

Entwicklung integrierter solarer Versorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude der „Stadt der Zukunft“

Akronym „Sol4City“

Abschlussbericht

Version 06.11.2024

Laufzeit des Vorhabens: 01.12.2019 bis 29.02.2024

Bearbeitung und Zuwendungsempfänger

Universität Stuttgart

Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)

Harald Drück, Stefanie Lott, Winfried Juschka, Jens Ullmann, Stephan Lang, Peer Huber,
Natalie Bonk, Dominik Bestenlehner

Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart

Tel: 0711/685-63553; E-Mail: harald.drueck@igte.uni-stuttgart.de

Viessmann Climate Solutions SE (VCS)

Bernd Hafner, Ralf Dott, Jens Schaumann, David Westermann, Stefan Hensel, Jonas Hilpert, Daniel Eisenmann

Viessmannstrasse 1, 35107 Allendorf

Tel: 06452/70-1583; E-Mail: drhf@viessmann.com

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03ETW019A+B aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über den Projektträger Jülich (PTJ) gefördert.

Die Autorinnen und Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzfassung

Das Ziel des Vorhabens war die Entwicklung von neuartigen solaren Gesamtenergieversorgungskonzepten für Mehrfamilienhäuser und Quartiere, die durch eine intelligente Technologiekopplung hohe solarthermische Deckungsanteile beim Wärmebedarf für die Trinkwassererwärmung und Raumheizung sowie hohe solarelektrische Deckungsanteile bei der benötigten elektrischen Energie erreichen¹. Das Vorhaben wurde gemeinsam mit einem entsprechenden Parallelprojekt mit Partnern aus Österreich durchgeführt.

Die Schwerpunkte des Vorhabens wurden dabei durch die kombinierte Nutzung von bereits verfügbaren Technologien und speziell im Kontext des Gesamtsystems neu zu entwickelnder Komponenten wie hocheffiziente, vakuumwärmegedämmte Warmwasserspeicher und eine adaptive und prädiktive Systemregelung gebildet. Des Weiteren wurde ein Konzept zur Realisierung standardisierter Hydraulikschemen für Anlagen mit Latentspeicher-Volumina zwischen 100 und 2000 m³ für den Einsatz in Anergienetzen sowie eine Methodik zur Bestimmung des Beladungszustands von Eisspeichern entwickelt.

Die zentralen Komponenten der sowohl für Neubauten als auch für den Gebäudebestand einsetzbaren neu entwickelten Gesamtwärmeversorgungssysteme sind Anergienetz, Latentspeicher, Wärmepumpe sowie Technologien zur energetischen Nutzung der Solarstrahlung und der Umgebungswärme. Die ebenfalls in dem Vorhaben entwickelte adaptive und prädiktive Systemregelung steuert und optimiert die Versorgung des Gebäudes bzw. Quartiers sowohl mit thermischer als auch elektrischer Energie mit dem Ziel eines möglichst geringen Verbrauchs von elektrischer Energie. Die neu entwickelten Gesamtenergieversorgungssysteme wurden innerhalb des Vorhabens realisiert und über einen Zeitraum von ca. 1,5 Jahren in 4 Versuchsanlagen messtechnisch analysiert und optimiert. Die Auswahl der Anlagen erfolgte durch die beiden Projektpartner basierend auf den bei der Fa. Viessmann Climate Solutions (VCS) vorliegenden Anfragen.

Ein wichtiger Bestandteil des Vorhabens war auch die Leitung und aktive Mitarbeit des IGTE der Universität Stuttgart und der Fa. Viessmann Climate Solutions der der Task 66 „Solar Energy Buildings“ des Solar Heating and Cooling Programms (SHC) der Internationalen Energieagentur (IEA).

¹ Die Berechnung der hier angegebenen solarthermischen und solarelektrischen Deckungsanteile erfolgt mittels Energiebilanzen, die auf der Basis von 15-Minuten-Werten berechnet werden. Üblich, aber nicht mehr zeitgemäß, ist bisher die energetische Bilanzierung auf der Basis von Jahreswerten, wie sie z. B. für die Definition des Energieeffizienzhaus Plus Standards verwendet wird. Eine hohe zeitliche Auflösung bei der energetischen Bilanzierung ist jedoch wichtig, um der Tatsache Rechnung zu tragen, dass das elektrische Netz keine Speicherfähigkeit besitzt und eingespeister Strom sofort wieder verbraucht wird. Deshalb kann Strom, der im Sommer als PV-Überschuss ins Netz eingespeist wird, nicht im Winter entnommen werden. Vielmehr müssen zur Deckung des Stromverbrauchs im Winter fossile Kraftwerke betrieben werden. Eine Bilanzierung auf Basis von Jahreswerten errechnet also einen deutlich verringerten Ausstoß an CO₂-Äquivalenten, als dies tatsächlich der Fall ist.

Die internationale Zusammenarbeit sowohl in der IEA Task 66 als auch insbesondere mit den österreichischen Partnern hat maßgeblich zum Erfolg des Projekts beigetragen, da verschiedene Lösungsansätze und Ideen offen ausgetauscht und diskutiert werden konnten und so neue Lösungen entstanden sind.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass durch das Projekt „Sol4City“ wichtige Beiträge zur Weiterentwicklung und Marktetablierung innovativer Konzepte und Technologien für die thermische Solarenergienutzung und für die Realisierung von Energiekonzepten mit sehr geringen Treibhausgasemissionen geleistet werden konnten.

Hinweis:

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt von der Fa. Viessmann Climate Solutions SE (VCS) und dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart gemeinsam durchgeführt. Dieser Bericht wurde daher gemeinsam erstellt. Die Koordination des Verbundvorhabens erfolgte durch das IGTE.

Abstract

The aim of the project was to develop new types of total solar energy supply concepts for multi-family houses and neighborhoods, which, through intelligent technology coupling, achieve high solar thermal fractions for the heat demand for domestic hot water and space heating as well as high solar electric fractions for the required electrical energy². The project was carried out together with a corresponding parallel project with partners from Austria.

