Vor- und Nachteile des Gebäudeverbundes

Vorteile	Nachteile
+ Geringere Wartungskosten (-75 %)	- Hohe Investitionskosten (756 TEUR)
+ Geringere Brennstoffkosten (-17 %)	- Hoher Umsetzungsaufwand

+ Geringere Gesamtkosten (-7,5 %)	- Komplizierte Abrechnungsverhältnisse
+ Geringerer CO ₂ -Ausstoß (-8 %)	- Verluste im Leitungsnetz
+ Effizienterer Anlagenbetrieb	- Lange Amortisationszeit (32 a)
+ lange Lebensdauer des Fernwärmenetzes	- Negativer Kapitalwert (-293,4 TEUR)

Insgesamt können durch den Verbundbetrieb nennenswerte Einsparungen und Vorteile erzielt werden. Zum einen werden durch die geringere Kesselanzahl unnötige Wartungskosten eingespart. Zum anderen arbeiten die effizienteren Gaskessel in einem besseren Wirkungsbereich. Folglich werden die jährlichen Gesamtkosten um 7,5 % reduziert. Hinzu kommt, dass der CO₂-Ausstoß um knapp 8 % gesenkt wird, da bei der Verbrennung von Gas weniger CO₂ emittiert wird als bei der Verbrennung von Heizöl.

Besonders hervorzuheben ist dabei, dass diese Einsparungen nur auf die Veränderung der Wärmeerzeuger-Infrastruktur zurückzuführen sind. Weitere Effizienzmaßnahmen wurden nicht berücksichtigt. Dieser Umstand zeigt das Potenzial von gebäudeübergreifenden Energiekonzepten und beweist, dass nur durch die energetische Vernetzung von Gebäuden Synergieeffekte nutzbar gemacht werden können.

Dem gegenüber steht allerdings ein hoher Umsetzungsaufwand sowie hohe Investitionskosten, die mit dem Bau eines Fernwärmenetzes verbunden sind. Unter Betrachtung der finanzmathematischen Kennwerte, kann daher im vorliegenden Fall keine wirtschaftliche Vorteilhaftigkeit erreicht werden.

Abgesehen von rein wirtschaftlichen Betrachtungen führt der Gebäudeverbund zu einer Erhöhung der Betriebssicherheit, die insbesondere bei gewerblichen Objekten nicht unwesentlich ist.

Bei der Neuerschließung von Baugebieten könnte die Erstellung eines Verbundnetzes zu wesentlich günstigeren Konditionen erfolgen und den Teilnehmern die Vorteile einer wirtschaftlich optimierten Wärmeversorgung mit einer erhöhten Ausfallsicherheit bieten.

ii. Gebäudeverbund mit BHKW

Im zweiten Energiekonzept wurde der Gebäudeverbund um ein BHKW erweitert. Die optimale BHKW-Leistung für das Quartier wurde mittels Sensitivitätsanalyse identifiziert und beträgt $100 \text{ kW}_{\text{el}}$ und $173 \text{ kW}_{\text{th}}$.

Die wesentlichen Vor- und Nachteile können folgendermaßen zusammengefasst werden:

Tabelle 37: Vor- und Nachteile des Gebäudeverbundes mit BHKW

Vorteile	Nachteile
+ Geringere Stromkosten (-36 %)	- Höhere Brennstoffkosten (+21 %)
+ Höhere Stromerlöse (+43 TEUR)	- Höhere Wartungskosten (+ 120 %)
+ Geringere Gesamtkosten (-30 %)	- Hohe Investitionskosten (980 TEUR)
+ Geringere CO ₂ -Emissionen (-34 %)	- Höhere Kosten durch CO ₂ -Emissionen im Wärmesektor ab 2021
+ Effizienterer Anlagenbetrieb	- Hoher Umsetzungsaufwand
+ Positiver Kapitalwert (136 TEUR)	- Komplizierte Abrechnungsverhältnisse
+ interner Zinsfuß (3,37 %) > Kalkulationszins	

Die Simulation hat gezeigt, dass durch die Integration eines BHKWs in den Gebäudeverbund signifikante ökologische und wirtschaftliche Einsparungen erzielt werden können. Zum einen erreicht die gekoppelte Energiebereitstellung hohe Wirkungsgrade. Zum anderen werden durch die dezentrale Erzeugung Transportverluste minimiert und das öffentliche Netz entlastet.

Insgesamt können auf diese Weise 41 % des Strombedarfes und 65 % des Wärmebedarfes durch das BHKW gedeckt werden. Folglich werden die Gesamtkosten im Quartier um 30 % gesenkt. Der CO₂-Ausstoß reduziert sich sogar um 34 %.

Aus wirtschaftlicher Sicht kann für dieses Energiekonzept eine Empfehlung ausgesprochen werden. Unter den gegebenen Randbedingungen amortisiert sich das Konzept nach knapp 18 Jahren und erzielt bei einem internen Zinsfuß von 3,37 % einen positiven Kapitalwert von 136 TEUR. Demnach wird innerhalb des Betrachtungszeitraumes ein Vermögenszuwachs erwirtschaftet.

Da die Wirtschaftlichkeit von BHKWs hauptsächlich von der Betriebsdauer und den vermiedenen Netzkosten abhängt, können BHKWs in gebäudeübergreifenden Energiekonzepten besonders punkten. Durch die erhöhte Wärmeabnahme im Verbundbetrieb werden längere BHKW-Laufzeiten erzielt. Durch den erhöhten Strombedarf im Verbundbetrieb wird zudem die Eigenstromproduktion maximiert.

Hinzu kommt, dass BHKWs, im Gegensatz zu Großkraftwerken, innerhalb weniger Sekunden ein- und ausgeschaltet bzw. auf Teillast reguliert werden können. Zudem sind sie, anders als erneuerbare Energiequellen, unabhängig vom Wetter. Durch diese Vorteile können sie Erzeugungsschwankungen im Energiemix ausgleichen und werden daher im künftigen Energiemix immer wichtiger.

iii. Gebäudeverbund mit BHKW und PV

In einem letzten Energiekonzept wurde eine zusätzliche PV-Anlage mit 180 kWp in den Gebäudeverbund mit BHKW integriert.

In nachfolgender Tabelle werden die wesentlichen Vor- und Nachteile zusammengefasst:

Tabelle 38: Vor- und Nachteile des Gebäudeverbundes mit BHKW und PV

Vorteile	Nachteile
+ Geringere Gesamtkosten (-41 %)	- Hohe Investitionskosten (1.232 TEUR)
+ Geringere Stromkosten (-52 %)	- Höhere Brennstoffkosten (+ 21 %)
+ Höhere Stromerlöse (+47 TEUR)	- Höhere Wartungskosten (+ 120 %)
+ Geringere CO ₂ -Emissionen (- 46 %)	- Höhere Kosten durch CO ₂ -Emissionen im Wärmesektor ab 2021
+ Effizienterer Anlagenbetrieb	- Hoher Umsetzungsaufwand
+ Positiver Kapitalwert (427 TEUR)	- Komplizierte Abrechnungsverhältnisse
+ interner Zinsfuß (5,19 %) > Kalkulationszins	
+ Erhöhte Integration erneuerbarer Energien	

Zusätzlich zu den Vorteilen des zweiten Energiekonzeptes (Gebäudeverbund mit BHKW), können durch die Integration einer PV-Anlage weitere Einsparungen erzielt werden.

Insgesamt steigt die Eigenstromproduktion in dieser Konstellation auf fast 62 % und erreicht damit einen großen Autarkiegrad. Folglich sinken die jährlichen Gesamtkosten um 41 %. Der CO₂-Ausstoß kann mit einer Reduktion von 46 % fast halbiert werden.

Aus wirtschaftlicher Sicht handelt es sich bei diesem Energiekonzept um eine lohnende Investition. Mit 5,19 % wird ein hoher interner Zinsfuß erreicht. Dies spiegelt sich in einem hohen positiven Kapitalwert in Höhe von 427 TEUR und einer überschaubaren Amortisationszeit von knapp 15 Jahren wider.

Dementsprechend zeigt sich hier das erhöhte Potenzial von PV-Anlagen in gebäudeübergreifenden Energiekonzepten. Aufgrund des erhöhten Strombedarfes kann im Verbundbetrieb eine höhere Eigenstromproduktion erzielt werden. Insgesamt amortisieren sich die Anlagen dadurch schneller und es gelingt eine erhöhte Integration erneuerbarer Energien.

Ein weiterer Vorteil wird deutlich, wenn man die zukünftigen Strompreise berücksichtigt. Demnach werden mit der Energiewende steigende Leistungspreise prognostiziert. Durch die erhöhte Eigenstromproduktion kann zum einen die Spitzenlast deutlich reduziert werden. Dadurch sinken insgesamt die Kosten, die durch den Leistungspreis entstehen. Zum anderen erreicht man eine zunehmende Unabhängigkeit von der zukünftigen Strompreisentwicklung.

iv. Ausblick

Bei der detaillierten Betrachtung der Gebäude wurde eine extreme Überdimensionierung der Erzeuger festgestellt, was in dieser Ausprägung doch etwas überraschte. Nachdem davon auszugehen ist, dass dies keinen Einzelfall, sondern eher die Regel darstellt, kann durch einen Gebäudeverbund ein optimaler Betrieb der einzelnen Komponenten erreicht und trotzdem dem Bedürfnis nach Leistungsreserven bei extremen Witterungen entsprochen werden. Zusätzlich führt der Verbund zu einer erhöhten Betriebssicherheit, da der Ausfall eines Erzeugers problemlos kompensiert werden kann.

Demgegenüber stehen nicht unerhebliche Investitionskosten für die Installation eines bidirektionalen Nahwärmenetzes in einem bestehenden Quartier, welche nicht unbedingt durch die direkten Einsparungen kompensiert werden können. Dies lässt sich erst durch zusätzliche Optimierungsmaßnahmen sicher realisieren, wodurch eine deutliche Kosten- und CO₂-Einsparung möglich wäre.

Die simulierten Maßnahmen mit BHKW und PV gehen von einem Quartier als Gesamtstromabnehmer aus, innerhalb dessen Grenzen die Stromversorgung von einem Gebäude zu Anderen problemlos möglich ist.

Dieser freie Energiefluss stößt derzeit auf diverse rechtliche Begrenzungen, die einer einfachen Umsetzung durch Gewerbeunternehmen entgegenstehen, was sich auch bei einer Umfrage an den Teilnehmern aus dem Testgebiet bestätigte. Hier wäre eine deutliche Vereinfachung der regulatorischen Rahmenbedingungen für den Energieaustausch innerhalb Quartiersgrenzen hilfreich.

D. Vergütungsmodelle / Kostenallokation

Wie in Abschnitt E0.B unter Annahmen zu technischen und organisatorischen Rahmenbedingungen erläutert, wurden im Projekt keine Ansätze für lokale Energiemärkte berücksichtigt. Stattdessen ist die Grundidee von MEMAP ein kooperativer Energieaustausch auf Quartiersebene, der durch die zentrale MEMAP-Plattform geregelt wird. Dabei versucht der Optimierungskern der Plattform das optimale Verhalten der Anlagentechnik im Hinblick auf die berücksichtigten Kosten zu erzielen. Welche Art von Kosten wie berücksichtigt werden ist der Beschreibung der Zielfunktion in Abschnitt E1.C zu entnehmen. Durch die so erzielte Nutzung von Synergieeffekten entsteht im Gesamtverbund eine Ersparnis gegenüber dem optimierten Einzelbetrieb der Anlagen jedes individuellen Teilnehmers. Selbst unter der vereinfachten Annahme eines Verbundes, in dem alle Teilnehmer sich zur Optimierung des Gemeinwohls entsprechend der Vorgaben verhalten, stellt sich die Frage, wie die daraus entstehenden Ersparnisse fair unter den Teilnehmern aufgeteilt werden. Einzelne Teilnehmer können mitunter erst einmal höhere Kosten gehabt haben, da ihre Anlagen zur Mitversorgung anderer in den Diensten des Gemeinwohls häufiger liefen, als es bei der Individualversorgung der Fall gewesen wäre. Dies muss entsprechend entschädigt werden. Andere Teilnehmer dagegen hatten evtl. geringere Kosten, da sie von anderen mitversorgt und ihre eigenen Anlagen nicht betrieben wurden.

Diese Frage der Kostenallokation bzw. der Vergütungsmodelle wurde im Rahmen einer Masterarbeit unter Betreuung der TUM untersucht.⁴⁴ Hierfür wurde die Annahme getroffen, dass über einen gewissen Betrachtungszeitraum (z.B. einen Monat oder ein Jahr) der Gesamtverbund nach Vorgaben der MEMAP-Plattform optimal betrieben wird und die Kosten bzw. Ersparnisse im Anschluss an diesen Zeitraum unter den Teilnehmern zu verteilen sind. Methodisch wurden in der Masterarbeit verschiedene Lösungskonzepte aus der kooperativen Spieltheorie vorgestellt (so z.B. der Nucleolus und der Shapley-Wert) und anhand zweier Kriterien bewertet: Anreizkompatibilität und Stabilität. Im weiteren Verlauf wurde außerdem die Kostenzuteilung durch Einheitsbepreisung untersucht und ebenfalls anhand der Kriterien bewertet. Nach der Simulation und Diskussion mehrerer Beispiele wurde eine Methode vorgeschlagen, mit der sich die beste Lösungsmethode für ein bestimmtes Problem auswählen lässt.

Bei der spieltheoretischen Betrachtungsweise spielen Koalitionen eine bedeutende Rolle. Als Koalition wird dabei jeder beliebige Zusammenschluss von Teilnehmern beschrieben. Koalitionen sind damit Submengen der Gesamtmenge aller verfügbaren Teilnehmer im Verbund. Wenn sich alle verfügbaren Teilnehmer zu einer Koalition zusammenschließen, spricht man von der „großen Koalition“. Damit das Konzept von MEMAP auf Dauer erfolgreich ist, muss gewährleistet sein, dass durch die Kostenallokation die große Koalition auf Dauer für alle Teilnehmer die Vorteilhafteste ist.

Ein geeignetes Allokationskonzept muss also mindestens zwei Bedingungen erfüllen:

- Stabilität des Verbundes: Eine stabile Zuteilung liefert keiner Koalition den Anreiz das Spiel zu verlassen oder dieses zu blockieren.
- Anreizkompatibilität: Ermöglicht eine Unterkoalition durch ihr produktives Verhalten eine Kostensenkung der großen Koalition, auch wenn ihr produktives Verhalten durch das unproduktive Verhalten einer anderen Unterkoalition überkompensiert wird, so muss Erstere finanziell belohnt werden. Ist dies der Fall, so spricht man von einem anreizkompatiblen Lösungskonzept.

In der Masterarbeit wurde die Motivation für einen kooperativen Energieaustausch und eine zugehörige faire Kostenzuteilung vorgestellt. Die Funktionsweise der zentralen Optimierung der MEMAP-Plattform wurde vereinfacht dargestellt. Es wurden die Unterschiede zwischen der kooperativen und der nichtkooperativen Spieltheorie herausgearbeitet und festgestellt, dass sich

⁴⁴ Beisswenger, L. (2019). Lösungskonzepte zur Allokation von Kosten für einen kooperativen Energieaustausch auf Quartiersebene. Technical University of Munich.

erstere besser für den Energieaustausch im betrachteten Fall eignet. Daher wurden die wichtigsten Grundlagen der kooperativen Spieltheorie vorgestellt. Ausgewählte Lösungskonzepte wurden vorgestellt und anhand der Fairnesskriterien bewertet. Dabei schnitten der Nucleolus und der Shapley-Wert aufgrund ihrer starken Eigenschaften besonders gut ab. Daran anschließend wurde ein weiteres Lösungskonzept vorgestellt: die Einheitsbepreisung. Input und Output eines Gebäudes werden anhand der Einheitspreise bepreist, die sich aus den Dualwerten der Gleichungen der Strombedarfsdeckung und der Wärmebedarfsdeckung ergeben. Es wurden Kriterien diskutiert, die erfüllt sein müssen, damit das Lösungskonzept stabile Kostenzuteilungen erzeugt. Die Anreizkompatibilität wurde anhand eines Beispiels demonstriert. In einer Literaturübersicht wurden Arbeiten mit Bezug zum kooperativen Energieaustausch auf Quartiersebene und verschiedenen Lösungskonzepten zur Kostenzuteilung vorgestellt. In der Masterarbeit wurde das MEMAP-Modell vereinfacht in MATLAB umgesetzt. Außerdem wurde gezeigt, wie sich ausgewählte Lösungskonzepte in MATLAB implementieren lassen und damit Simulationen für verschiedene Beispiele durchgeführt. So wurden die Kriterien der Stabilität und Anreizkompatibilität für verschiedene Konfigurationen untersucht und anhand der Simulationsergebnisse diskutiert. In Kapitel 9 der Masterarbeit wurden abschließend die Ergebnisse der vorherigen Kapitel zu einer Methode zusammengefasst, die eine Auswahl des passenden Lösungskonzepts im Praxisfall möglich macht.