The project focused on the combined use of existing technologies and new components to be developed specifically in the context of the overall system, such as highly efficient, vacuum heat-insulated hot water storage tanks and adaptive and predictive system control. Furthermore, a concept for the realization of standardized hydraulic schemes for systems with latent heat storage volumes between 100 and 2000 m³ for use in energy heating grids as well as a methodology for determining the state of charge of the ice storage tanks was developed.

The central components of the newly developed overall heat supply systems, which can be used for both new buildings and existing buildings, are the energy heating grid, latent heat storage, heat pump, technologies for the energetic use of solar radiation and ambient heat. The adaptive and predictive system control also developed in the project controls and optimizes the supply of both thermal and electrical energy to the building or district with the aim to minimize electrical energy consumption. The newly developed overall energy supply systems were implemented within the project and analyzed and optimized in detail over a period of approx. 1.5 years in 4 test facilities. The systems were selected by the two project partners based on the inquiries received by Viessmann Climate Solutions (VCS).

Another important part of the project was the management and active contribution of the two project partners IGTE at the University of Stuttgart and Viessmann Climate Solutions in Task 66 “Solar Energy Buildings” of the Solar Heating and Cooling Program (SHC) of the International Energy Agency (IEA).

The international cooperation both within the IEA Task 66 and in particular with the Austrian partners contributed significantly to the success of the project, as different approaches and ideas were exchanged and discussed openly, resulting in new solutions.

In conclusion, it can be said that the “Sol4City” project has made important contributions to the further development and market establishment of innovative concepts and technologies for the use of thermal solar energy and for the realization of energy concepts with very low greenhouse gas emissions.

² The calculation of the solar thermal and solar electric fraction as specified here is carried out using energy balances that are calculated on the basis of 15-minute values. Energy balances based on annual values, such as those used to define the German standard Energieeffizienzhaus Plus, are common but no longer up-to-date. However, a high temporal resolution in energy balancing is important in order to take account of the fact that the electricity grid has no storage capacity and electricity fed into the grid is consumed again immediately. Therefore, electricity that is fed into the grid as PV surplus in summer cannot be withdrawn in winter. Instead, fossil fuel power plants must be operated to cover the electricity consumption in winter. A balance based on annual values therefore results in significantly lower emission of CO₂ equivalents than this is actually the case.

Note:

The project was carried out as a joint project by Viessmann Climate Solutions SE (VCS) and the Institute for Building Energy, Thermal Engineering and Energy Storage (IGTE) at the University of Stuttgart. This report was therefore prepared jointly.

The joint project was coordinated by the IGTE.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	21
1.1 Motivation und Problemstellung.....	21
1.2 Stand der Technik.....	22
1.2.1 Vorarbeiten zum Projekt Sol4City	23
1.2.2 Anergienetze bzw. kalte Nahwärme.....	23
1.2.3 Wärmepumpen.....	24
1.2.4 Thermische und elektrische Energiespeicher	24
1.2.4.1 Warmwasserspeicher	24
1.2.4.2 Latentspeicher	25
1.2.4.3 Sorptionsspeicher.....	26
1.2.4.4 Elektrische Energiespeicher	27
1.2.5 Solare Versorgungstechnologien für Wärme und Strom.....	28
1.2.6 Gesamtsystem	29
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	31
1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	32
2. Thermische und elektrische Energiespeicher (AP2)	33
2.1 Hocheffiziente Warmwasserspeicher mit Vakuumdämmung	33
2.1.1 Recherche hocheffizienter Wärmedämmkonzepten für Warmwasserspeicher	34
2.1.1.1 Grundlegende hocheffiziente Wärmedämmkonzepte	34
2.1.1.2 Warmwasserspeicher mit EEK A oder A+	40
2.1.2 Marktanalyse für Warmwasserspeicher mit EEK A.....	42
2.1.3 Anforderungskatalog für die neu zu entwickelnden Wärmedämmungen	42
2.1.4 Auswahl grundlegendes Wärmedämmkonzept.....	44
2.1.5 Simulationsmodell	47
2.1.5.1 Umgebungsbedingungen	47
2.1.5.2 Geometrischer Aufbau des Simulationsmodells des WWS.....	47
2.1.5.3 Materialeigenschaften der modellierten Wärmedämmstoffe	51
2.1.5.4 Materialeigenschaften der übrigen Stoffe.....	61
2.1.5.5 Physikalische Vorgänge und Vorgaben.....	62
2.1.5.6 FEM-Netz	64
2.1.5.7 Validierung des Simulationsmodells.....	64

2.1.6 Simulationsergebnisse	66
2.1.6.1 Wärmedämmung 1	67
2.1.6.2 Wärmedämmung 2	72
2.1.6.3 Wärmedämmung 3	75
2.1.6.4 Fazit Simulationsergebnisse.....	79
2.2 Entwicklung eines Sorptionskollektors.....	79
2.3 Funktionsmusterbau und -tests; Speicher	79
2.3.1 Prototyp-Speicher	80
2.3.2 Wärmedämmung 1.....	81
2.3.2.1 Boden- und Deckeldämmung	81
2.3.2.2 Manteldämmung.....	83
2.3.2.3 Ergebnisse der Speicherprüfung und Abgleich mit Simulationsergebnissen ..	86
2.3.3 Wärmedämmung 2.....	87
2.3.3.1 Polyurethan-Hartschaum (PUR).....	88
2.3.3.2 Vakuumisulationspaneele (VIPs).....	90
2.3.3.3 Polypropylen-Bahnen	91
2.3.3.4 Polyesterfaservlies (PFV)	93
2.3.3.5 Herstellung der Prototyp-Wärmedämmung 2	93
2.3.3.6 Messung effektive Wärmeleitfähigkeit des PUR der Wärmedämmung 2.....	101
2.3.3.7 Ergebnisse der Speicherprüfung und Abgleich mit Simulationsergebnissen	102
2.3.4 Vergleich der Wärmedämmungen und Fazit.....	106
2.3.4.1 Recyclingfähigkeit der Dämmkomponenten	106
2.3.4.2 Nutzen und Aufwand	110
2.3.4.3 Fazit und Ausblick	111
2.4 Kompakter Sorptionswärmespeicher.....	111
2.5 Bauteilaktivierung und elektrische Speicher	111
2.6 Latentspeicher für Anergienetze.....	112
2.6.1 Latentspeicher für Anergienetze (VCS)	112
2.6.1.1 Beladungszustand von Latentspeichern.....	112
2.6.1.2 Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustandes	113
2.6.1.3 Bestimmung des wahren Beladungszustandes von Eisspeichern	114
2.6.1.4 Angewandte Methode zur Bewertung der Messgenauigkeit von Beladungssensoren.....	116

2.6.2 Entwicklung einer Sensorik zur Beladungszustandserkennung.....	120
2.6.2.1 Voruntersuchungen im Modellspeicher	123
2.6.2.2 Indirekte Bestimmung Eismasse mittels Auftriebskraft im Modellspeicher....	126
2.6.2.3 Indirekte Bestimmung der Eismasse mittels Änderung des Pegelstandes im Modelleisspeicher	128
2.6.2.4 Versuche zur Bestimmung der Wasserstandshöhe bzw. der Eismasse mittels elektrischer Kapazität.....	130
2.6.2.5 Fazit Vorversuche mittels Modelleisspeicher	133
2.6.2.6 Bestimmung der Messunsicherheit von Sensoren zur Abstandsmessung mit einem Pegelprüfstand.....	134
2.6.2.7 Fazit Bestimmung der Messunsicherheit von Sensoren zur Abstandsmessung mit einem Pegelprüfstand	157
2.6.2.8 Methodik zur rechnerischen Bestimmung des Beladungszustands	158
2.6.2.9 Messdatenanalyse von Beladungssensoren aus Kunden- bzw. Versuchsanlagen.....	163
2.6.2.10 Untersuchung Beladungssensoren im Labormuster für Latentspeicher.....	172
2.6.3 Aufbau und Untersuchungen am Labormuster für Latentspeicher	177
2.6.3.1 Aufbau des Labormusters für Latentspeicher.....	177
2.6.3.2 Modellierung Vereisungsvorgänge (IGTE)	186
2.6.3.3 Vereisungs- und Regenerationsversuche am Versuchsspeicher	192
2.6.3.4 Konditionierungsversuche	206
2.6.3.5 Materialuntersuchungen	215
2.6.4 Validierung von Rechenmodellen für Eisspeicher.....	218
2.6.4.1 Vorgehen zur Validierung der Simulationsergebnisse.....	219
2.6.4.2 Vergleich der Simulationsergebnisse beider Modelle für ein Eisspeichervolumen von 1.125 m ³	221
3. Solare Umwandlungstechnologien (AP3).....	225
3.1 Entwicklung eines PVT-Hybrid-Flachkollektors	225
3.1.1 Vermessung von PVT Kollektoren	225
3.1.2 Anforderungskatalog für einen neuen PVT Sonnen-Luft-Kollektor	234
3.2 Solargenerator-Gesamtkonzepte.....	252
3.3 Solarthermische Wärmequellen für Anergienetze	253

4. Gesamtenergieversorgungskonzepte (AP4)	260
4.1 Definition und Anforderungen an das Gebäude	260
4.1.1 Auswertung der von VCS realisierten Anlagen	260
4.1.2 Anforderungen an das Gebäude	263
4.1.3 Anforderungen an die Planung der Anlagen	263
4.1.4 Anforderungen an die Versuchsanlagen	265
4.1.5 Abstimmung der Anforderungen mit den österreichischen Partnern	265
4.2 Gebäudekühlung	268
4.2.1 Technologie Kälteverteilung (Lüftung, Kühldecken, Gebäudekern, Fußboden) ..	269
4.2.2 Gefordertes Temperaturniveau und Leistung sowie Energie, Gegen- überstellung mit dem Wärmebedarf	269
4.2.3 Umsetzung im Gesamtenergieversorgungssystem	269
4.2.4 Untersuchungen an einer der Versuchsanlagen	270
4.2.5 Erfahrungen aus weiteren realisierten Projekten	273
4.2.6 Anforderungen an den Planungsprozess	274
4.2.7 Regelungsverfahren zur Bereitstellung der Kühlenergie	277
4.3 Entwicklung von Konzepten für Mehrfamilienhäuser und Quartiere	277
4.4 Netzentlastung durch aktive Interaktion	281
4.5 Simulation, Erprobung und Optimierung des Gesamtsystems	287
4.5.1 Vorbemerkungen zur Messdatenauswertung	288
4.5.2 Anlage 1	290
4.5.2.1 Anlagenbeschreibung	290
4.5.2.2 Messergebnisse	297
4.5.2.3 Optimierungsmaßnahmen	306
4.5.3 Anlage 2	306
4.5.3.1 Anlagenbeschreibung	306
4.5.3.2 Messergebnisse	308
4.5.4 Anlage 3	309
4.5.4.1 Anlagenbeschreibung	309
4.5.4.2 Messergebnisse	312
4.5.5 Anlage 4	312
4.5.5.1 Anlagenbeschreibung	312
4.5.5.2 Messergebnisse	316
4.5.5.3 Optimierungsmaßnahmen	319

4.5.6 Simulation	320
4.5.6.1 Konzeptlösung 6.....	321
4.5.6.2 Konzeptlösung 8.....	328
4.5.6.3 Verwendung hocheffizienter Wärmedämmung	329
5. Interaktive, adaptive und prädiktive Systemregelung (AP5).....	331
5.1 Definition der komponentenspezifischen Regelaufgaben und Schnittstellen	331
5.2 Erstellung Pflichtenheft Systemregelung	334
5.3 Entwicklung der Regelalgorithmen und Implementierung in Systemregler	339
5.4 Optimierung der Regelalgorithmen.....	344
5.4.1 Modellprädiktive Regelung (MPR)	345
5.4.2 Adaptive Regelung.....	354
5.5 Validierung der Regelalgorithmen	358
6. Übertragbarkeit, Dissemination und IEA-Task (AP6)	360
6.1 Übertragbarkeit auf Bestandsgebäude und andere Gebäudetypen	360
6.2 Veröffentlichung in einschlägigen Journals und Fachzeitschriften	363
6.3 Präsentationen bei einschlägigen Tagungen bzw. Konferenzen.....	364
6.4 Einbringen der Ergebnisse in Arbeitsgruppen der Internationalen Energie- agentur (IEA) und weiteren Gremien	366
6.4.1 Arbeiten in der IEA Task 66 und im Executive Committee der SHC.....	366
6.4.2 Mitarbeit im Forschungsnetzwerk „EnergieWendeBauen“	369
6.4.3 Sonstige Aktivitäten.....	369
7. Verwertung der Ergebnisse.....	370
7.1 Wissenschaftliche Verwertung.....	370
7.1.1 Wissenschaftliche Verwertung IGTE.....	370
7.1.2 Wissenschaftliche Verwertung VCS.....	371
7.2 Technische Verwertung	372
7.2.1 Technische Verwertung IGTE	372
7.2.2 Technische Verwertung VCS.....	373
7.3 Wirtschaftliche Verwertung.....	373
7.3.1 Wirtschaftliche Verwertung IGTE	374
7.3.2 Wirtschaftliche Verwertung VCS	374
8. Zusammenfassung und Ausblick	375
8.1 Zusammenfassung	375
8.2 Ausblick	378