Kritisch ist, dass für die Garantie der großen Koalition als vorteilhafteste Konfiguration für alle Teilnehmer unter der verwendeten Kostenaufteilung, alle möglichen Koalitionen durchgerechnet werden müssen. Für N Teilnehmer im Verbund muss die Optimierung $(2^N - 1)$ -Mal durchgeführt werden. Der damit einhergehende Berechnungsaufwand ist nicht praxistauglich. Wie sich zeigt ist die faire und nachhaltige Allokation der Kosten sehr komplex. Dies ist ein wichtiges Learning aus dem Projekt.

Durch Hinzunahme realer Einschränkungen, wie vertraglicher und regulatorischer Rahmenbedingungen oder auch technischer Einschränkungen, können einige Freiheitsgrade evtl. beseitigt und die Berechnung der besten Kostenallokation ggf. vereinfacht werden. Hier bestehen Anknüpfungspunkte für weitere Forschung.

(E7) Akzeptanz und Verwertung

A. Stakeholder: Teilnehmer/Verbraucher Riemerling

Im Rahmen des Projekts wurden in einer Studie Anwohner im Testgebiet Riemerling über den Einsatz einer gebäudeübergreifenden und intelligenten Energieversorgung befragt. Ziel der Befragungen war es, ein tiefes Verständnis der Einstellungen und der Motivation und Motive der Befragten zu ermitteln, um die Akzeptanz von gebäudeübergreifender intelligenter Energieversorgung zu erfassen. Die Daten der Studie wurden mittels qualitativer Tiefeninterviews erhoben. Die Stichprobe umfasst 3 Teilnehmer. Für die Erhebung der Daten wurde ein Fragebogen erstellt, der 15 offene Fragen beinhaltet. Die Interviews wurden in einem Zeitraum von 12 Monaten per Telefoninterview durchgeführt. Die Daten wurden anschließend mittels qualitativer Inhaltsanalyse ausgewertet. Die Erkenntnisse sollen dazu beitragen zukünftig Endanwender zielgruppengerecht anzusprechen, um die Akzeptanz gegenüber solchen Energiesystemen zu erhöhen.

Zusammenfassung der Umfrage zur Akzeptanz von MEMAP-Konzept im Testgebiet München/Riemerling:

- MEMAP-Konzept wurde von den Befragten sehr positiv bewertet.
- Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz spielen eine wichtige gesellschaftliche Rolle. Aus diesem Grund schätzen die Befragten die Akzeptanz von MEMAP positiv ein.
- Die Befragten betonen, dass eine gute Informationsbasis und Aufklärung essenziell sind, um Bedenken zu vermeiden.
- Wichtige identifizierte Erfolgskriterien von den Befragten sind: Finanzielle Einsparung, geringer/kein (Mehr-)Aufwand, Förderung der Nachhaltigkeit.

Exemplarische Zitate aus den geführten Interviews:

- „Durch die Teilnahme an MEMAP erhoffe ich mir eine generelle Einsparung finanzieller oder umweltschonender Art. Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz muss gefördert werden, dafür muss der Gebäudeinhaber jedoch vom Projekt überzeugt werden. Das geht nur, wenn MEMAP finanziell tragbar ist.“
- „Durch die Teilnahme an MEMAP darf für die Gebäudeinhaber im Hinblick auf technische, finanzielle und bürokratische Aspekte kein Mehraufwand entstehen.“
- „Aufgrund meines sehr energiebedachten Umfelds wäre die Reaktion auf eine Teilnahme an MEMAP sicher sehr positiv.“
- „Für eine flächendeckende Realisierung von MEMAP ist ein Umdenken in der Gesellschaft hinsichtlich Umweltschutzes, Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz notwendig, damit der Planet auch für nachkommende Generationen lebenswert bleibt. Allgemein kann ich mir diese Realisierung jedoch gut vorstellen.“

B. Stakeholder: Betreiber von MEMAP-Plattform

Im Rahmen einer weiteren Befragung wurde die Akzeptanz des MEMAP-Konzeptes unter potentiellen Betreibern von MEMAP-Plattform(en) ermittelt. Um valide Ergebnisse sicherzustellen, wurden die Teilnehmer zunächst mit Hilfe eines (Online-) Workshops über MEMAP informiert und offene Fragen beantwortet. Anschließend wurden die Teilnehmer in einer schriftlichen (Online-) Befragung mit 15 Fragen zu MEMAP befragt. Die Anzahl der Umfrageteilnehmer beträgt 19. Die hierbei evaluierten Ergebnisse sind in der folgenden Tabelle 38 dargestellt.

Tabelle 39: Ergebnisse der Umfrage an potenzielle MEMAP-Plattformbetreiber

Wie würden Sie den Mehrwert und zusätzlichen Nutzen von MEMAP einschätzen? Sehr gering 0% Eher gering 16% Eher groß 42% Sehr groß 42%
Schätzen Sie die Umsetzung eines MEMAP Quartiers in den nächsten fünf Jahren als realistisch ein? Ohne Berücksichtigung der aktuellen Regulatorik/Gesetzgebung: Sehr unrealistisch 16% Eher unrealistisch 21% Eher realistisch 53% Sehr realistisch 10% Unter Berücksichtigung der aktuellen Regulatorik/Gesetzgebung: Sehr unrealistisch 21% Eher unrealistisch 42% Eher realistisch 26% Sehr realistisch 0% Keine Angabe 11%
Die Entwicklung zusätzlicher Energiedienste (Software) um die Aggregationsplattform stellt eine wirtschaftlich attraktive Lösung für zukünftige Märkte dar. Stimme gar nicht zu 0% Stimme eher nicht zu 11% Stimme eher zu 32% Stimme voll und ganz zu 51% Keine Angabe 6%
Wie wichtig ist eine standardisierte Kommunikation. Individuelle Lösungen sind ausreichend 0% Hilfreich, aber nicht erforderlich 26% Ohne ist die Vernetzung nicht möglich 68% Keine Angabe 6%
Wären Sie bereit für die Umsetzung Investitionsmaßnahmen zu tätigen, wenn sich diese in spätestens 20 Jahren amortisieren? Ja, bis 10.000€/Gebäude 37% Ja, bis 100.000€/Gebäude 26% Nein 26% Keine Angabe 11%
Wo sehen Sie die größten regulatorischen Hürden? Öffentliche Straßen als Barriere für elektrische Vernetzung 16% Bürokratische Pflichten eines Betreibers 68% Sonstiges 16%

Als Hürden für die Umsetzung von MEMAP wurden u.a. die aktuellen Regulatorien, Interessenkonflikte und Konkurrenzdenken bei einigen Akteuren, die unterschiedlichen Eigentümerstrukturen sowie technologische Verschiedenheit der Liegenschaften genannt. Besonders positiv wurden u.a. das gebäudeübergreifende Optimieren des Anlagenbetriebs, das Einbeziehen von CO₂ sowie das gemeinschaftliche Nutzen von Potenzialen genannt.

C. Erkenntnisse aus Gesprächen mit potentiellen Anwendern

Nachfolgend werden zusätzliche Erkenntnisse aus den direkten Gesprächen mit Institutionen, Organisationen und Unternehmen präsentiert, die im Laufe des Projektes bewusst angesprochen wurden, um Feedback von Externen Stakeholdern zum Projektfortschritt zu bekommen.

Folgende Gruppierung wurde vorgenommen:

- Institutionen mit strategischen Zielen neue Märkte zu erschließen oder neue Geschäftsmodelle zu etablieren (als Beispiel: E-on)
- Unternehmen mit großem Portfolio an Liegenschaften (als Beispiel: Goldbeck GmbH, Rewe Group, Investoren in Real Estate)
- Eigentümer / Betreiber von großen Infrastrukturen (z.B. Betreiber von Flughäfen)

- Eigentümer / Betreiber von kleineren bis mittel-großen Objekten (als Beispiel: BTB Betreiber Gesellschaft, LEG)
- Öffentliche Hand (als Beispiel: Landeshauptstadt München)

Folgende Herausforderungen sehen die oben genannten Gruppen bei der Umsetzung von MEMAP-Konzept:

- Der technologische Fortschritt erlaubt die Umsetzung solcher Konzepte wie MEMAP – nur als Referenzprojekte, weil: (a) Ökosystem fehlt (b) der Markt noch nicht reif ist (c) Energiewende mit all ihren Herausforderungen ist noch nicht greifbar.
- Es wird betont, dass der Unterschied zwischen Bestand- vs. Neubau deutlich ist. Retrofit-Lösungen für Bestandsbauten sind gewünscht und unabdingbar, leider stets mit hohen Investitionen verbunden. Für Neubau existieren keine klaren Vorgaben für die Ausschreibung, d.h. auch wenn die Umsetzung von MEMAP in einem Quartier gewünscht ist, fehlt es an einer rechtlichen/organisatorischen Grundlage, die sich wiederum in Ausschreibungstexten niedergeschrieben sein sollte.
- Des Weiteren sind überdimensionierte SCADA-/BMS-Lösungen zu erwähnen, die vom Preis-/Leistungsverhältnis die Umsetzung solcher Konzepte wie MEMAP verhindern.

Es wurden auch Lösungen diskutiert und aus der Sicht eines Ing.-Büros spezialisiert auf GA-/MSR-Technik bewertet:

- Es wird nach einer freien & Open-Source Building Management Software verlangt, die modular und stets erweiterbar ist, mit gängigen Open-Source Frameworks programmiert, offen für die Open-Source Community, Qualität muss bewahrt und Software-Shipping Prozesse müssen vereinfacht werden.
- Für die Öffentliche Hand lt. AMEV soll ab Projektgröße > 100T € ein spezialisiertes Ing.-Büro für MSR-Technik beauftragt werden, um genau solche Konzepte wie MEMAP realisieren zu können. Als Beispiel wird genannt: Architekten haben früher Brandschutzthemen mitbearbeitet, heutzutage wird es ausschließlich von einem Spezialisten geplant/umgesetzt.
- Für private Bauherren soll ein spezialisiertes Ingenieurbüro für MSR-Technik (Planung & Programmierung) bereits bei der Ausschreibung / Projektplanung tätig werden.
- Ein Ökosystem im Gebäudesektor (Building Automation Market) muss gefördert werden, wo Fortschritt und Qualität durch mehr Wettbewerb entsteht. Man sollte auf offene Systeme setzen und kein Vendor-Lock-In-Effekt erlauben.
- Die Ausbildung klassischer Ingenieur-Berufe im Bauwesen, genauso wie Meister, Elektriker, Fachhandwerker, Heizungsbauer, etc. müssen mehr „Software-Themen“ beinhalten.

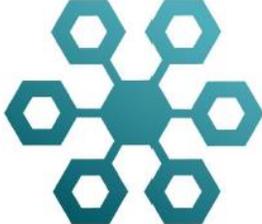
(E8) Key-Findings und Handlungsempfehlungen

A. Zusammenfassung der Key-Findings (Poster)



„Wie können Quartiere mit Hilfe digitaler Technologien nachhaltig gestaltet werden?“

10 KEY-FINDINGS



MEMAP

Multi-Energie Management und Aggregations-Plattform

Gebäudebestand

1. Anlagentechnik ist zu konservativ ausgelegt. Die **Überdimensionierung** von Wärmeerzeugungsanlagen ist deutlicher als gedacht.
2. Verteilte Wärmeversorgungen bieten Abhilfe. **Nahwärmenetze** müssen aber **bidirektional** werden um echte Prosumenten zu ermöglichen:
→ Neue Anforderungen für Hydraulik & Steuerung machen Forschungsarbeiten und Feldtests notwendig.
3. Neuinstallationen im Bestand müssen **jetzt schon** zukunftsfähig sein um die Klimaneutralität 2045 zu ermöglichen.

Standardisierung

4. Es fehlen **einheitliche Datenmodelle** und leicht integrierbare und klar definierte **Schnittstellen** für die **Interoperabilität** von Gebäudeenergiesystemen. **OPC UA** bietet dafür einen sehr guten Werkzeugkasten.
*→ Der Prototyp eines **abstrahiertes Datenmodells inkl. standardisiertem Adresskennzeichnungssystems** wurde im Projekt erarbeitet. Ein Standard aber muss von der Branche gemeinsam erarbeitet und etabliert werden.*
5. Für die smarte systemische Integration von **Quartieren als Aggregatoren** sind auch für (Strom-)Bezugspreis und Flexibilität **standardisierte Schnittstellen** notwendig.

Digitalisierung

6. Auch Bestandsgebäude bräuchten **Energie Management Systeme (EMS)** – Open Source Software ist hier günstig.
7. Mit einer **digitalen Planung** mit **BIM** lassen sich positive Netzwerkeffekte und Synergien bereits früh einpreisen.

Neue Technologien

8. **Modellprädiktive Regeleung (MPC)** ist für ein Quartierssystem mit gewissen Unsicherheiten ein attraktiver Ansatz, braucht aber robuste Vorhersagen zu Erzeugung, Verbrauch und Speicherzuständen (inkl. Stand-by-Verluste).
*→ **Künstliche Intelligenz** kann hier Lösungen liefern, braucht aber eine zentrale Datenbank: Eine Europäische semantische Dateninfrastruktur wie **GaiaX** kann externe Services für solche Quartiersplattformen ermöglichen.*

Realisierung

9. Die Rentabilität wird mit steigendem CO₂-Preis immer besser. Für eine Verteilung der Einsparungen fehlen aber gerechte **Vergütungsmodelle**.
10. Derzeit geltenden Regularien schaffen Unsicherheit und hemmen Investitionen:
63% der befragten potentiellen Anwender sehen eine Umsetzung von MEMAP in den nächsten 5 Jahren als realistisch an, aber nur unter Berücksichtigung der aktuellen Regulariorik. **26%**
*→ Hier braucht es **Änderungen des regulatorischen Rahmens**, die einen Austausch verschiedener Energieträger auf Quartiersebene ermöglichen.*

Abbildung 73: Poster zu den Key-Findings des Projektes

i. Gebäude sind wichtige Säule der Energiewende

Im Zusammenhang mit der laufenden Energiewende in Deutschland erhält der Gebäudebereich große Aufmerksamkeit im Hinblick auf die Erschließung von Effizienzpotenzialen und die Integration erneuerbarer Energien. Durch verbesserte Komponenten und Integration innovativer Schlüsseltechnologien, wie Speicher und lokaler, erneuerbaren Energieerzeuger, unter anderem im Wärmesektor, sollen Gebäude in Zukunft einen wachsenden Anteil an der bedarfsnahen, dezentralen Bereitstellung von Strom, Wärme und Kälte übernehmen. Damit werden frühere passive Verbraucher zu aktiven Prosumern. Prosumer sind dezentrale Einheiten, welche sowohl Leistung aus dem übergeordneten Energiesystem beziehen (Consumer), als auch Leistung in dieses Einspeisen können (Producer) und über die Zeit zwischen den beiden Modi wechseln. Gebäude mit eigenen Erzeugern müssen dafür lokal oder regional miteinander vernetzt sein und nehmen aktiv am Energiesystem teil. MEMAP bietet exakt für diese Vernetzung eine Softwarelösung zum effizienten Betrieb im Verbund.

ii. Überdimensionierung der Anlagentechnik ist deutlicher als angenommen

Aktuell benötigen Gebäude mit ihrer Anlagentechnik Energie - meist in Form von Wärme und Strom. Die Anlagentechnik ist dabei auf die höchsten zu erwartenden Verbräuche ausgelegt und verfügt entsprechend über überdimensionierte Komponenten wie Heizkessel, die häufig im Teillastbetrieb unwirtschaftlich betrieben werden.

Die deutliche Überdimensionierung von Anlagen wurde im Testgebiet in Riemerling bestätigt und quantifiziert (siehe auch E3-Riemerling sowie E6). In unsrem Fall verfügte das Testgebiet über 6 Gebäude mit 9 Wärmeanlagen, davon 4 Ölkessel und 5 Gas-Kessel (2x Gas-Niedertemperatur, 3x Gas-Brennwertkessel). Die gesamte Installationsleistung war 1.683 kW. Die maximal benötigte Wärmeleistung lag bei 368 kW. Die installierte Kesselleistung betrug damit das 4,5-fache. Die Überdimensionierung ist deutlicher ausgefallen als erwartet. Eine Vernetzung der Anlagen für eine gemeinsame Versorgung mit Hilfe des Verbunds in MEMAP kann einen Beitrag leisten die Energieeffizienz zu erhöhen und Kosten zu reduzieren. Dies wurde simulativ und anhand von Wirtschaftlichkeitsberechnungen gezeigt (siehe Abschnitt E5.O und E6).

iii. Im Verbund bringen Modernisierungsmaßnahmen mehr Synergieeffekte

Modernisierungsmaßnahmen im Verbund bieten Vorteile in mehrfacher Hinsicht. So kann die Modernisierung einer eigenen alten Anlage nicht nur die eigene Situation verbessern, sondern eine effiziente Anlage ersetzt durch die Optimierung die ineffizienteste Anlage im Verbund. Gegebenenfalls können sogar mehrere Anlagen ersetzt werden, falls eine große neue moderne Anlage eingesetzt wird. Der zweite Vorteil ist, dass neue Anlagen zu mehr Synergien beitragen. So kann ein BHKW gleichzeitig Strom und Wärme liefern und im Verbund mit mehr Betriebsstunden betrieben werden, weil die Mindestproduktion im Verbund öfter benötigt wird. Eine PV-Anlage im System kann zum Eigenverbrauch des Verbundes beitragen, oder beispielsweise die Speicher für Strom oder auch Wärme besser ausnutzen. Wärmepumpen können sehr flexibel auf vorhandene erneuerbare Stromerzeuger oder externe Signale wie Strompreise oder CO₂-Emissionsfaktoren im Stromnetz reagieren.

iv. Digitalisierung und EMS sind grundlegend für die Vernetzung

Die Grundlage für einen solchen optimierten Verbund ist die digitale Vernetzung. Dazu werden die Gebäude, beziehungsweise die Energiezentralen und Energiemanagementsysteme (EMS) über eine Plattform miteinander vernetzt, der bestmögliche Mix mit Hilfe von Prognosen und historischen Daten berechnet und die berechneten Einsatzpläne direkt an die entsprechenden Schnittstellen kommuniziert. Wichtig ist, dass die Anlagen nicht direkt kommunikationstechnisch verbunden werden, sondern dass das EMS eine einheitliche Schnittstelle bietet. Um eine weite Verbreitung zu

gewährleisten, findet die Kommunikation möglichst generisch und mit standardisierten Schnittstellen statt.

v. Leicht integrierbare, klar definierte Schnittstellen sind enorm wichtig

Für diese generische Repräsentation existiert eine Reihe von zuverlässigen Mechanismen und Kommunikationsprotokollen, wie beispielsweise das im Projekt gewählte Protokoll OPC UA. Diese decken bereits einige grundlegende und wichtige Anforderungen ab (z.B. Möglichkeiten zur Absicherung der Kommunikation, lose Kopplung von Systemen – oder in anderen Worten – eine modular gestaltbare Architektur einzelner Anwendungen und Systeme). Nichtsdestotrotz benötigt die Kommunikation zum Austausch von Daten ein gutes abstraktes Informationsmodell, welches die Anlagen gut abbilden und für die Steuerung eingesetzt werden kann.

Im Projekt wurde ein solches Informationsmodell ausgearbeitet und in mehreren Versionen präsentiert. Es gibt die Veröffentlichung durch das Papier Bytschkow et. al. (2019), sowie eine darauf basierende Arbeit auf der Konferenz ISGT Europe (Innovative Smart Grid Technologies Europe)⁴⁵. Im Rahmen einer Promotion gibt es eine ausführlichere Version mit weiteren Datenpunkten⁴⁶. Eine noch ausführlichere technische Version bietet das endgültige Datenmodell (siehe E1.B).

vi. Aktuelle EMS können gut angepasst werden, sobald passende Schnittstellen existieren

Die technische Umsetzung der Steuerung erfolgt durch eigenständige, gebäudespezifische Energie Management Systeme (EMS), welche meist auf einen ganz speziellen Bereich im Gebäude ausgerichtet sind, beispielsweise Heizung und Kühlung, oder sind Teil eines größeren Gebäudeautomatisierungssystems und werden deswegen auch als BEMS (Building Energy Management System) bezeichnet. Diese eignen sich hervorragend als grundlegendes technisches Fundament einer Vernetzung, müssen jedoch an einigen Stellen für eine Vernetzung fit gemacht werden. Wie sich im Projekt gezeigt wurde, sind dabei zwei Faktoren essenziell: Eine geeignete Schnittstelle (OPC UA) und die Fähigkeit der EMS die von der MEMAP-Plattform erhaltenen Leistungswerte in technische Vorgaben für die Regelung der Anlagen umzusetzen.

B. Handlungsempfehlungen und Ausblick

Um das Geschäftsmodell, das sich hinter MEMAP verbirgt, beurteilen zu können, ist es notwendig, den geltenden regulatorischen Rahmen genauer zu betrachten. Insbesondere die Trennung zwischen der Energielieferung an Dritte innerhalb einer Kundenanlage gemäß § 3 Nr. 24a bzw. 24b EnWG und der Einstufung als Energieversorger spielt dabei eine Hauptrolle. Während Strom, der innerhalb einer Kundenanlage erzeugt und verbraucht wird, in der Regel von Netzentgelten und netzseitigen Abgaben und Umlagen befreit ist, sind sämtliche andere Anlagen, die nicht unter diese Definition fallen, davon nicht befreit. Für das Quartierskonzept spielt diese Unterscheidung eine tragende Rolle. Zwar gibt es Quartiere, in denen die darin eingesetzten Anlagen als Kundenanlagen eingestuft werden können, jedoch ist die Unterscheidung gerade bei größeren Quartieren nur durch eine Einzelfallprüfung möglich. Vom Ausgang dieser Prüfung ist wesentlich abhängig, ob sich der Betrieb eines Energieverbunds als wirtschaftlich erweist. Eine gesonderte Regelung für Energieverbände wäre sinnvoll – besonders da diese nicht nur das Potenzial einer Kostenersparnis bei der Energieversorgung bergen, sondern auch zur Reduktion klimaschädlicher Emissionen

⁴⁵ D. Bytschkow, A. Capone, J. Mayer, M. Kramer and T. Lickleder, "An OPC UA-based Energy Management Platform for Multi-Energy Prosumers in Districts," *2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe)*, 2019, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGTEurope.2019.8905725.

⁴⁶ Denis Bytschkow, A generic hierarchic architecture for the coordination of energy management systems, PHD Thesis, Technische Universität München, 2020.

beitragen können. Die Situation ist insofern besonders prekär, da Quartiere als ein Schlüsselement zum Gelingen der Energiewende angesehen werden. Für den Wärmebereich hat sich das Konzept von vernetzten kleineren dezentralen Erzeugern oder flexiblen Prosumern bisher noch nicht in der Anwendung durchgesetzt, findet aber in der technischen Forschung und Entwicklung zunehmend Beachtung. Angesichts der Dringlichkeit der Wärmewende, sollte hier zeitgleich zu den technischen Entwicklungen frühzeitig ein geeigneter regulatorischer Rahmen geschaffen werden, um eine schnelle Umsetzung im Feld zu ermöglichen. Dieser regulatorische Rahmen muss die rechtlichen Bedingungen festlegen und ökonomische Anreize schaffen für die technische Infrastruktur, die es erlaubt auch wärmeseitig flexibel und kurzfristig Verbraucher in der Nachbarschaft mitzuversorgen oder von dezentralen Erzeugern in der Nachbarschaft versorgt zu werden.

Vernetzte Quartiere bilden bei der Erreichung der Klimaziele einen wesentlichen Baustein, der noch längst nicht ausreichend genutzt wird. Das Planungswerkzeug in MEMAP erlaubt die Vorbetrachtung von Quartieren und kann damit zur Lösungsfindung beitragen. Die MEMAP-Plattform – oder ähnliche Software-basierte Lösungsansätze – unterstützen im Anschluss den laufenden Betrieb. Eine Umsetzung von nachhaltigen Quartieren, die sich dadurch auszeichnen, dass Gebäude auf intelligente Art und Weise miteinander kommunizieren und Energie optimal einsetzen, wird im Moment noch von regulatorischen Hürden erschwert und ist daher im Markt noch kaum etabliert. Faktoren, die die Rahmenbedingungen in den nächsten Jahren vereinfachen könnten, sind eine Verteuerung der CO₂-Preise, eine mutige Förderpolitik – aber vor allem eine Änderung des regulatorischen Rahmens.

2.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Arbeiten wurden wie geplant durchgeführt. Wie im Erstantrag und Aufstockungs- bzw. Verlängerungsantrag dargestellt waren sie für die Durchführung des Projektes notwendig und angemessen.

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

Im Projektzeitraum sind abgesehen von den oben beschriebenen Fortschritten keine Kenntnisse über Ergebnisse Dritter bekannt geworden, welche für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

Es war zu beobachten, dass die Forschungsförderung verstärkt den Fokus auf die Umsetzung von Energiemanagement im Quartier gelegt hat. Hierbei sind insbesondere die Reallabore SmartQuart und TransUrban.NRW zu nennen. Hinsichtlich der Regularien wurde 2020 der Quartiersbegriff im §107 GebäudeEnergieGesetz (GEG) verankert. Politische Leitlinien und ökonomische Anreize, wie die CO₂-Bepreisung über das Brennstoffemissionshandelsgesetz (BEHG) fördern den smarten Einsatz effizienter Technologien und Innovationen in diesem Bereich. Dies führte auch dazu, dass verstärkt junge Unternehmen und Start-Ups aus diesem Bereich erfolgreich in den Markt drängen. Beispiele hierfür sind GridX⁴⁷ oder Ampeers Energy⁴⁸. Die Übernahme⁴⁹ von GridX durch e.on zeigt, dass auch bei etablierten Unternehmen der Energiebranche ein Umdenken begonnen hat und das Interesse an neuartigen Versorgungskonzepten auf Quartiersebene auch dort steigt.

2.4 Erfolgte und geplanten Veröffentlichungen von Projektergebnissen

Studentische Arbeiten

Datum	Titel	Autor (Betreuer)	Art der Arbeit
2018	Development and evaluation of a DLT-based marketplace for sector coupling in quarters	Andreas Thut (Denis Bytschkow, Markus Duchon, Maximilian Irlbeck)	Masterarbeit, TU München
2018	Bayesian Neural Network Based Control of a District Heating Network	Conrad Helminger (Alexandre Capone)	
2019	Machine Learning for Operational Optimization of District Heating Systems	Florian Andres (Dr. Markus Duchon, Denis Bytschkow)	Masterarbeit, TU München

⁴⁷ <https://de.gridx.ai/>

⁴⁸ <https://ampeersenergy.de/>

⁴⁹ <https://www.handelsblatt.com/>

2019	Lösungskonzepte zur Allokation von Kosten für einen kooperativen Energieaustausch auf Quartiersebene	Lino Beißwenger (Michael Kramer)	Masterarbeit, TU München
2019	Sector Coupling with Optimization: A comparison between single buildings and combined quarters.	Lena Heidemann (Denis Bytschkow)	Forschungspraktikum, TU München
2020	Ökologische und wirtschaftliche Bewertung von gebäudeübergreifenden Energiekonzepten für ein Quartier in München	Stephan-Arved Bröcker (Claudius Reißer)	Masterarbeit, Hochschule Augsburg
2020	A generic hierarchic architecture for the coordination of energy management systems	Denis Bytschkow (Dr. Markus Duchon)	Dissertation, TU München

Publikationen

Datum	Titel	Autoren	Medium
2019	An OPC UA-based Energy Management Platform for Multi-Energy Prosumers in Districts	D. Bytschkow, A. Capone, J. Mayer, M. Kramer, T. Lickleder	Proc. of the 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) Conference Europe, Bucharest
2019	Poster Abstract: Sector Coupling with Optimization: A comparison between single buildings and combined quarters.	Lena Heidemann, Denis Bytschkow, Alexandre Capone, Thomas Lickleder and Michael Kramer	Abstracts from the 8th DACH+ Conference on Energy Informatics
2019	Poster: Multi-Energy Management and Aggregation-Plattform	Lickleder, T.; Capone, A.; Kramer, M.	9th Energy Colloquium of the Munich School of Engineering - Shaping a Sustainable Energy Future
07/2019	Werkzeug für die Realisierung von nachhaltigen Quartieren	Claudius Reiser	inpack mediaverlag, Beilage WirtschaftsWoche
02/2020	Nachhaltige Quartiere realisieren. Entwicklung einer Softwareumgebung für die Gebäude- und Sektorkopplung	MEMAP Forschungsgruppe	HeizungJournal
03/2020	Werkzeuge für die Realisierung von nachhaltigen Quartieren	MEMAP Forschungsgruppe	BWK Energie
03/2020	Nachhaltige Quartiere. Regelung und Steuerung der Gebäude- und Sektorenkopplung	MEMAP Forschungsgruppe	EW Magazin für Energiewirtschaft
03/2020	Werkzeuge für die Realisierung von nachhaltigen Quartieren	MEMAP Forschungsgruppe	netzpraxis Sonderteil Sonne, Wind & Wärme
03/2020	Entwicklung einer Softwareumgebung zur Regelung und Steuerung	MEMAP Forschungsgruppe	Moderne Gebäudetechnik
03/2020	Entwicklung einer Softwareumgebung zur Regelung und Steuerung	MEMAP Forschungsgruppe	Moderne Gebäudetechnik - Web: tga-praxis.de
04/2020	Gebäude- und Sektorkopplung steuern	MEMAP Forschungsgruppe	Die Kälte + Klimatechnik - Web: diekaelte.de

2021	Poster: Testing of multi-energy management platform in a microgrid laboratory environment	Lickleder, T.; Mayer, J.; Bytschkow, D.; Capone, A.; Kramer, M.	11th Energy Colloquium of the MSE: Energy Sciences for Europe's Green Deal.
07/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	Web. www.immoclick24.de
07/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	IKZ Haustechnik
08/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	Web. www.lifepr.de
08/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	Web: www.presse-blog.de
08/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	Web: www.it-it-proof.de
08/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	Web: www.50komma2.de
08/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	50Komma2
08/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	www.ikz.de
08/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	Web: www.heizungsjournal.de
08/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	Liegenschaft Aktuell
09/2021	Thermohydraulic model of Smart Thermal Grids with bidirectional power flow between prosumers	Lickleder, T.; Hamacher, T.; Kramer, M.; Perić, V. S.	Journal "Energy" (Hrsg.: Elsevier)
11/2021	MEMAP-Projekt schreitet voran: Neu entwickelte Softwareumgebung zur Regelung der Energieversorgung von Quartieren tritt in Testphase ein	MEMAP Forschungsgruppe	HeizungsJournal
11/2021	Holonic architectures for IoT-empowered energy management in districts	J. Mayer; V. Pampana; M. Bernard; D. Bytschkow; T. Stohl; P. Gupta; M. Duchon	2021 IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)

11/2021	ProsNet – a Modelica library for prosumer-based heat networks: description and validation	Elizarov, I.; Lickleder, T.	Journal of Physics: Conference Series
11/2021	Characteristics and Challenges in Prosumer-Dominated Thermal Networks	Lickleder, T.; Zinsmeister, D.; Elizarov, I.; Perić, V.; Tzscheuschler, P.	Journal of Physics: Conference Series

Der Quellcode der MEMAP-Softwareumgebung kann abgerufen werden unter <https://git.fortiss.org/ASCI-public/memap> .