Nomenklatur

Große lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Fläche (des Wassers)
A_0	m^2	Grundfläche Speicher
AZ	–	Monatliche Arbeitszahl in
C	F	elektrische Kapazität
D	m	Durchmesser
$G(S_{oc})$	%	Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustandes
K_b	$\frac{W}{m^2}$	direkte Bestrahlungsstärke
K_d	$\frac{W}{m^2}$	diffuse Bestrahlungsstärke
L	m	Rohrlänge
N	–	Anzahl der Freiheitsgrade
N_p	–	Anzahl der Schritte im Prädiktionshorizont
Q	MWh	Wärmemenge
Q_{bed}	MWh	Monatliche gesamte an Nutzende gelieferte Wärme
$Q_{\Delta Soc,k}$	kWh	Differenz zwischen aktueller Energiemenge und Energiemenge beim Sollwert des Beladungszustands
$Q_{\Delta T,k}$	kWh	Differenz zwischen aktuell in den Räumen vorhandener Energiemenge und bei Solltemperatur in den Räumen vorhandener Energiemenge
$Q_{el,k}$	kWh	elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpen
$Q_{Netz,Gewinne}$	MWh	Monatliche Wärmegewinne vom Erdreich in das kalte Nahwärmenetz

Symbol	Einheit	Bezeichnung
Q_{Nutz}	<i>MWh</i>	Monatliche, durch die Wärmepumpen gelieferte Nutzwärme
$Q_{PSloss,k}$	<i>kWh</i>	Wärmeverluste der dezentralen Pufferspeicher
$Q_{renewable,k}$	<i>kWh</i>	Ertrag an thermischer Umweltenergie, d. h. Umgebungswärme und Sonnenenergie
Q_{sol}	<i>MWh</i>	Monatlicher solarer Wärmeertrag
$Q_{Quellen}$	<i>MWh</i>	Monatliche durch die Wärmepumpen genutzte Wärme der Wärmequellen Eisspeicher und Luft-Sole-Kollektoren
\dot{Q}	<i>W</i>	Wärmestrom
R	<i>a</i>	Verhältnis von Eisspeicherkapazität und Heizwärmebedarf
E_i, F_i, H, I_i, J_i	–	Gewichtungsfaktoren der Zielfunktion der modellprädiktive Regelung (MPR)
S	<i>W</i>	Warmhalteverluste
S_A	<i>W</i>	Oberer Grenzwert der Warmhalteverluste zur Realisierung der EEK A ohne Sicherheit
$S_{A,sich}$	<i>W</i>	Oberer Grenzwert der Warmhalteverluste zur Realisierung der EEK A mit Sicherheit
S_{oc}	–	Beladungszustand (State of Charge)
S_{oi}	–	Vereisungszustand (State of Icing)
T	<i>K</i>	Temperatur in Kelvin
U	<i>abh. v. Messgr.</i>	erweiterte Messunsicherheit
U	$\frac{W}{m^2K}$	Wärmedurchgangskoeffizient
W_{el}	<i>MWh</i>	Monatlicher elektrischer Strombedarf der Wärmepumpen

Kleine lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
$a_{sys}(x)$	<i>abh. v. Messgr.</i>	systematische Abweichung der Messgröße x z. B. der Bestimmung der Eismasse
c_1 bis c_6	<i>var</i>	Kennwerten der Wärmeverlustterme Kollektorkennlinie
c_p	$\frac{kJ}{kg \cdot K}$	spezifische Wärmekapazität
$f_{sol,th}$	%	solarthermischer Deckungsanteil
h_{15}	<i>mm</i>	Höhe der zylindrischen Speicherwand
h_B	<i>mm</i>	Höhe des Speicherbodens
k	–	Erweiterungsfaktor
l	<i>mm</i>	Länge
l_{mess}	<i>mm</i>	Wasserstandshöhe kontinuierlich gemessen
m	<i>kg</i>	Masse
m_{Nenn}	<i>kg</i>	Nennmasse von (flüssigem) Wasser im Latentspeicher
\dot{m}	<i>kg/s</i>	Massenstrom
n	–	Anzahl Messungen
s	<i>m</i>	Plattenabstand
t	<i>d</i>	Zeit
u	<i>abh. v. Messgr.</i>	Messunsicherheit
u_D	<i>abh. v. Messgr.</i>	Standardunsicherheit ermittelt nach der Durchführung von Doppelbestimmungen
u_{SVS}	<i>abh. v. Messgr.</i>	Standardunsicherheit des zu prüfenden Beladungsensors, ermittelt anhand von Vergleichsmessungen
w_{SVS}	<i>abh. v. Messgr.</i>	relative Standardunsicherheit des zu prüfenden Beladungssensors ermittelt anh. von Vergleichsmessungen

Symbol	Einheit	Bezeichnung
x_i	<i>abh. v. Messgr.</i>	i-ter Messwert des zu prüfenden Sensors bzw. i-ter Messwert der Messeinricht. bei Doppeltbestimmungen
x_{liquid}	–	Massenkonzentration von flüssigem Wasser im Eisspeicher