Weitere Veröffentlichungen sind durch das Konsortium über die Projektlaufzeit hinaus geplant zu folgenden Themen:

- Wissenschaftliches Paper zum Live-Management von Multi-Energie-Strömen in intelligenten Bezirken: Von der Modellierung zur Software-Implementierung und Laborvalidierung
- Beitrag im Blog von AllPlan über den Import von BIM Daten in das MEMAP Planungstool

Öffentlichkeitswirksame Veranstaltungen

MEMAP wurde durch das Konsortium auf folgenden öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen vorgestellt, der aktuelle Stand des Forschungsprojektes wurde diskutiert und mit relevanten Stakeholdern vernetzt:

- 15. Januar 2018: Präsentation von MEMAP beim Blockchain Bundesverband in Berlin im Rahmen eines Treffens des Energieausschusses
- 22. Januar 2018: Vorstellung von MEMAP im Rahmen eines Leitliniengesprächs des Wirtschaftsrats in Berlin zum Thema Digitalisierung im Energiebereich
- 26. Januar 2018: Diskussion von MEMAP und seiner Verbindung zum Thema Blockchain mit Vertretern der Hochschule Reutlingen
- 2. Februar 2018: Präsentation von MEMAP im Rahmen des 7. Kongress „Energieautonome Kommunen“ in Freiburg
- Februar 2018: Vorstellung von MEMAP beim ZD.B Netzwerktreffen Verbraucherbelange
- 21. März 2018: Präsentation von MEMAP im Rahmen der „Roadshow Blockchain“
- 11. April 2018: Präsentation von MEMAP beim „European Energy Lab 2030“ in München
- 19. April 2018: Präsentation von MEMAP beim 3. Treffen der Münchner Kompetenzrunde Smart Data
- 24. April 2018: Präsentation von MEMAP im Rahmen eines Workshops zum Thema Sektorkopplung mit Bayern Innovativ
- 27. April 2018: Vorstellung von MEMAP bei der Vereinigung der Bayerischen Wirtschaft
- 21. Juni 2018: Vorstellung von MEMAP bei der KOS Energie in Hallbergmoos
- 21. Juni 2018: Diskussion von MEMAP mit Vertretern der Firma Consolinno in Garching
- 27. Juni 2018: Vorstellung von MEMAP vor einer tschechischen Delegation zum Thema Smart City
- 10.7.2018: Vorstellung von MEMAP bei der Veranstaltung Energie Digital Kommunal
- 1.10.2018: Vorstellung von MEMAP bei Blockchain Energie Meet-up bei PWC
- 12-15.11.2018: Präsentation von MEMAP bei der Smart City Expo, Barcelona
- 27. – 28.11.2018: Teilnahme am 5. Projektleitertreffen des Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen in Detmold

- 29.11.2018: Vorstellung von MEMAP bei einem Workshop zu elektrischer Lastprognose im Zusammenhang mit dem Forschungsprojekt StorageLink an der TUM
- 10.12.2018: Präsentation von MEMAP bei dem Vortrag bei der VDE: „Sektorkopplung auf Quartiersebene: Ein wesentlicher Beitrag zur Energieeffizienz“
- 06.05.2019: Teilnahme am 6. Projektleitertreffen des Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen in Potsdam
- 12.07.2019: Präsentation von MEMAP bei der Eröffnung des Labors für Combined Smart Energy Systems (CoSES) an der TUM
- 01.08.2019: Präsentation von MEMAP beim 9. Colloquium der Munich School of Engineering an der TUM
- 06.11.2019: Ausrichtung des 7. Projektleitertreffen des Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen in Garching an der Munich School of Engineering und Präsentation von MEMAP
- 12. – 14.11.2019: Präsentation von MEMAP als Unteraussteller von Bayern International auf der European Utility Week, Paris
- 19. -21.11.2019: Präsentation von MEMAP als Unteraussteller von Bayern International auf dem Smart City Expo World Congress, Barcelona
- 11.- 13.02.2020: Prominente Platzierung von MEMAP auf dem ZD.B Stand auf der E-world 2020, Essen. Hier wurde u.a. der Kontakt zu TopEnergy hergestellt, die das Projekt maßgeblich in der Wirtschaftlichkeitsberechnung unterstützen.
- 27.04.2020: Präsentation von MEMAP in einem gemeinsamen Webinar mit dem Innovationsnetzwerk SmartQ
- 15.06.2020: Präsentation von MEMAP bei den TechDays Munich im Bereich Cleantech
- 15.06.2020: Vorstellung von MEMAP bei der EnergieServicePlus GmbH / LEG Immobilien
- 26.04.2021: Präsentation von MEMAP beim 10. Colloquium der Munich School of Engineering an der TUM
- 05.05.2021: Präsentation von MEMAP beim europäischen Unternehmensverband für digitale und dezentrale Energielösungen (SmartEn)
- 01.06.2021: Teilnahme am Workshop „Digitales Quartiersenergiemanagement“ der Begleitforschung EnergieWendeBauen
- 08.06.2020: Präsentation von MEMAP bei den TechDays Munich in der Session Smart, Green Lean: Best of Cleantech
- 18.06.2021: Videobeitrag über das MEMAP-Forschungsprojekt zum bundesweiten Digitaltag 2021
- 28.06.2021: Onlinepräsentation zum Quartiersenergiemanagement auf dem 7. IEEE World Forum of IoT in New Orleans, US
- 28.07.2021: MEMAP-Workshop für potenzielle Nutzer und Betreiber von MEMAP, um das Konzept und die Software bekannt zu machen
- 30.09.2021: Öffentliche Abschlussveranstaltung (online) und Ergebnispräsentation

Das Interessenten-Netzwerk von MEMAP wurde kontinuierlich erweitert und verfügt nun über eine breitgefächerte Interessenten- und Kontaktbasis im Ökosystem. Diese können u.a. bei den Umfragen (sh. Arbeitspaket 8) integriert werden.

Homepage

Über eine eigene Projekthomepage wurden während der Projektlaufzeit Neuigkeiten zum Projekt veröffentlicht und Projektveranstaltungen beworben. Die Homepage war / ist zu erreichen unter <https://memap-projekt.de/>.

3 ANHANG

(A1) Energiebedarf und Lastgänge für die Wirtschaftlichkeitsberechnung

In diesem Abschnitt wird die Ermittlung der Energiebedarfe (Strom und Wärme) dokumentiert. Gleichzeitig werden die jeweiligen Lastgänge und deren Herkunft beschrieben.

Für alle Lastgänge gilt: Zwischen dem 01.01.2020 00:00 und dem 31.12.2020 23:00 werden 8784 Zeitschritte abgebildet (2020 ist ein Schaltjahr).

A. Elektrische Energie

i. Zusammenfassung

Eine Zusammenfassung der ermittelten Strombedarfe und deren Grundlage ist der nachfolgenden Tabelle zu entnehmen. Tabelle 40 beschreibt die Herkunft der Lastgänge, da hierfür keine Messdaten vorlagen.

Tabelle 40: Allgemeine Datengrundlage: Strombedarf

	Strombedarf	Spez. Strombedarf	Grundlage
Montessori	65,7 MWh/a	14,2 kWh/m ² a	Stromabrechnung
Hotel am Wald	23,1 MWh/a	39,1 kWh/m ² a	Stromabrechnung
Hackl 19	27,7 MWh/a	12,6 kWh/m ² a	VDI-Mittelwert (angepasst)
Hackl 23/25	227,7 MWh/a	110,6 kWh/m ² a	KEW-Verbrauchsdaten (angepasst)
Hackl 27	180,3 MWh/a	124,1 kWh/m ² a	KEW-Verbrauchsdaten (angepasst)
Kotter	88,0 MWh/a	23,8 kWh/m ² a	Stromabrechnungen Hochrechnung

Tabelle 41: Allgemeine Datengrundlage: Grundlagen der Strom-Lastgänge

	Grundlage der Lastgänge
Montessori	Lastgang der JP-Realschule in Nürnberg
Hotel am Wald	Standardlastprofil Haushalt
Hackl 19	Standardlastprofil Gewerbe

Hackl 23/25	KEW-Verbrauchsdaten
Hackl 27	KEW-Verbrauchsdaten
Kotter	Standardlastprofil Gewerbe

ii. *Montessori Schule*

Der ermittelte Strombedarf der Montessori-Schule basiert auf dem Durchschnitt der Stromabrechnungen seit September 2017.

Als Grundlage für den Lastgang wurde der von der Firma Sauter-Cumuls GmbH in einer anderen, vergleichbaren Schule aufgezeichnete Lastgang verwendet (Johann-Pachelbel-Realschule in Nürnberg). Dieser wurde auf den Strombedarf von 65,7 MWh/a skaliert:

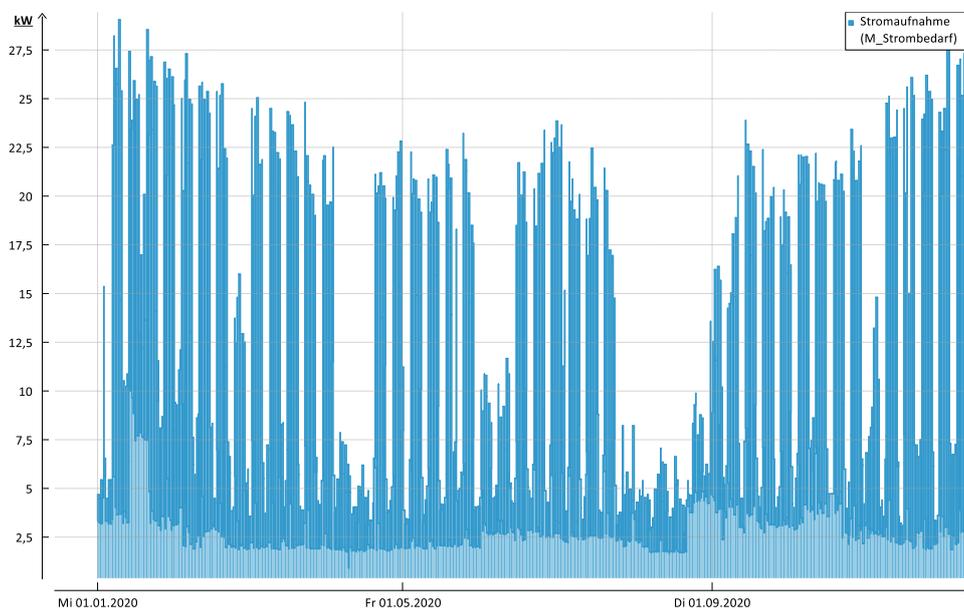


Abbildung 74: Stromlastgang Montessori Schule (Jahresansicht)

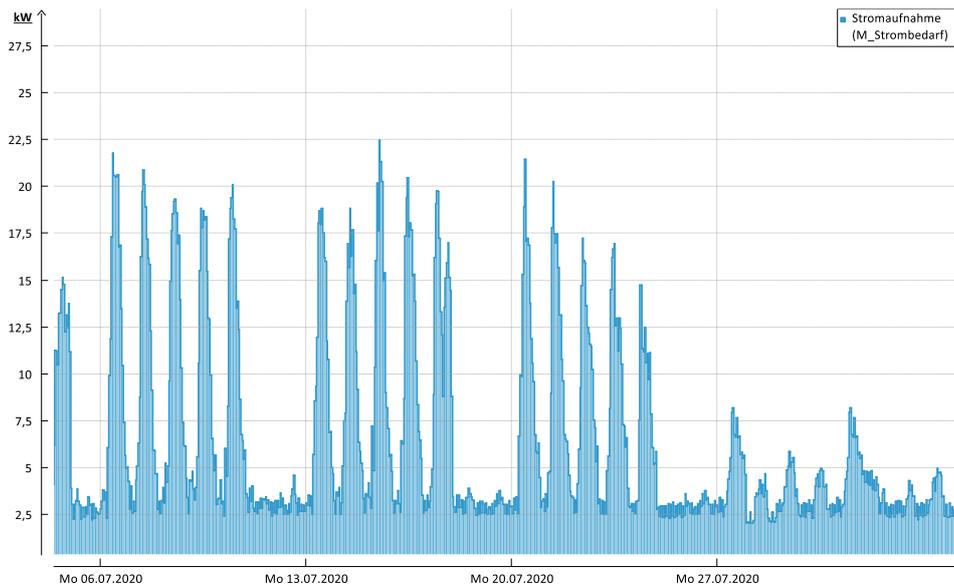


Abbildung 75: Stromlastgang Montessori-Schule (Monatsansicht)

Die maximale Leistungsaufnahme liegt bei ca. 30 kW. Gut zu erkennen sind vor allem die Schulferien (ab 27.07.2020 in der Monatsansicht) sowie die einzelnen Wochentage und Wochenenden.

iii. Hotel am Wald

Für das Hotel stehen die Stromabrechnungen der letzten 3 Jahre zur Verfügung. Daraus wurde ein durchschnittlicher Strombedarf von ca. 23,1 MWh/a gemittelt.

Für den Lastgang wurde das Standardlastprofil „H0 Haushalt“ des Bundesverbandes der Energie- und Wasserwirtschaft verwendet (Bdew 2020) und dieses entsprechend skaliert:

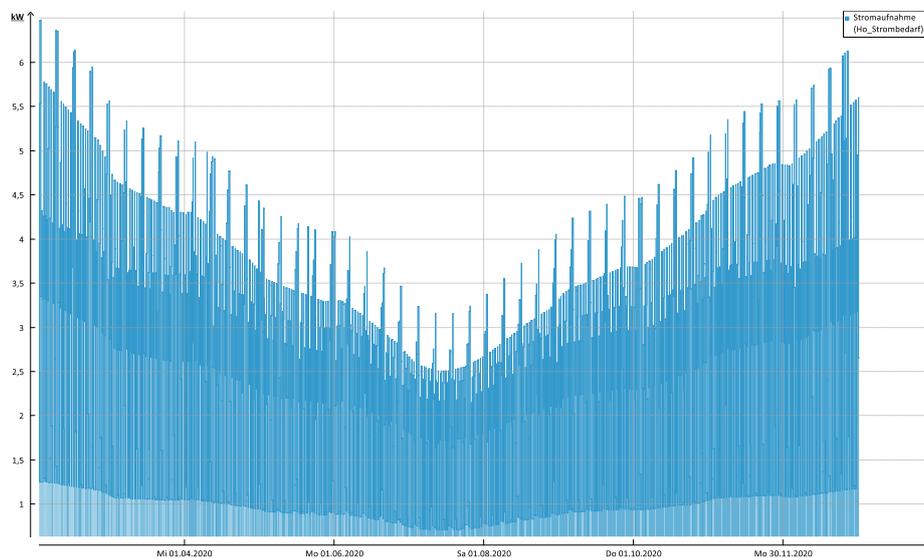


Abbildung 76: Stromlastgang Hotel am Wald (Jahresansicht)

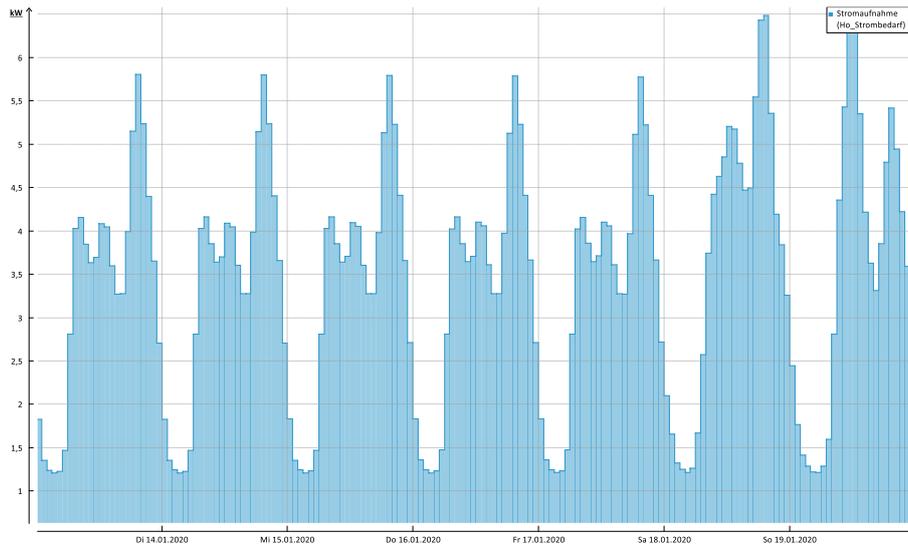


Abbildung 77: Stromlastgang Hotel am Wald (Wochenansicht)

Die maximale Leistungsaufnahme liegt bei ca. 6,5 kW.

Das Standardlastprofil „H0 Haushalt“ lässt sich gut auf das Hotel anwenden, da hierbei der Verbrauch am Wochenende und in den Abendstunden steigt. Also genau dann, wenn sich die meisten Gäste im Hotel aufhalten. Eine starke oder schwache Ausbuchung des Hotels kann damit aber nicht nachgebildet werden.

iv. Kotter

Beim Kotter-Gebäude wird jeder Mieter separat abgerechnet. Zusätzlich gibt es zwei Stromzähler, über die der Allgemeinstrom (Treppenhäuser, Aufzug etc.) abgerechnet wird.