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	–	Irrtumswahrscheinlichkeit
ϵ_0	$\frac{A \cdot s}{V \cdot m}$	elektr. Feldkonstante des Vakuums
ϵ_R	$F \cdot m^{-1}$	Dielektrizitätszahl des Dielektrikums
η	$\frac{kg}{m \cdot s}$	dynamische Viskosität
$\eta_{0,b}$	–	Spitzenwirkungsgrad Kollektor
Δ	<i>abh. v. Messgr.</i>	Differenz
Δt	h	Zeitintervall
ρ	kg/m^3	Dichte
λ	$W/(K \cdot m)$	(effektive) Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{VIP,0a}(\vartheta)$	$W/(K \cdot m)$	temperaturabhängige effektive WLF eines ungealterten VIP
$\lambda_{VIP,25a}(\vartheta)$	$W/(K \cdot m)$	temperaturabhängige effektive WLF eines VIP nach 25 Jahren
φ	%	relative Feuchtigkeit
$\phi(m)$	–	Dichte der Gaußschen Normalverteilung
θ	°	Einfallswinkel

Symbol	Einheit	Bezeichnung
ϑ	$^{\circ}C$	Temperatur (in $^{\circ}C$)
$\vartheta_{Erdreich}$	$^{\circ}C$	Erdreichtemperatur
ϑ_{Fluid}	$^{\circ}C$	Fluidtemperatur
$\vartheta_{ice,m}$	$^{\circ}C$	Mittelwert der gemessenen Eisspeichertemperaturen
$\vartheta_{ice,s}$	$^{\circ}C$	mittlere simulierte Eisspeichertemperatur
ϑ_{Latent}	$^{\circ}C$	Speichertemperatur im Eisspeicher

Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung
AP	Arbeitspaket
BG	Beladegrenze
BHKW	Blockheizkraftwerk
CFD	Computational Fluid Dynamics
COMTES	Development and realistic-scale demonstration of a compact seasonal heat storage
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DIN EN ISO	in Deutschland, Europa und international anerkannte Norm
EEK	Energieeffizienzklasse
EG	Entladegrenze
EnEV	Energieeinsparverordnung
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Monomer

Symbol	Bezeichnung
EPREL	Europäische Produktdatenbank für die Energieverbrauchskennzeichnung
EPS	expandiertes Polystyrol
EVU	Energieversorgungsunternehmen
FEM	Finite Elemente Methode
FKZ	Förderkennzeichen
GA	genetischer Algorithmus
GEPS	Graphithaltiges expandiertes Polystyrol
GOK	Geländeoberkante
HeizSolar	Untersuchung und simulationstechnische Optimierung von Wärmeversorgungskonzepten für Wohngebäude, deren Gesamtwärmebedarf zu 50 % bis 100 % mit Solarwärme gedeckt wird und Vergleich mit anderen CO ₂ -reduzierten Wärmeversorgungskonzepten
IEA	International Energy Agency
IGTE	Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
JAZ	Jahresarbeitszahl
KL	Konzeptlösung
KNN	künstliches neuronales Netz
LCoH	Levelized Cost of Heat
LON	Local Operating Network
LSK	Luft-Sole-Kollektor
MID	magnetisch-induktives Volumenstrommessgerät
MPR	modellprädiktive Regelung
PE	Polyethylen

Symbol	Bezeichnung
PFV	Polyesterfaservlies
PP	Polypropylen
PS	Pufferspeicher
PTFE	Polytetrafluorethylen
Pt25/Pt100 /Pt500	Widerstandsmessfühler
PUR	Polyurethan
PV	Photovoltaik
PVT-Kollektor	photovoltaisch-thermischer Hybridkollektor
RH	Raumheizung
R&I-Schema	Rohrleitungs- und Instrumentierungs-Schemas
RK	Raumkühlung
SG-Ready	Smart Grid Ready
SHC	Solar Heating and Cooling Programm der IEA
SoC	Beladungszustand (State of Charge)
Sol4City	Entwicklung integrierter solarer Versorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude der „Stadt der Zukunft“
SolSys	Analyse und Optimierung solarer Energieversorgungssysteme (Wärme/Strom)
SPS	Speicherprogrammierbare Steuerung
Student-T	studentsche T-Verteilung
TRNSYS	Transient System Simulation Tool
VDI	Verein Deutscher Ingenieure

Symbol	Bezeichnung
VIP	Vakuumisolationspaneele
VQP	kaschierte VIP „va-Q-patch“ des Herstellers va-Q-tec
WLF	Wärmeleitfähigkeit
WMZ	Wärmemengenzähler
WP	Wärmepumpe
WWS	Warmwasserspeicher
ZPA	Zweiplattenapparatur

Indizes

Symbol	Bezeichnung
<i>a</i>	außen
<i>a</i>	ambient
<i>Boden</i>	Boden (des Eisspeichers)
<i>Coriolis</i>	Coriolis-Massenstrommessgerät
<i>Eis</i>	Eis
<i>Erde</i>	Erdreich
<i>EWT</i>	Entzugswärmeübertrager
<i>fluid</i>	Fluid
<i>flüssig</i>	flüssig
<i>Gen</i>	Generierung / Bereitstellung
<i>ges/Gesamt</i>	gesamt

Symbol	Bezeichnung
<i>GOK</i>	Geländeoberkante
<i>HD</i>	hohe Dichte (high density)
<i>i</i>	innen
<i>in</i>	Eintritt
<i>K</i>	komprimiert
<i>kons</i>	konservativ
<i>L</i>	longitudinal
<i>latent</i>	Eigenschaft des Latentspeichermaterials (z.B. ϑ_{latent})
<i>LD</i>	geringe Dichte (low density)
<i>Luft</i>	Luft
<i>m</i>	Mittelwert
<i>MID</i>	magnetisch-induktives Volumenstrommessgerät
<i>Nev</i>	Neveon Holding GmbH
<i>out</i>	Austritt
<i>PS</i>	Pufferspeicher
<i>R</i>	direkte Messung
<i>Raum</i>	Raumluft
<i>Rd</i>	Radarwellen-Sensor
<i>Ref</i>	Referenz
<i>RL</i>	Rücklauf
<i>S</i>	indirekte Messung

Symbol	Bezeichnung
<i>San</i>	Sandler AG
<i>Sensor</i>	Sensor
<i>Soll</i>	Soll(-temperatur)
<i>Sommer</i>	Sommer
<i>T</i>	transversal
<i>US</i>	Ultraschall-Sensor
<i>Umgebung</i>	Umgebungsluft
<i>VCS</i>	Viessmann Climate Solutions SE
<i>VL</i>	Vorlauf
<i>W</i>	Wasser
<i>Wände</i>	Wände (des Eisspeichers)
<i>Winter</i>	Winter
<i>WÜT</i>	Wärmeübertrager

1. Einleitung

In dem vorliegenden Bericht werden die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens „Sol4City – Entwicklung integrierter solarer Versorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude der „Stadt der Zukunft““ (FKZ 03ETW019A+B) dargestellt.

Das Vorhaben wurde als Verbundvorhaben der Fa. Viessmann Climate Solutions SE (VCS) und dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart gemeinsam durchgeführt. Das Verbundvorhaben wurde durch das IGTE koordiniert.

Zentrales Ziel der Fa. VCS und des IGTE war im Rahmen des Verbundvorhabens Sol4City die Entwicklung von ganzheitlichen Gebäudeenergieversorgungskonzepten mit hoher solarelektrischer und solarthermischer Deckung. Die Entwicklung war dabei nicht auf die sinnvolle Kombination von Einzelkomponenten beschränkt, sondern bezog die Entwicklung einer intelligenten, adaptiven und prädiktiven Systemregelung mit ein. Dies stellt nicht nur die optimale Gebäudeversorgung sicher, sondern ermöglicht und unterstützt auch eine aktive bilaterale Interaktion mit bestehenden elektrischen und thermischen Netzinfrastrukturen und trägt so auf übergeordneter Ebene zu einer nachhaltigen Energieversorgung bei.

Das Vorhaben wurde als paralleles Forschungsprojekt gemeinsam in Deutschland und Österreich durchgeführt. Die Projektpartner aus österreichischer Seite sind

- AEE INTEC, Gleisdorf (Koordination österreichisches Projekt und Gesamtprojekt)
- Institute of Polymeric Materials and Testing Johannes Kepler Universität Linz
- GREENoneTEC Solarindustrie GmbH
- SONNENKRAFT GmbH
- KIOTO Photovoltaics GmbH
- Kreisel Electric GmbH & Co KG.

Die beiden Parallelprojekte verfolgen übergeordnet die gleichen Ziele, wobei sich die gewählten technologischen Ansätze und individuellen Schwerpunkte unterscheiden.

1.1 Motivation und Problemstellung

Laut der novellierten europäischen Gebäuderichtlinie dürfen ab 2021 nur noch Niedrigstenergiegebäude errichtet werden, welche ihren benötigten Energiebedarf aus erneuerbaren Energiequellen decken, die sich am Standort des Gebäudes oder in seiner unmittelbaren Umgebung befinden.

Diese Forderung der europäischen Union macht hochintegrierte Gesamtenergieversorgungskonzepte für Wärme und Strom notwendig. Die dafür benötigten Einzelkomponenten sind bisher nur zum Teil am Markt verfügbar. Neben den technologischen Lücken, wie z. B. die effektive saisonale Wärmespeicherung sowie flächeneffiziente kombinierte solarthermische und so-

larelektische Erzeugertechnologien, sind auch keine übergeordneten, intelligenten Regelungssysteme am Markt, die alle Komponenten, Parameter und externen Einflussgrößen berücksichtigen und so das Gesamtsystem intelligent und adaptiv regeln können.

Die Wärmepumpentechnologie stellt ein weiteres Schlüsselement zur effizienten Wärmeversorgung von Gebäuden dar. Allerdings sind die bisher am Markt verfügbaren Anlagen und Geräte primär für eine dezentrale, individuelle Versorgung von kleineren Gebäuden entwickelt und optimiert worden. Die wärmepumpenbasierte Nutzung der Umweltwärme im großtechnischen Maßstab im urbanen Raum ist daher noch mit einer Vielzahl offener Fragen und entsprechendem Forschungs- und Entwicklungsbedarf verbunden.

Ziel des Forschungsvorhabens „Sol4City“ war die Entwicklung fehlender Schlüsselkomponenten wie effiziente Wärmespeicher und flächeneffiziente photovoltaische Luft-Sole-Kollektoren sowie intelligente Gesamtsystemregler, sowie deren Kombination mit bereits verfügbaren, anderen Komponenten wie Eisspeicher, kalten Nahwärmenetzen und Wärmepumpen zu hoch-effizienten Gesamtsystemen. Nach Klärung der technischen und wissenschaftlichen Fragestellungen, die durch eine Kombination von Einzeltechnologien auftreten, wurde eine übergeordnete, modulweise übertragbare Regelung für das Gesamtsystem entwickelt. Am Projektende liegen für die breite Anwendbarkeit in der „Stadt der Zukunft“ ganzheitliche Energieversorgungskonzepte für Geschosswohnbauten vor, die sich durch ein hohes Netzinteraktions- und Flexibilisierungspotenzial, maximale Flächeneffizienz der Umwandlungstechnologien vor Ort sowie hoher ökonomischer Konkurrenzfähigkeit auszeichnen. Die Übertragbarkeit der neu entwickelten Schlüsselkomponenten und Gesamtsysteme auf Bestandsobjekte und andere Gebäudetypen wird ebenso dargestellt.

1.2 Stand der Technik

Werden heute Gebäude neu errichtet oder umfassend saniert, so werden überwiegend Wärmepumpen, Gaskessel oder Fernwärme als Wärmequelle eingesetzt. Des Weiteren ist ein Trend zu Strom-direkt-Heizungen (Infrarot-Paneele) festzustellen. Der Strombedarf wird direkt aus dem öffentlichen Stromnetz gedeckt. Dies entspricht nicht den Vorgaben der europäischen Gebäuderichtlinie und macht zusätzlich Planung und Betrieb der elektrischen Versorgungsnetze schwierig. Eine Möglichkeit der nachhaltigen Wärmeversorgung ist die Nutzung von Fernwärme. Die zunehmend bessere Wärmedämmung der Gebäude und der Klimawandel bewirken allerdings sinkende Wärmeabsätze und Wärmebedarfsdichten, wodurch bestehende Netze energetisch und wirtschaftlich ineffizienter werden. Netzerweiterungen und Neuanschlüsse von Gebäuden oder Siedlungen mit geringem Wärmebedarf sind für die konventionelle Fernwärme oft nicht mehr lohnenswert, da die Wärmeverluste der Rohrleitungen und die Errichtungskosten für neue, konventionelle Wärmenetzinfrastruktur sehr hoch sind.