Da nicht alle Mieter ihre Abrechnungsunterlagen zur Verfügung gestellt haben, musste der Strombedarf über die Flächen anteilig hochgerechnet werden.

Beispiel: Für die nördlichen Büroräume im 1. OG waren Abrechnungsunterlagen verfügbar, für die nördlichen Büroräume im 2. OG aber nicht. Da die Flächen in beiden Stockwerken annähernd gleich sind, wurde für die nördlichen Büroräume im 2. OG derselbe Strombedarf angesetzt wie im 1. OG.

Auf diese Weise ergibt sich ein Gesamt-Strombedarf von ca. 88,0 MWh/a. Zum Vergleich wurde die VDI 3807-2 sowie der „Office Service Charge Analysis Report“ (OSCAR – Büronebenkostenanalyse, (Jones Lang Lasalle SE 2019)) herangezogen:

Tabelle 42: Vergleich des Strombedarfes

	Strombedarf	spez. Strombedarf	Stromkosten	Abweichung
Stromabrechnung Hochgerechnet	88.009,37 kWh/a	20,2 kWh/m²a	22.612,80 €	/
VDI-Mittelwert	82.610,48 kWh/a	19,0 kWh/m ² a	21.231,76 €	7 %
JLL OSCAR	0,37 €/m ² /Monat (Ø in Deutschland)		19.300,68 €	17 %

Zur Berechnung der Stromkosten wurde der Kottler Strompreis (25,58 ct/kWh und 99,69 €/a) verwendet. Es zeigt sich, dass der hochgerechnete Strombedarf rund 7 bzw. 17 % über den Vergleichswerten liegt. Da die 88,0 MWh/a aber hauptsächlich auf realen Stromabrechnungen beruhen, wird dieser Wert für die Simulation verwendet.

Für den Lastgang wurde das Standardlastprofil „G1 - Gewerbe werktags 8-18“ des BDEW verwendet (Bdew 2020) und dieses entsprechend skaliert:

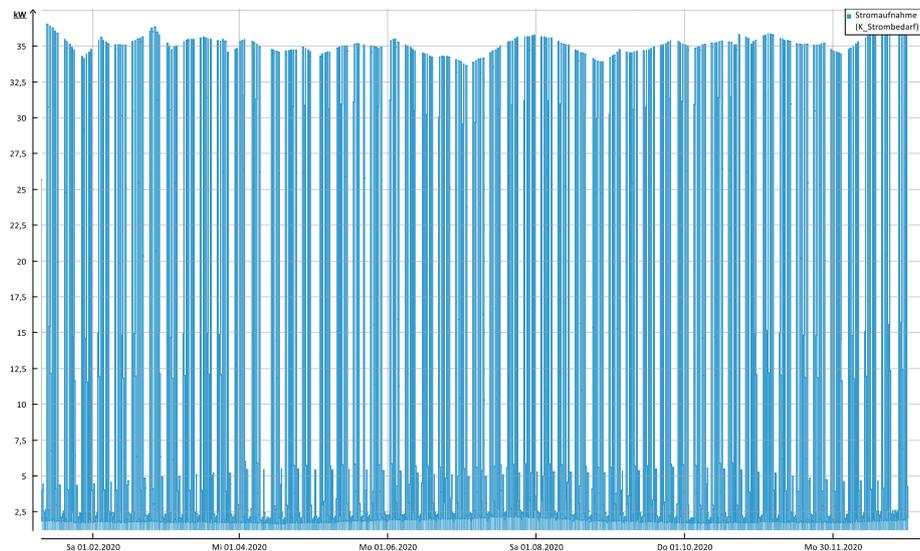


Abbildung 78: Stromlastgang Kottler (Jahresansicht)

Die maximale Stromaufnahme liegt bei ca. 37 kW.

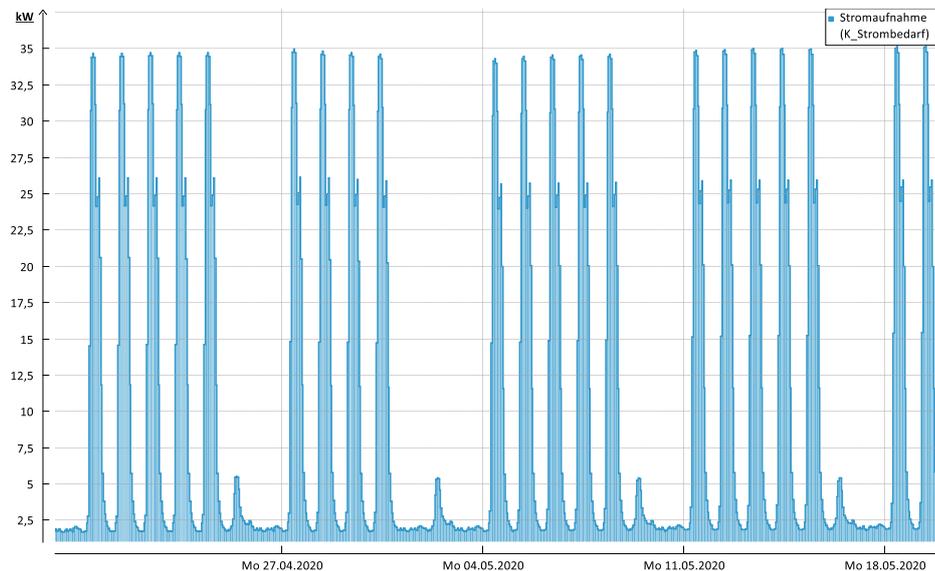


Abbildung 79: Stromlastgang Kottler (Monatsansicht)

Gut zu erkennen sind die einzelnen Wochentage und Wochenenden sowie der 1. Mai-Feiertag in Abbildung 78.

v. Hackl 19

Für das Hackl-19-Gebäude standen weder Abrechnungsunterlagen noch Messwerte zur Verfügung. Daher ist der einzige Anhaltspunkt für die Bedarfsermittlung der Mittelwert der VDI 3807-2.

Tabelle 43: Hackl 19: Ermittlung Strombedarf

Nutzungsart	VDI Mittelwert 3807-2	Fläche	Strombedarf
Wohnung	(4 kWh/m²a)	245,7 m²	5.600,00 kWh/a
Verwaltung (Büro)	19 kWh/(m²BGF*a)	758,8 m²	14.417,39 kWh/a
Lagerhalle (+Nebenträume)	5 kWh/(m²BGF*a)	1549,9 m²	7.749,50 kWh/a
Summe:			27.766,89 kWh/a

Die Flächen im Hackl-19-Gebäude wurden je nach Nutzungsart aufgeteilt und mit dem jeweiligen Mittelwert der VDI multipliziert. Für die Wohnungen in diesem Gebäude ist dieser Ansatz jedoch nicht praktikabel, da der von der VDI angegebene Mittelwert mit 4 kWh/m²a deutlich zu niedrig ist. Gleichzeitig ist es problematisch, den Strombedarf einer Wohneinheit über die Fläche zu ermitteln, da der Strombedarf hier hauptsächlich von der Anzahl der Personen abhängt. Es wird daher angenommen, dass auf der Fläche von 245,7 m² ein 2-Personen- und ein 3-Personen-Haushalt leben (entspricht einer durchschnittlichen Fläche von 47 m²/Person in Deutschland gem. Statistischem Bundesamt). Für den 2-Personenhaushalt werden 2.400 kWh/a und für den 3-Personen-Haushalt 3.200 kWh/a angenommen.

Für den Lastgang, der im Wesentlichen durch den Gewerbeanteil geprägt ist, wurde ebenfalls das Standardlastprofil „G1 - Gewerbe werktags 8-18“ des BDEW verwendet und entsprechend skaliert:

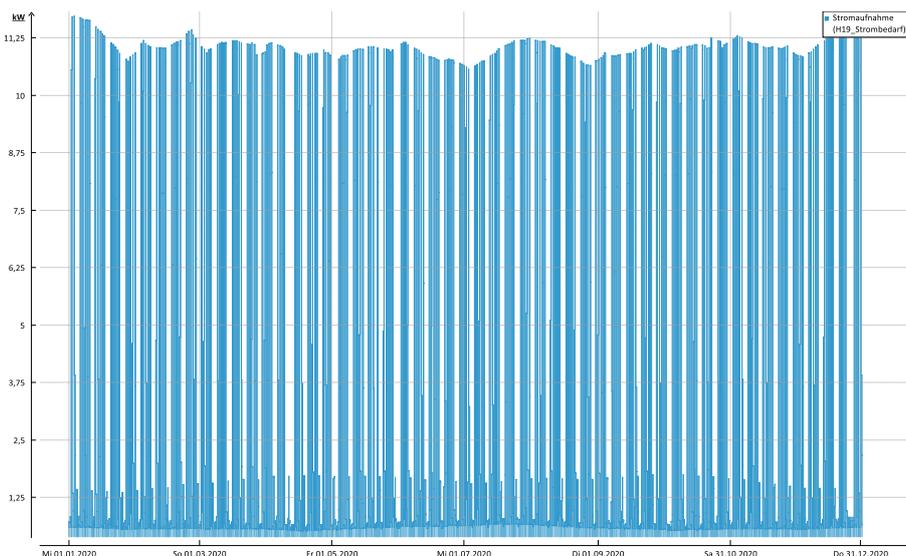


Abbildung 80: Stromlastgang Hackl 19 (Jahresansicht)

Die maximale Leistungsaufnahme beträgt hier ca. 11,7 kW.

Hackl 23/25

Für das Hackl 23/25- Gebäude (und auch Hackl 27) standen reale Messwerte von der KEW Neunkirchen zur Verfügung.

Tabelle 44: Original Strom-Messwerte der KEW im Hackl 23/25-Gebäude

Monat	Monatssumme
Januar 19	18.143 kWh
Februar 19	17.916 kWh
März 19	19.970 kWh
April 19	19.801 kWh
Mai 19	18.974 kWh
Juni 19	17.516 kWh

Die Messwerte wurden allerdings nur über einen Zeitraum von 6 Monaten aufgenommen. Da die Messwerte innerhalb dieses Zeitraumes aber kaum schwanken, können diese Werte auf das restliche Jahr übertragen werden. Folglich ergibt sich ein Gesamtstrombedarf von 227,7 MWh/a und eine maximale Leistungsaufnahme von knapp 115 kW. Damit gehört Hackl 23/25 durch die stromintensiven Maschinen zum größten Stromverbraucher im betrachteten Quartier.

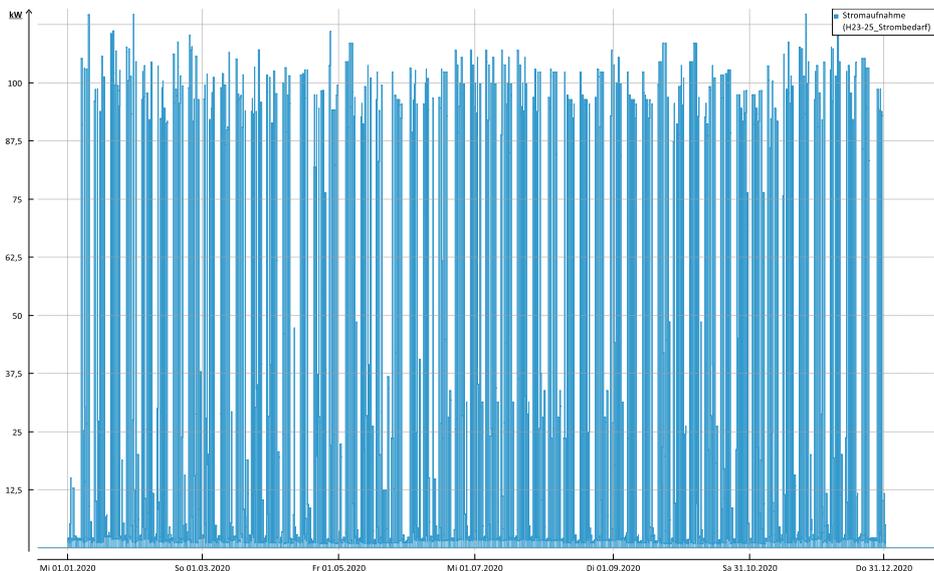


Abbildung 81: Stromlastgang Hackl 23/25 (Jahresansicht)

Die realen Aufzeichnungen der ersten 6 Monate wurden auf das 2. Halbjahr übertragen.

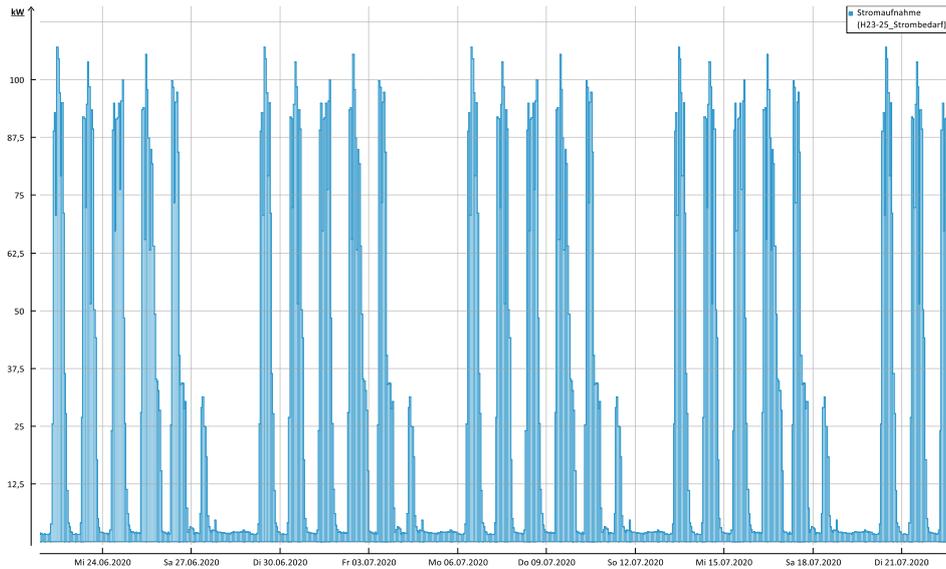


Abbildung 82: Stromlastgang Hackl 23/25 (Monatsansicht)

In der Wochenansicht zeigt sich, dass ein Teil der Maschinen auch samstags in Betrieb genommen wird.

vi. Hackl 27

Die KEW Neunkirchen hat auch für dieses Gebäude 6 Monate lang reale Messdaten aufgenommen:

Tabelle 45. Original Strom-Messwerte der KEW im Hackl 27-Gebäude

Monat	Monatssumme
Januar 19	14.899 kWh
Februar 19	14.547 kWh
März 19	16.015 kWh
April 19	15.757 kWh
Mai 19	14.633 kWh
Juni 19	13.062 kWh

Die Messwerte wurden ebenfalls auf ein ganzes Jahr hochgerechnet. Es ergibt sich ein Strombedarf ca. 180 MWh/a und eine maximale Leistungsaufnahme von knapp 98 kW.