Daher ist die Energieerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen vor Ort und die direkte Nutzung bei gleichzeitig intelligenter Einbindung bzw. Entlastung der öffentlichen Strom- und Wärmenetze ein vielversprechender Lösungsansatz. Ebenso ist die innerhalb dieses Vorhabens geplante Entwicklung von kalten Nahwärmenetzen, sogenannten Anergienetzen, in Kombina-

tion mit Latentspeichern eine interessante, zukunftsfähige Option. Für den verdichteten Wohnbau im urbanen Gebiet ist die Energieerzeugung, -speicherung und Energieverteilung auf dem beschränkt verfügbaren Raum allerdings auch eine große Herausforderung, da nach dem heutigen Stand der Technik noch keine standardisierten systemischen Lösungen vorliegen. Des Weiteren fehlen Komponenten, welche auf den beschränkten Stell- und Erzeugerflächen die notwendige Leistung für eine primäre Vor-Ort-Erzeugung der benötigten Energie bereitstellen können. Im Folgenden wird der Stand der Technik der zentralen Elemente Speicher, Versorgungstechnologien und Gesamtsystem für eine dezentrale Energiebereitstellung erläutert.

1.2.1 Vorarbeiten zum Projekt Sol4City

Die Fa. VCS hat am Markt bereits vor dem Vorhaben Latentspeicher bzw. Eisspeicher, Wärmepumpen sowie Heizungs- und Warmwasserspeicher in verschiedenen Größen und Leistungsklassen angeboten. Teilweise, wie bei der hocheffizienten Wärmedämmung der Warmwasserspeicher oder auch bei der Sensorik zur Beladungszustandbestimmung der Latentspeicher waren Defizite bekannt, für die im Vorhaben technische Lösungen entwickelt wurden. Weiterhin stand die Kombination der Komponenten für die Versorgung von Quartieren mit einer durch eine adaptiven und prädiktive Systemregelung effizient betriebenen Gesamtsystems vor Beginn des Vorhabens nicht zur Verfügung.

1.2.2 Anergienetze bzw. kalte Nahwärme

Anergienetze, auch kalte Nahwärmenetze genannt, haben gegenüber klassischen Nah- und Fernwärmenetzen den Vorteil, dass sie aufgrund ihres niedrigen Betriebstemperaturniveaus keine Wärmeverluste, sondern evtl. sogar noch Wärmegewinne aus der Umgebung aufweisen. Werden sie, wie im Vorhaben vorgesehen, als Wärmequelle für Wärmepumpen genutzt, so hat dies gegenüber der Nutzung von Außenluft als Wärmequelle den Vorteil, dass das Temperaturniveau in der Kernheizperiode höher und damit die Leistungszahl der Wärmepumpe besser ist. Bei einem ausreichend hohem Wärmebedarf, der z. B. durch den Zusammenschluss mehrerer Gebäude erreicht werden kann, ist es wirtschaftlicher in eine aufwendigere Technik zur Bereitstellung von Wärmequellen für die Wärmepumpen auf einem relativ hohen Temperaturniveau zu investieren, als dies bei wärmepumpenbasierten Heizsystemen für Einfamilienhäuser der Fall ist [1].

Ein weiterer Vorteil von Anergienetzen stellt die Tatsache dar, dass die Wärmespeicherung im Netz auf niedrigem Temperaturniveau erfolgen kann. Hierdurch werden zum einen die Wärmeverluste der Wärmespeicher minimiert bzw. gänzlich vermieden [2]. Zum anderen kann die latente Wärme des Phasenwechsels fest/flüssig z. B. mittels Eisspeicher ausgenutzt werden, was zu einer deutlichen Erhöhung der effektiv nutzbaren Energiespeicherdichte führt.

1.2.3 Wärmepumpen

Die Wärmepumpentechnik hat in den letzten 10-15 Jahren nachgewiesen, dass sie einen deutlichen Beitrag zur Reduzierung des Primärenergieaufwands bei der Wärmeversorgung von Gebäuden leisten kann [3].

Bei einem steigenden Anteil von Wärmepumpen stellt die Nutzung und Verfügbarkeit der Umweltwärme aber ein wachsendes Problem dar, insbesondere im verdichteten urbanen Raum. So lassen sich z. B. Geothermie-Anlagen mit Erdsonden als Wärmequelle für die Wärmepumpe nicht in beliebig dichtem Abstand nebeneinander betreiben, da es sonst zu einer zu starken Auskühlung des Erdreichs kommt [4].

Der Ventilator zum effektiven Betrieb der Außenluft-Wärmeübertrager als Wärmequelle für Wärmepumpen erzeugt teils erhebliche Schallemissionen, welche den minimalen Abstand des außen aufgestellten Geräts zu (Nachbar-)Gebäuden definieren. Die gerätespezifischen Schallwerte verlangen eine genaue Planung der Projekte und teilweise lassen sich die schallschutztechnischen Anforderungen insbesondere im städtischen Bereich nicht erfüllen [5]. Weiterhin ist die starke Abhängigkeit der Arbeitszahl von der Außentemperatur bei Luft/Wasser-Wärmepumpen, bis hin zum Wert „1“ bei Temperaturen um -15°C problematisch, da der steigende Heizbedarf bei niedrigen Außentemperaturen zu einem überproportional ansteigenden Strombedarf der Wärmepumpe führt.