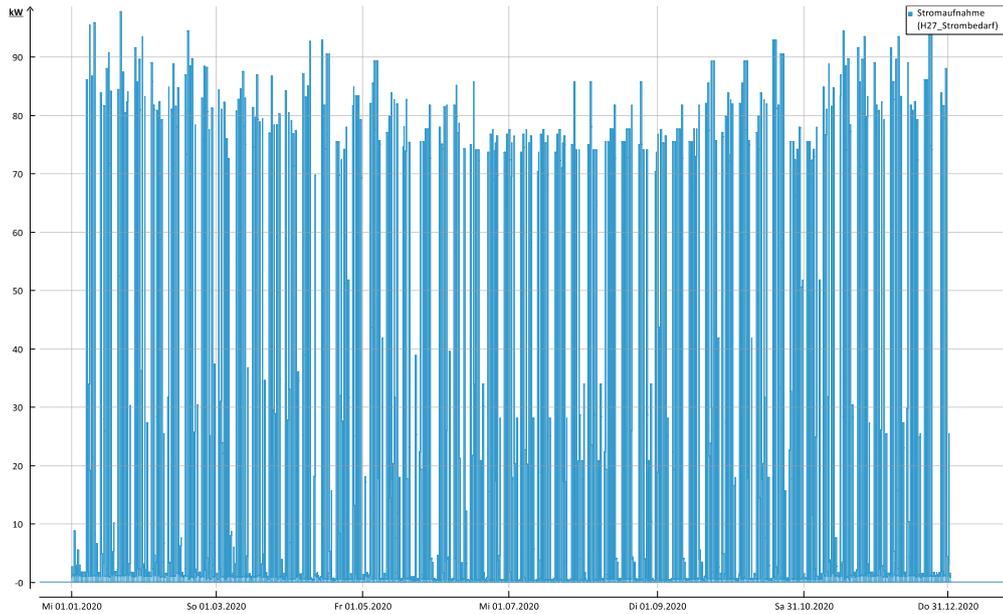


Abbildung 83: Stromlastgang Hackl 27 (Jahresansicht)

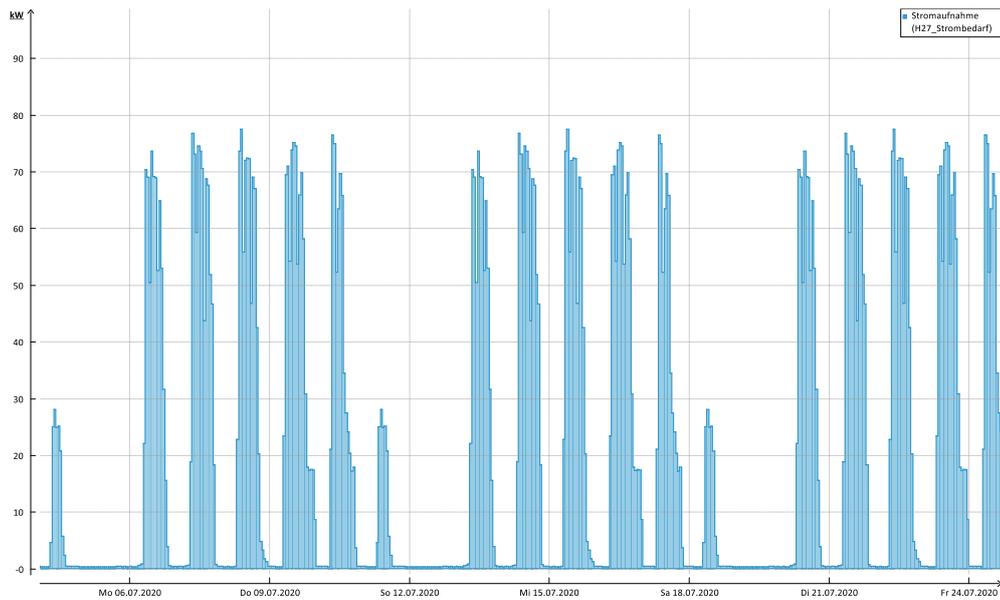


Abbildung 84: Stromlastgang Hackl 27 (Monatsansicht)

Auch in diesem Gebäude scheint ein Teil der Maschinen samstags in Betrieb zu sein.

B. Wärme

i. Allgemeines Vorgehen

Seit Juni 2019 zeichnet die Firma Sauter-Cumulus GmbH in 5 der 6 Gebäuden den realen Wärmebedarf auf (im Hackl 27-Gebäude wird nicht gemessen). Hierfür wurden im Rohrnetz der jeweiligen Gebäude Ultraschallzähler installiert.

Die gemessenen Daten im Zeitraum von Juni 2019 bis Juni 2020 werden als Grundlage für die Simulation der Wärmeversorgung in Riemerling verwendet. Dafür wurde die Reihenfolge der Monate vertauscht, um ein ganzes Jahr abzubilden (Januar 20 - Juni 20 → Juli 19 - Dezember 19).

Folglich liegen reale Messwerte für die entsprechenden Gebäude vor. Das Problem ist hierbei jedoch, dass die Qualität der Daten nicht optimal ist.

Dafür gibt es 2 Gründe:

1. Ungenauigkeit der Messwerte

Um eine möglichst hohe Messgenauigkeit zu erreichen, müssen die Ultraschallzähler in einem Rohrabschnitt installiert werden, in dem das Heizungswasser möglichst ungestört und ohne Turbulenzen fließen kann. Aufgrund der Leitungsführung in den Gebäuden konnte dies jedoch nicht immer gewährleistet werden. Folglich wurden die Zähler auch in hydraulisch ungünstigen Abschnitten installiert, was zum Teil zu großen Messungenauigkeiten führt.

Erschwerend kommt hinzu, dass viele der Kessel deutlich überdimensioniert sind. Dadurch arbeiten die Kessel häufig in einem taktenden Betrieb und beeinflussen dadurch ebenfalls das Messergebnis.

In Gebäuden, in denen die Messwerte nicht plausibel erschienen, wurde der Wärmebedarf alternativ ermittelt (zum Beispiel über die VDI 3807-2). Der gemessene Lastgang wurde dann entsprechend skaliert.

2. Fehlerhafte Messdatenübertragung

Hin und wieder kam es zu (teils längeren) Aussetzern bei der Übertragung der Messdaten.

In diesem Fall wurden die Lücken gefüllt, indem Messdaten aus angrenzenden Zeiträumen (meist wochenweise) in die Lücken eingefügt wurden.

Die beiden nachfolgenden Abbildungen auf der nächsten Seite veranschaulichen die Vorgehensweise.

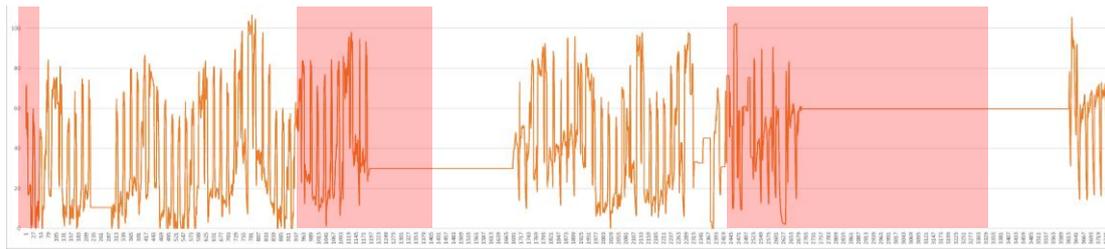


Abbildung 85: Original Wärme-Lastgang Hackl 23/25 (Jan. - Juni 20)

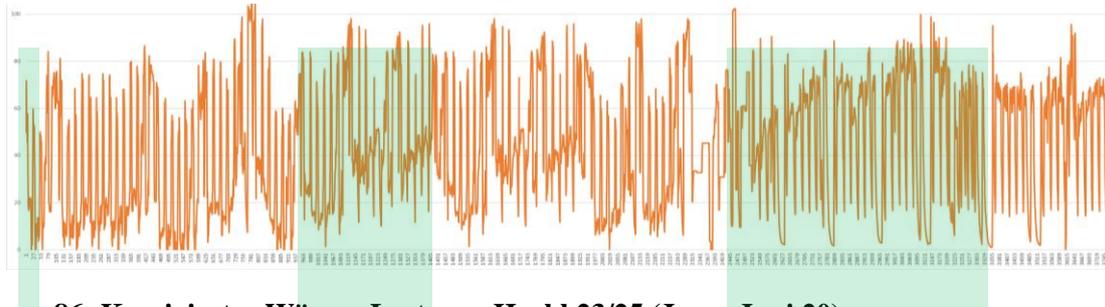


Abbildung 86: Korrigierter Wärme-Lastgang Hackl 23/25 (Jan. - Juni 20)

Die Zeiträume, in denen die Messdatenübermittlung nicht korrekt funktionierte, wurden mit angrenzenden Messwerten gefüllt. Dieses Vorgehen musste bei allen gemessenen Lastgängen angewandt werden.

ii. Zusammenfassung

Tabelle 46: Allgemeine Datengrundlage: Wärmebedarf

	Wärmebedarf	Spez. Wärmebedarf	Grundlage
Montessori	309,8 MWh/a	67,18 kWh/m ² a	Messdaten
Hotel	97,4 MWh/a	165,53 kWh/m ² a	Handzettel Öllieferungen ($\eta=0,8$) + TWW
Hackl 19	96,9 MWh/a	44,11 kWh/m ² a	Messdaten
Hackl 23/25	355,2 MWh/a	172,59 kWh/m ² a	Messdaten
Hackl 27	130,9 MWh/a	90,15 kWh/m ² a	VDI 3807-2 - Mittelwert
Kotter	203,5 MWh/a	55,06 kWh/m ² a	Gas-Abrechnung ($\eta=0,8$)

Tabelle 47: Allgemeine Datengrundlage: Grundlagen der Wärme-Lastgänge

	Grundlage des Lastganges
Montessori	Messdaten

Hotel	Messdaten - auf Handzettel skaliert ($\eta=0,8$) + TWW
Hackl 19	Messdaten - angepasst m. Korrekturfaktor 2
Hackl 23/25	Messdaten - angepasst
Hackl 27	Lastgang Hackl 23/25 auf VDI skaliert
Kotter	Messdaten - auf Gas-Abrechnung ($\eta=0,8$) skaliert

iii. Montessori-Schule

Für die Montessori-Schule standen Abrechnungen über den Gas-Verbrauch zur Verfügung. In der letzten Gas-Rechnung (01.04.2019 – 27.04.2020) betrug der Gas-Bezug 413 MWh. Bei einem durchschnittlichen Tagesverbrauch von 1.054 kWh/d entspricht dies einem Jahres-Gas-Verbrauch von knapp 385 MWh.

Geht man von einem Wirkungsgrad von 80% zwischen End- und Nutzenergie aus, dann erhält man einen Wärmebedarf von 308 MWh/a.

Der Wert entspricht annähernd dem Wärmebedarf, den der vor Ort aufgezeichnete Lastgang (mit Korrekturen) wiedergibt. Dieser beträgt 309,8 MWh und wird der Simulation zusammen mit dem aufgezeichneten Wärmeprofil (Abbildung 86) zugrunde gelegt.

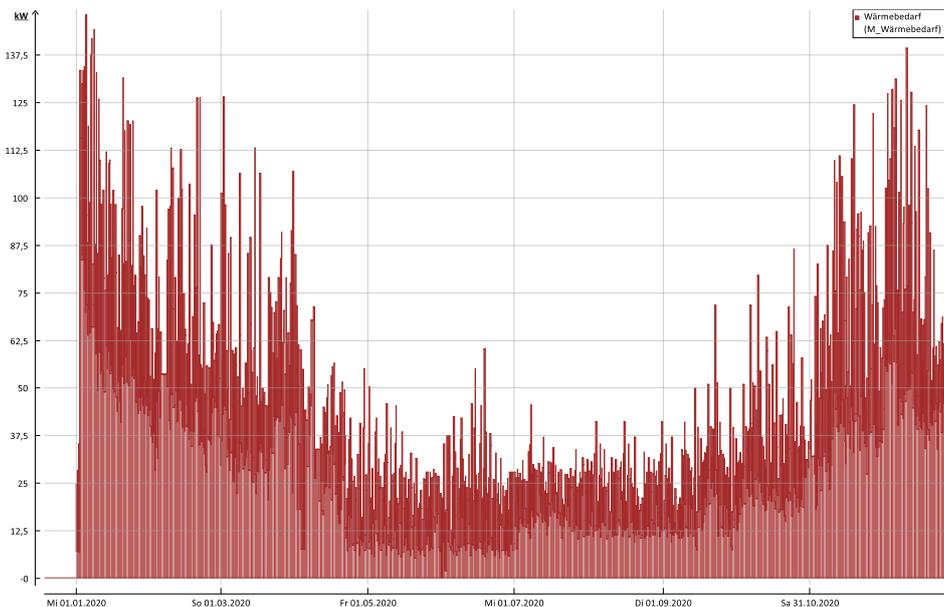


Abbildung 87: Wärmelastgang Montessori (Jahresansicht)

Die maximale Wärmeleistung beträgt rund 148 kW.

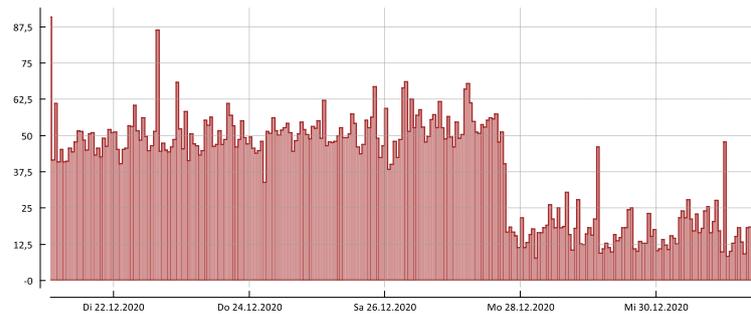


Abbildung 88: Wärmelastgang Montessori (Wochenansicht)

In der Wochenansicht ist deutlich zu sehen, dass die Schule am 28.12. aufgrund der Weihnachtsferien in einen abgesenkten Betrieb übergeht.

iv. Hotel am Wald

Der vor Ort gemessene Lastgang erschien nicht plausibel, da der Wärmebedarf mit über 800 MWh/a viel zu hoch ist und regelmäßig Werte aufgezeichnet wurden, die die Kesselleistung von 50 kW weit überschreiten. Darüber hinaus verfügt das Hotel über eine Solarthermieanlage zur Trinkwarmwassererwärmung (TWW), die, aufgrund der hydraulischen Gegebenheiten vor Ort, mit dem Ultraschallgerät nicht erfasst werden konnte.

Daher wird der handgeschriebene Zettel der Hotel-Eigentümerin verwendet, auf dem die Öllieferungen seit 2017 notiert sind. Daraus geht hervor, dass das Hotel seit dem 08.12.2017 rund 28.530 Liter Öl verbraucht hat. Bei einem Heizwert von 10,08 kWh entspricht das einem durchschnittlichen Tagesverbrauch von 315 kWh/d. Bei einem angenommenen Anlagenwirkungsgrad von 80% ergibt sich ein jährlicher Wärmebedarf von 91,9 MWh.

Der gemessene Lastgang wird weiterhin verwendet und entsprechend skaliert:

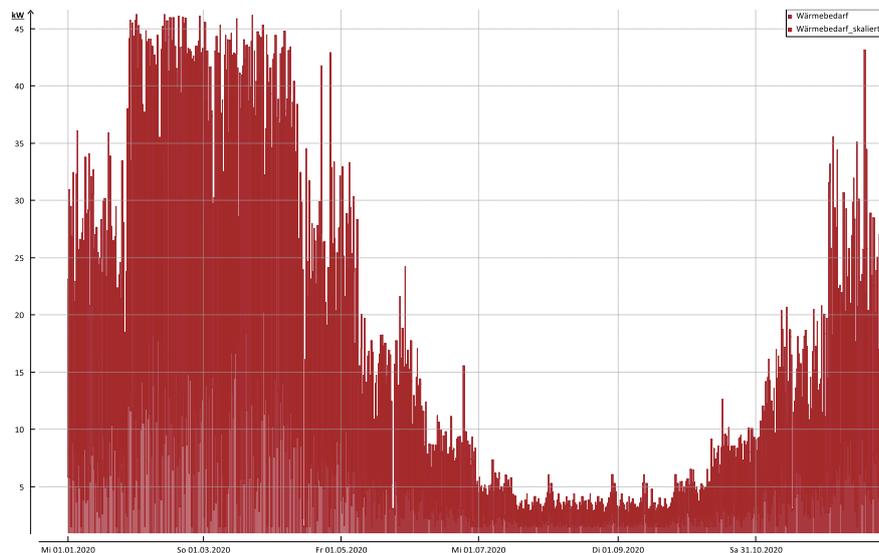


Abbildung 89: Wärmelastgang Hotel am Wald (Jahresansicht)

Die maximale Wärmeleistung beträgt rund 46 kW.

Der sprunghafte Anstieg am Anfang des Jahres könnte auf eine erhöhte Gästezahl hindeuten.

v. Kotter

Der Wärmebedarf des Kotter-Gebäudes kann den Gas-Abrechnungen entnommen werden. Daraus geht hervor, dass in den letzten 4 Jahren durchschnittlich rund 254,5 MWh/a Gas bezogen wurde. Nimmt man einen Anlagenwirkungsgrad von 80% an, dann ergibt sich ein durchschnittlicher Jahres-Wärmebedarf von 203,5 MWh/a. Dieser Wert entspricht annähernd dem vor Ort gemessenen Lastgang (203,7 MWh/a).

Für die Simulation wird der gemessene Lastgang verwendet und auf den durchschnittlichen Jahres-Wärmebedarf aus den Abrechnungen skaliert.

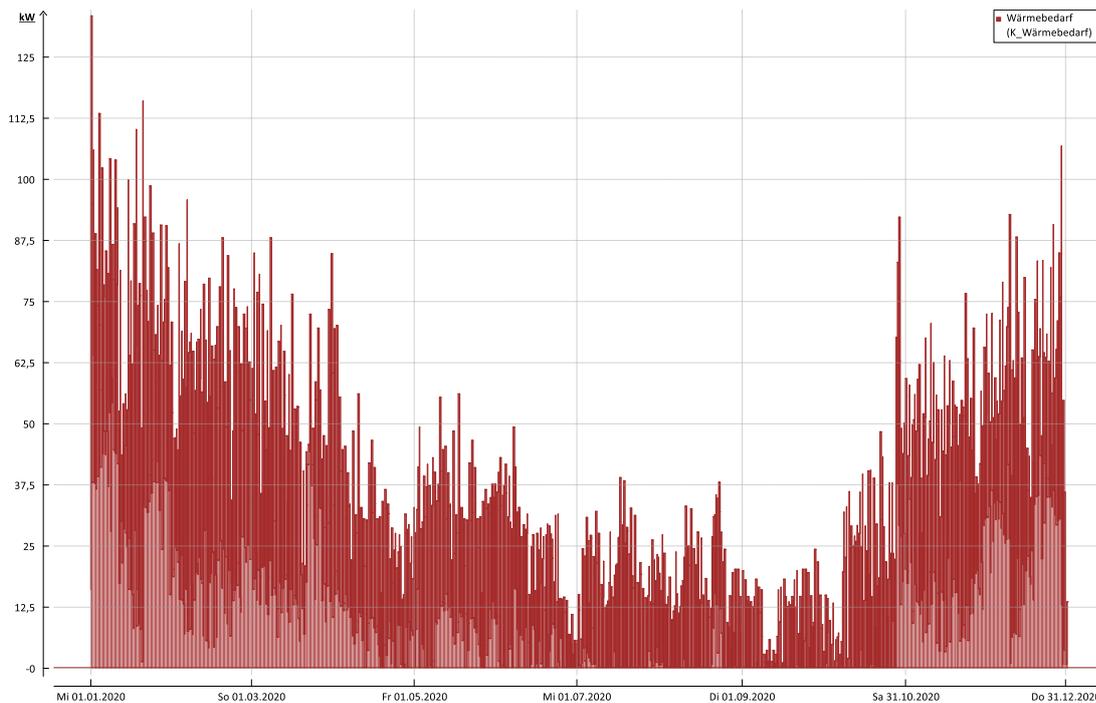


Abbildung 90: Wärmelastgang Kotter (Jahresansicht)

Die maximale Wärmeleistung beträgt ca. 133 kW.

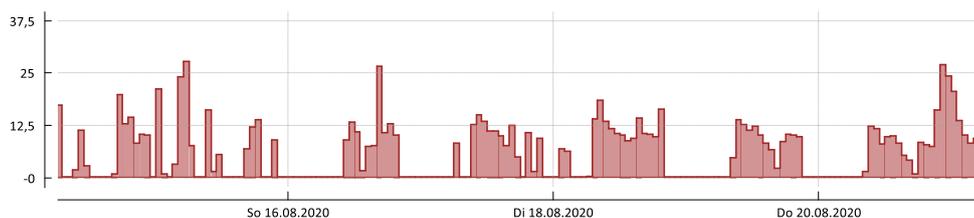


Abbildung 91: Wärmelastgang Kotter (Wochenansicht)

In der Wochenansicht vom Juli ist gut erkennbar, dass aufgrund der geringen benötigten Wärme, die Heizkessel nur in einem taktenden Betrieb arbeiten.

vi. Hackl 19

Der im Hackl 19 gemessene Wärmebedarf erscheint mit ca. 48 MWh zu gering. Um die Messungenauigkeit zu beheben, wurde aus den Daten der Ultraschallmessgeräte in Verbindungen mit den Pumpendaten und den Volumenströmen einen Korrekturfaktor von 2 ermittelt.

Damit ergibt sich ein durchschnittlicher Wärmebedarf von 96,9 MWh/a. Der gemessene Lastgang wurde auf diesen Wärmebedarf skaliert und in die Simulation importiert.

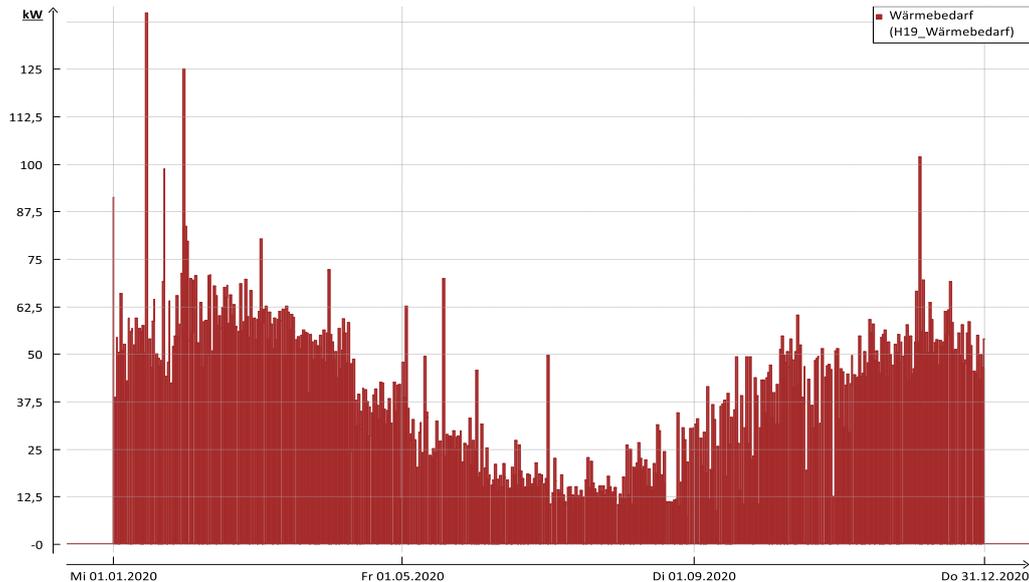


Abbildung 92: Wärmelastgang Hackl 19 (Jahresansicht)

Die maximale Wärmeleistung beträgt ca. 140 kW.

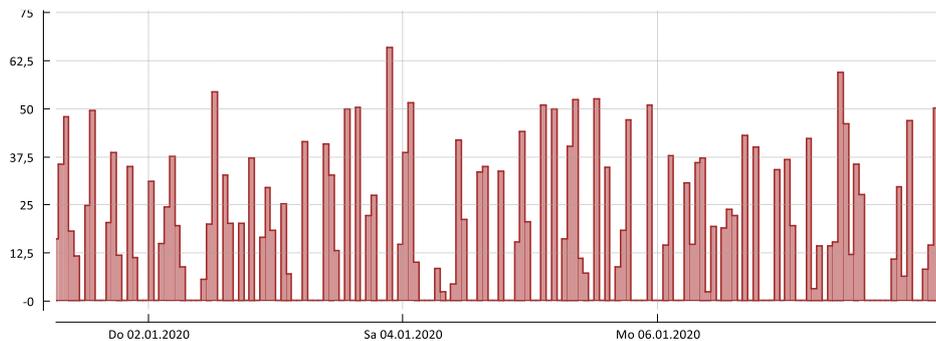


Abbildung 93: Wärmelastgang Hackl 19 (Wochenansicht)

Bei genauerer Betrachtung erkennt man, dass der Heizkessel selbst im Winter in einem stark taktenden Betrieb arbeitet. Der Grund hierfür ist, dass der Kessel mit einer Heizleistung von 537 kW extrem überdimensioniert ist.

vii. Hackl 23/25

Im Hackl 23/25-Gebäude wurde ein Wärmebedarf von rund 355 MWh gemessen. Dieser Wert erscheint relativ hoch (zum Vergleich: Mit den VID 3807-2 Mittelwerten errechnet sich ein Wärmebedarf von 247 MWh/a). Eine Erklärung könnte sein, dass in dem Betrieb möglicherweise Prozesswärme benötigt wird. Dafür würde auch der Verlauf des Lastganges sprechen, der im Sommer kaum abnimmt.

Da die Messstrecke des Ultraschallzählers optimal ist, wird der gemessene Wert für die Simulation verwendet.

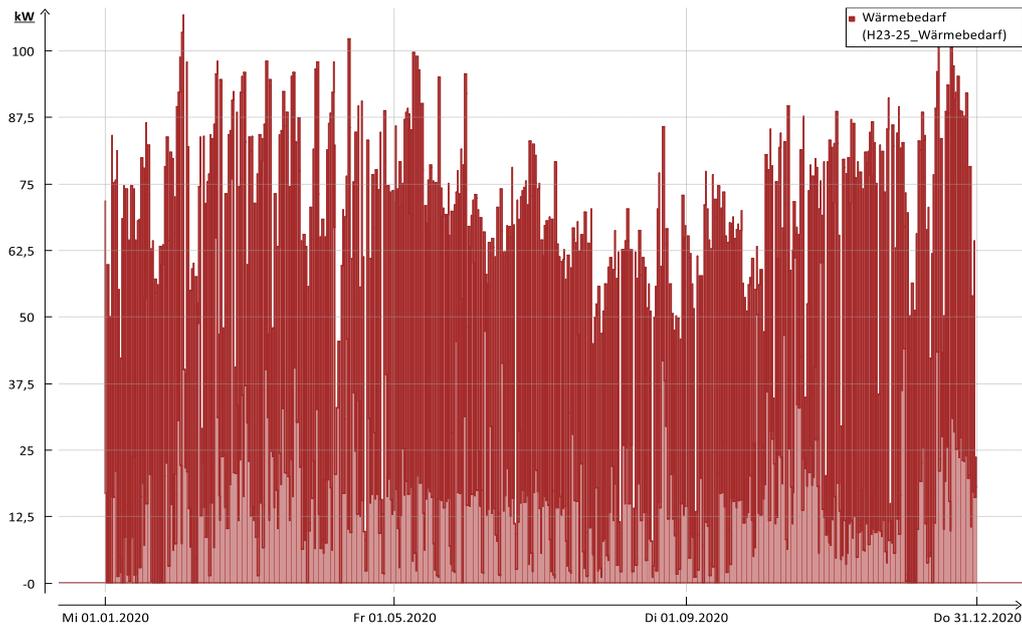


Abbildung 94: Wärmelastgang Hackl 23/25 (Jahresansicht)

Die maximale Wärmeleistung beträgt knapp 107 kW.

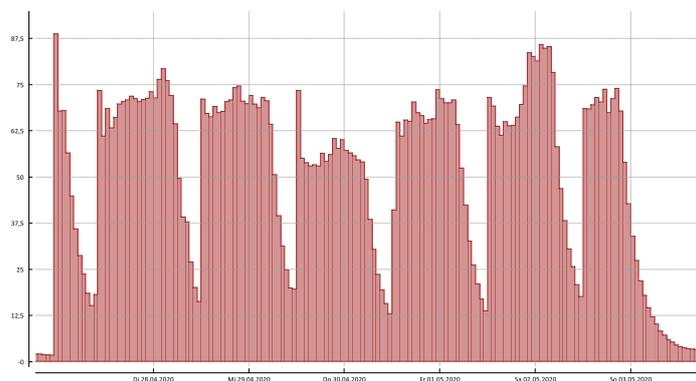


Abbildung 95: Wärmelastgang Hackl 23/25 (Wochenansicht)

Wie in Abbildung 94 zu erkennen, herrscht ein gleichmäßiger Wärmebedarf über alle Wochentage.

viii. Hackl 27

Für dieses Gebäude gibt es weder Abrechnungsunterlagen noch Messdaten. Daher wird für die Ermittlung des Wärmebedarfes die VDI 3807-2 verwendet.

Diese sieht für Werkstätten einen Mittelwert von 82 kWh/(m²BGF*a) vor. Bei einer Bruttogrundfläche von 1.596 m² ergibt sich damit ein Wärmebedarf von 130,87 MWh/a.

Da das Hackl 23/25 annähernd dieselbe Nutzung aufweist, wie das Hackl 27 Gebäude, wird der Lastgang übernommen und entsprechend skaliert.

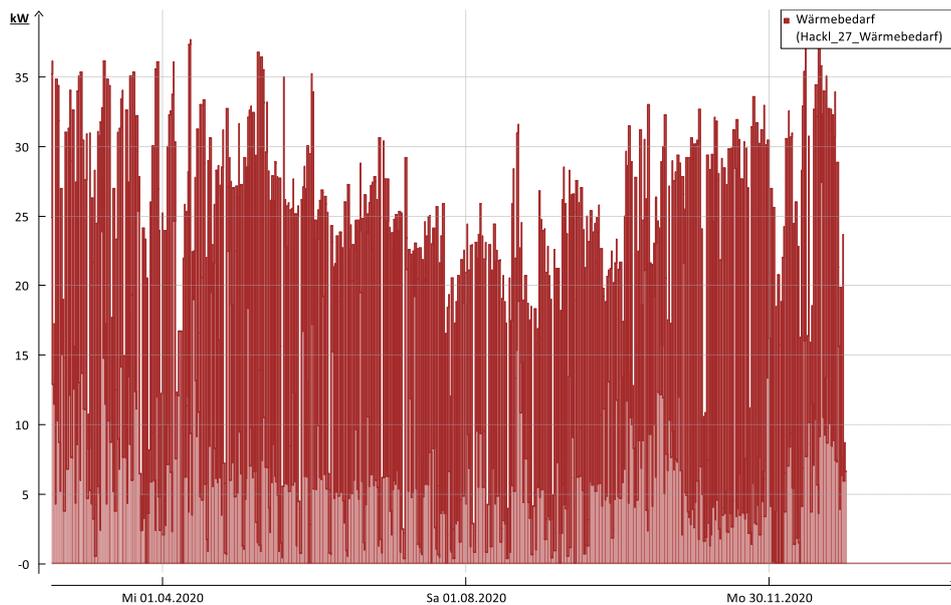


Abbildung 96: Wärmelastgang Hackl 27 (Jahresansicht)

Die maximale Wärmeleistung beträgt hier knapp 40 kW.

(A2) Rohrnetzrechnung

Teilstrecke	Wärmeleistung = angeschlossenes Geb. +50%	Volumenstrom	Massenstrom	Nennweite	Fließ- geschwindigkeit	spez. Druckverlust 90°C	spez. Druckverlust 70°C (+3%)	Länge	Druckverlust Rohr VL 90°C	Druckverlust Rohr RL 60°C	Z-Wert Einzeldruck- verluste (30%)	Druckverlust TS
	[kW]	[m³/h]	[kg/h]	DN	[m/s]	[Pa/m]	[Pa/m]	[m]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]
1	58,97	2,54	2.541,59	40	0,6	105	108	13	1365,00	1405,95	831	3602
2	58,97	2,54	2.541,59	65	0,19	6	6	31	186,00	191,58	113	491
3	229,40	9,89	9.887,72	65	0,75	75	77	71	5325,00	5484,75	3243	14053
4	160,04	6,90	6.898,06	65	0,5	38	39	10	380,00	391,40	231	1003
5	69,36	2,99	2.989,66	40	0,7	145	149	17	2465,00	2538,95	1501	6505
6	222,14	9,57	9.574,78	65	0,65	60	62	60	3600,00	3708,00	2192	9500
7	260,00	11,21	11.206,90	80	0,6	42	43	37	1554,00	1600,62	946	4101
8	260,00	11,21	11.206,90	65	0,84	95	98	30	2850,00	2935,50	1736	7521
9	209,69	9,04	9.038,15	80	0,48	29	30	18	522,00	537,66	318	1378
10	209,69	9,04	9.038,15	65	0,65	65	67	12	780,00	803,40	475	2058
Ungünstigster Strang												
Von nach												
Ap Rohrnnetz Ap Übergabestap ges. Strang												
Kotter		10.957 Pa	10.000 Pa	20.957 Pa								
Kotter	Hackl 19	26.678 Pa	10.000 Pa	36.678 Pa								
Kotter	Hackl 23/25	15.715 Pa	10.000 Pa	25.715 Pa								
Kotter	Hackl 27	21.123 Pa	10.000 Pa	31.123 Pa								
Kotter	Montessorì	32.180 Pa	10.000 Pa	42.180 Pa	ungünstigster Strang							
							in bar:					
							0,42 bar					

Abbildung 97: Rohrnetzrechnung

Die Rohrreibungsverluste wurden einer Rohrnetztafel entnommen (Tabelle 405.1, Ihle et al. 2016). Gem. Krimmling (2011) wurden die Armaturen mit 30 % der Rohrreibungsverluste veranschlagt. Die Übergabestationen wurden mit 10.000 Pascal bemessen.

Für die übertragene Wärmeleistung wurde die maximal erforderliche Wärmeleistung der angeschlossenen Gebäude verwendet. Darauf wurde zusätzlich ein Zuschlag von 50 % veranschlagt. Zum einen sollen auf diese Weise besonders kalte Winter abgedeckt werden können. Zum anderen soll damit auch berücksichtigt werden, dass in dem Gebäudeverbund theoretisch jedes Gebäude Wärme in das Netz schicken kann.

Die Wärmeleistung in der Teilstrecke 7 und 8 entspricht der maximalen Kesselleistung des Kotter-Gebäudes.

(A3) Wärmeverlustrechnung der Fernwärmeleitung

Wärmeverlustrechnung	DN40		DN 65		DN80	
	VL	RL	VL	RL	VL	RL
Wärmeleitfähigkeit Dämmung	0,025 W/mK	0,025 W/mK	0,025 W/mK	0,025 W/mK	0,025 W/mK	0,025 W/mK
Außendurchmesser Dämmung	0,105 m	0,105 m	0,135 m	0,135 m	0,155 m	0,155 m
Außendurchmesser Mediumrohr	0,0483 m	0,0483 m	0,0761 m	0,0761 m	0,0889 m	0,0889 m
Wärmeleitfähigkeit Kunststoffmantel	0,430 W/mK	0,430 W/mK	0,430 W/mK	0,430 W/mK	0,430 W/mK	0,430 W/mK
Außendurchmesser Kunststoffmantel	0,110 m	0,110 m	0,140 m	0,140 m	0,160 m	0,160 m
Wärmeleitfähigkeit Erdreich	1,2 W/mK	1,2 W/mK	1,2 W/mK	1,2 W/mK	1,2 W/mK	1,2 W/mK
Außendurchmesser ungestörtes Erdreich	1,313 m	1,313 m	1,313 m	1,313 m	1,313 m	1,313 m
Temperatur Erdreich	10 °C	10 °C	10 °C	10 °C	10 °C	10 °C
Wassertemperatur	70 °C	50 °C	70 °C	50 °C	70 °C	50 °C
längenspezifischer Wärmeverlust	11,1 W/m	7,4 W/m	14,7 W/m	9,8 W/m	15,2 W/m	10,1 W/m
Gesamtwärmeverlust	332,08 W	221,38 W	3.147,53 W	2.098,35 W	836,85 W	557,90 W
Gesamtnetz-Wärmeverluste	6,64 kW	10,74				
Max Wärmemenge im Netz:	ca:	296,85 kW				
Wärmeverlustanteil		2,4%				
In der Regel wird die Wärmemenge im Netz allerdings geringer ausfallen						
Mittlere Wärmemenge im Netz:	ca:	135,00 kW				
Wärmeverlustanteil		4,92%				
In der Simulation wird daher pauschal 5% verwendet						

Beim verlegten Kunststoffmantelrohr ändert sich F 4-34 entsprechend der Abbil. F 4-35

$$q_{l,rohr} = \frac{\pi \cdot (t_i - t_{ER})}{\frac{1}{2\lambda_D} \frac{1}{d_{i,D}} + \frac{1}{\lambda_M} \frac{1}{d_{a,M}} + \frac{1}{\lambda_{ER}} \frac{1}{d_{a,ER}}}$$

Temperatur im Rohr t_i
 Temperatur des ungestörten Erdreichs t_{ER}
 Wärmeleitfähigkeit der Dämmung λ_D
 Außendurchmesser des Mediumrohrs $d_{i,D}$
 Außendurchmesser der Dämmung $d_{a,M}$
 Wärmeleitfähigkeit des Kunststoffmantels λ_M
 Außendurchmesser des Kunststoffmantels $d_{a,ER}$
 Wärmeleitfähigkeit des Erdreichs λ_{ER}
 Abstand des ungestörten Erdreichs

In F 4-35 wurde vereinfachend angenommen, dass das Rohr homogen von Erdreich der gleichen Temperatur umgeben ist, was in der Realität so nicht stimmt, da einerseits die Temperatur nach oben zunimmt und außerdem das parallel verlaufende Rohr ebenfalls einen Wärmeverlust mit der entsprechenden Auswirkung im Erdreich hat.

Wärmeleitfähigkeiten aus: Krimling 2011, Energieeffiziente Nahwärmesysteme S. 147)

Rohrdimensionen aus: http://www.kmr-fernwaerme.de/fileadmin/user_upload/katalog/katalogteil_KVMR_starr_Teil_2_.pdf

Abbildung 98: Wärmeverlustrechnung der Fernwärmeleitung

(A4) Investitionskostenrechnung der Fernwärmeleitung

Tabelle 48: Investitionskostenrechnung der Fernwärmeleitung

Position	Beschreibung	Menge	Einheit	EP	GP
1.	Erdarbeiten				
1.1	Baustelleneinrichtung				
1.1.1	Baucontainer/ Lagerung/ Schutt	1	psch	15.000 €	15.000 €
1.1.2	Baustellensicherung	1	psch	20.000 €	20.000 €
1.2	Straßenbelag				
1.2.1	Straßenbelag öffnen	820	m ²	12 €	10.250 €
1.2.2	Straßenbelag schließen	820	m ²	225 €	184.500 €
1.3	Grabenarbeiten				
1.3.1	Aushub	680	m ³	65 €	44.200 €
1.4	Wiederherstellung				
1.4.1	Erde/ Verdichtung	435	m ³	45 €	19.575 €
1.4.2	Sandbettung/ Verdichtung	245	m ³	85 €	20.825 €
1.5	Entsorgung / Bauschutt				
1.5.1	Erde/ Asphalt mit Beprobung	953	t	55 €	52.415 €
2	Fernwärmeleitung				
2.1	Rohrleitung DN 40				
2.1.1	Rohrleitung inkl. Muffen/ Formstücke / Dämmung	60	m	65 €	3.900 €
2.2	Rohrleitung DN 50				
2.2.1	Rohrleitung inkl. Muffen/ Formstücke / Dämmung	0	m	75 €	0 €
2.3	Rohrleitung DN 65				
2.3.1	Rohrleitung inkl. Muffen/ Formstücke / Dämmung	428	m	90 €	38.520 €
2.4	Rohrleitung DN 80				
2.4.1	Rohrleitung inkl. Muffen/ Formstücke / Dämmung	110	m	130 €	14.300 €
2.5	Rohrleitung DN 100				
2.5.1	Rohrleitung inkl. Muffen/ Formstücke / Dämmung		m	180 €	0 €
2.6	Anschlussarbeiten in das Gebäude				
2.6.1	Rohrleitung inkl. Muffen/ Formstücke / Dämmung	6	St	1.500 €	9.000 €
3	Hausstation				
3.1	Demontearbeiten				
3.1.1	Pauschale pro Übergabestation	6	St	5.000 €	30.000 €
3.2	Übergabestation				
3.2.1	Wärmetauschergruppe inkl. Armaturn / Fitting / Dämmung	6	St	1.500 €	9.000 €
3.2.2	Pumpen	10	St	1.100 €	11.000 €
3.3	Rohrinstallation				
3.3.1	Pauschale pro Übergabestation	6	St	3.500 €	21.000 €
3.4	Regelung				

3.4.1	Interne Regelung zur Laststeuerung	6	St	20.000 €	120.000 €
3.5	Inbetriebnahme				
3.5.1	Funktionstest/ Analyse/ Einregulierung pro Übergabestation	6	psch	2.000 €	12.000 €
			Summe:	netto	635.485 €
				brutto	756.227 €

(A5) Interne Berichte zu Grundlagen und Rahmenbedingungen

In den folgenden Tabellen werden stichwortartig die Inhalte dargelegt, die im Laufe der ersten beiden Projektjahre in den internen Berichten L2.1 – L2.3 erarbeitet wurden. Sie dienen im Projekt vor allem als interne Grundlage und gemeinsame Wissensbasis der Projektpartner auf der die Entwicklungen der Softwarekomponenten, die Simulationen und die Feldtests aufbauten.

Tabelle 49: Inhalt des internen Berichts L2.1

<i>L2.1 Grundlagenkatalog für Energieoptimierte Gebäude</i>	
Inhalt	Übersicht energietechnischer Anlagen und Technologiesteckbriefe
Inhalt	Beschreibung aktueller Energiemanagement Systeme und digitaler Technologien, die aktuell zum Einsatz kommen
Inhalt	Beschreibung von aktuellen Regelungs-, Überwachungs- und Kontrollstrategien (Stand der Praxis und Stand der Wissenschaft)
Inhalt	Recherchen zu Studien und wissenschaftlichen Arbeiten zu den Optimierungszielen und Potential in Gebäuden und Quartieren
Inhalt	Übersicht über den Bestand von Gebäuden zur Feststellung von typischen Charakteristika des Wärme- und Elektrizitätsbedarfs und zur typischen Zusammensetzung der Anlagentechnik im Bestand
Inhalt	Identifizierung von möglichen Szenarien, die man mit Riemerling und dem Coses Labor analysieren könnte
Ziel	Festlegung der Annahmen für die Sektorenkopplung und die energetische Optimierung in Quartieren und Gebäuden im Bestand

Tabelle 50: Inhalt des internen Berichts L2.2

<i>L2.2 Anwendungsfälle und technische Anforderungen</i>	
Inhalt	Beschreibung der Vorgehensweise zur Ableitung von Anwendungsfällen
Inhalt	Beschreibung der beteiligten Rollen und Stakeholder im System
Inhalt	Ableitung von übergeordneten User Stories (Wer möchte was tun und warum)
Inhalt	Ableitung der damit verbundenen Use Cases / Szenarien
Inhalt	Ableitung der technischen Anforderungen, um die Funktionalitäten umzusetzen
Inhalt	Analyse der dafür benötigten Datenflüsse
Ziel	Festlegung der technischen Anforderung für die digitalen Systeme und zur Automatisierung von Prozessen

Tabelle 51: Inhalt des internen Berichts L2.3

<i>L2.3 Rechtliche Anforderungen und Geschäftsmodelle</i>	
Inhalt	Regulatorische Anforderungen: Übersicht und Begriffe
Inhalt	Regulatorische Paragrafen im öffentlichen Recht
Inhalt	Regulatorische Paragrafen im privaten Recht
Inhalt	Aktuelle Fördermöglichkeiten / Abgaben / Umlagen / etc.
Inhalt	Überlegungen zu möglichen Geschäftsmodelle und Szenarien
Inhalt	Stakeholder Mapping und Beschreibung MEMAP relevanter Geschäftsmodelle
Ziel	Unterstützung einer späteren technologischen Verwertbarkeit. Recherche zum Begriff Sektorenkopplung im rechtlichen Rahmen. Zusätzliche Untersuchung inwieweit MEMAP Szenarien zu möglichen Geschäftsmodellen einzelner Stakeholder aus L2.2 passen.

Die meisten dort erarbeiteten Inhalte zu technischen Grundlagen, Stakeholder/Rollen, Anwendungsfällen und Geschäftsmodellen wurden dabei bereits in Abschnitt E0 nochmals eingeführt. Im Gegensatz zu den anderen Themengebieten wurden allerdings die in Teil L2.3 erarbeiten rechtlichen Grundlagen schon während der Projektlaufzeit durch Änderungen in der Regulatorik und durch neue Gesetzgebung beeinflusst, weshalb sie nicht nochmals im Hauptteil des Berichts dargelegt wurden. Der Vollständigkeit halber, sollen aber im Folgenden die zentralen Erkenntnisse der Analyse aus dem Juli 2019 kurz dargelegt werden.

Problem	Lösung
<p>Der Begriff Sektorkopplung ist rechtlich bis dato nicht einheitlich definiert und unzureichend konzeptualisiert.</p> <p>Der aktuelle Rechtsrahmen greift nur partiell die Sektorkopplung auf und ist nur an einzelne Technologien geknüpft, es gibt kein Gesamtkonzept weiterführend ist der derzeitige Rahmen nicht für neue Technologien offen und erschwert den Marktzutritt für Innovationen und insbesondere Kleinanlagen, Sektoren werden getrennt betrachtet und reguliert.</p>	<p>Es sind präzise und innovationsfreundliche Regularien für die Sektorkopplung notwendig, um das Thema voranzutreiben und Innovationen zu ermöglichen.</p>

Problem	Lösung
<p>Es wird eine standardisierte Marktkommunikation, welche die Unverfälschtheit und Herkunft der Verbrauchsdaten gegenüber allen Marktakteuren (ohne Protokollwechsel) sicherstellt, benötigt, um die Softwarelösung von MEMAP flächendeckend anwenden</p>	<p>Ein Standard, der Personalisierung, Beweissicherheit und die Integrität der Daten sicherstellt</p>

<p>zu können. Aktuell wird diese Situation durch die Vielzahl der verschiedenen Protokolle erschwert. Zudem sind die genutzten Protokolle veraltet und entsprechen nicht mehr aktuellen Sicherheitsstandards.</p> <p>Eine sichere Kommunikation ist durch SML, EDIFACT und MSCONS nicht möglich/vorgesehen. Prozesse, wie sie in MEMAP entwickelt werden, sind in den Protokollen nicht vorgesehen</p>	
--	--

Problem	Lösung
<p>Da MEMAP insbesondere den Austausch von Wärme im Quartier betrachtet, wird ein rechtlicher Rahmen für Eigenversorgung, Direktvermarktung und Mieterstrom benötigt. Dies ist erschwert durch technische Gegebenheiten (z.B. Lokalität oder Richtungsdynamik) und impliziert einen rechtlich sehr komplexen Rahmen. Eine mögliche Entflechtung von Netzbetrieb und Wärmebereitstellung führt zu Problemen der Netzregulierung</p>	<p>StromNZV und StromNEV bieten ein Vorbild für einen gesetzlichen Rahmen.</p>

(A6) Beispiel Szenariobeschreibung

Kosten im Szenario		
Beschreibung	Wert	Einheiten
Stromkosten Bezug	30	cent/kWh
Einspeisevergütung Strom	15	cent/kWh
Gaskosten	5,9	cent/kWh
CO2 Emissionen (Gas)	0,202	kg/kWh
Anlagen und Gebäudedaten		
Gebäude 1		
Verbrauch und PV Profile Gebäude 1		
	./Profile/Geb1_15min.csv	
	./Profile/normalizedPVto1kW.csv	
PV Anlage Gebäude 1		
Installierte Leistung = Max. Leistung	3,3	kWp
Min. Leistung	0,00	kW
Netztyp		Strom
Normalisiertes Profil	./Profile/normalizedPVto1kW.csv	
Fuel Costs (operative Kosten)	0,0	EUR/kWh
CO2 Emissionen	0,0	kg/kWh
Batterie Gebäude 1		
Installierte Kapazität	10	kWh
Ladeleistung	3,3	kW
Entladeleistung	3,3	kW
Ladeeffizienz	97	%
Entladeeffizienz	97	%
Netztyp		Strom
Anfangsladung (50%)	5	kWh
Wärmepumpe Gebäude 1		
Installierte Leistung el.	12	kW
Installierte Leistung th.	45,6	kW
Minimale Leistung (beide)	0,0	kW
COP (effizienz)	3,8	
Netztyp 1		Strom
Netztyp 2		Wärme
Fuel Cost	0,0	EUR/kWh
CO2 Emissionen	0,0	kg/kWh
Gebäude 2		
Verbrauch Gebäude 2		
	./Profile/Geb2_15min.csv	

Solarthermie Gebäude 2		
Installierte Leistung th. (Max. Leistung)	4	kW (also kWp)
Min. Leistung	0,00	kW
Netztyp		Wärme
Normalisiertes Profil	./Profile/normalizedPVto1kW.csv	
Fuel Costs (operative Kosten)	0,0	EUR/kWh
CO2 Emissionen	0,0	kg/kWh
Wärmespeicher Gebäude 2		
Installierte Kapazität	20	kWh
Ladeleistung	10	kW
Entladeleistung	10	kW
Ladeeffizienz	98	%
Entladeeffizienz	98	%
Netztyp		Wärme
Anfangsladung (50%)	10	kWh
BHKW Gebäude 2		
Elektrische Leistung	1,5	kW
Wärme Leistung	3,6	kW
Effizienz Strom	25	%
Effizienz Wärme	60	%
Netztyp 1		Strom
Netztyp 2		Wärme
Energieträger	Gas	
Fuel Cost	5,9	cent/kWh
CO2 Emissionen	0,202	kg/kWh