1.2.4 Thermische und elektrische Energiespeicher

Energiespeicher sind insbesondere bei der Nutzung von volatilen, erneuerbaren Energieerzeugungstechnologien sowie den entsprechenden Energieversorgungssystemen von entscheidender Bedeutung. Für die lokale Energieerzeugung stehen im urbanen Umfeld Solarthermie und Photovoltaik im Vordergrund. Mit Hilfe von Langzeitspeichern kann der Ertrag aus einstrahlungsreichen Zeiten in einstrahlungsärmere Perioden verschoben werden. Eine möglichst verlustfreie Energiespeicherung ist unabhängig von der angestrebten Speicherdauer wünschenswert, jedoch bisher noch nicht befriedigend gelöst. Wärme ist aus technischer und wirtschaftlicher Sicht besser saisonal speicherbar als elektrische Energie und wird daher auch in zukünftigen Energiesystemen von entscheidender Relevanz sein [6]. Nach dem heutigen Stand der Technik können solare Technologien in Verbindung mit Wasserspeichern gut für die Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung eingesetzt werden. Höhere solare Deckungsanteile, insbesondere für die Wärmebereitstellung in Geschosswohnbauten, sind heute schon technisch möglich, doch steigen die thermischen Energieverluste des Speichers, der Platzbedarf für den Wasserspeicher und auch die Kosten signifikant an. Daher sind verbesserte Maßnahmen hinsichtlich effizienter Wärmespeicherung dringend notwendig.

1.2.4.1 Warmwasserspeicher

Aktuell werden Warmwasserspeicher eingesetzt, welche dauerhaft auf hoher Temperatur gehalten werden müssen und dadurch mit hohen Wärmeverlusten behaftet sind. Die Verluste können durch bessere Wärmedämmungen verringert werden, was jedoch zu einer deutlichen Vergrößerung des Einbauvolumens sowie einer Erhöhung der Investitionskosten führt. Einige

Pilotprojekte zeigen bereits erfolgreich, dass große Wasserspeicher auch als saisonale Wärmespeicher genutzt werden können. Die dafür notwendigen großen Volumina verbessern zwar das Oberflächen-Volumenverhältnis, was zu geringeren relativen Wärmeverlusten führt. Doch ist der Platzbedarf derartiger Speicher enorm. Eine vielversprechende Lösung für die signifikante Reduktion von Speicherungsverlusten ist der Einsatz von **Vakuumwärmedämmung** [7]. Zwei konzeptionelle Entwicklungsrichtungen zum Einbau dieser Wärmedämmungen können unterschieden werden: Doppelmantel-Konzepte und VIP-Konzepte (VIP: Vakuumisolationspaneele). Bei Doppelmantel-Konzepten werden in der Regel schüttfähige und evakuierbare Füllmaterialien in einen vakuumdruckbeständigen Doppelmantel am Warmwasserspeicher eingebracht und anschließend evakuiert. Bei VIP-Konzepten werden vorkonfektionierte VIPs in geeigneter Weise am Warmwasserspeicher montiert und bilden die Wärmedämmung. Unabhängig vom angewandten Einbaukonzept ermöglicht die Vakuumwärmedämmung eine um den Faktor fünf bis zehn niedrigere Wärmeleitfähigkeit als eine konventionelle Wärmedämmung [8].

Obwohl bereits eine Vielzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen zur Untersuchung von Vakuumwärmedämmungen, insbesondere zu VIPs, existiert, besteht weiterhin Forschungsbedarf, z. B. hinsichtlich der Entwicklung von Maßnahmen zur effektiven, zeitoptimierten Evakuierung sowie der langfristigen Aufrechterhaltung des Vakuums. Weiterhin muss ein kosteneffizientes Produktionsverfahren entwickelt werden, um den Einsatz der Technologie im Massenmarkt zu ermöglichen.

1.2.4.2 Latentspeicher

Diese Speichertechnik nutzt den Phasenwechsel zur Speicherung thermischer Energie. Insbesondere im Bereich kleiner Speichertemperaturdifferenzen ist die dadurch effektiv nutzbare spezifische Speicherkapazität um ein Vielfaches höher, als dies ohne die Ausnutzung des Phasenwechsels der Fall wäre. Da der Einsatz von Wasser als Speichermaterial für Latentspeicher unter anderem unter ökonomischen und ökologischen Aspekten sehr attraktiv ist, stellen sogenannte Eisspeicher eine äußerst interessante Technologie dar. Aufgrund der Nutzung der Eisspeicher als Wärmequelle während der Heizperiode werden diese immer als langzeit- oder saisonale Speicher betrieben. Bei Anlagen, in denen Eisspeicher als thermische Quelle für Wärmepumpen dienen, wurden in Feldmessungen Jahres-Arbeitszahlen nachgewiesen, die im Bereich von mit Erdsonden als Wärmequelle ausgerüsteten Wärmepumpenanlagen liegen [9].

Besteht zusätzlich zum winterlichen Wärmebedarf im Sommer ein Kühlbedarf, so kann der Eisspeicher in diesem Fall auch sehr effizient zur Bereitstellung von Kälte genutzt werden. Durch diese Möglichkeit der multifunktionalen Nutzung ergeben sich für Eisspeicher deutliche Vorteile gegenüber klassischen, saisonalen Wärmespeichern.

Ein gravierender Nachteil der Latentspeichertechnologie ist jedoch der gegenüber der Wärmespeicherung ohne Phasenwechsel extrem schwierige ermittelnde Beladungszustand des Speichers. Dies trifft insbesondere auf Latentspeicher mit dem Phasenwechsel fest-flüssig, also auch auf Eisspeicher zu, da die hier auftretende Volumenänderung zu einer Zerstörung

des Speicherbehälters sowie der darin befindlichen Wärmeübertrager führen kann. Eine zuverlässige und preiswerte Technik zur Messung des „Vereisungszustands“ ist bisher nicht verfügbar und hemmt daher gegenwärtig den Einsatz dieser vielversprechenden Technik. Aufbauend auf grundlegenden Arbeiten zur Bestimmung der Eisdicke bzw. des Eisvolumens mittels eines sogenannten Gelatometers [10] war ein Ziel in diesem Vorhaben die Entwicklung eines kostengünstig und zuverlässig funktionierenden Messverfahrens.

In einem Anergienetz, gespeist aus volatilen regenerativen Quellen, kommt dem darin integrierten Latentspeicher eine weitere wichtige Funktion zu: Sollten für eine gewisse Zeit keine regenerative Wärmequelle durch extrem niedrige Außentemperatur und fehlende Sonneneinstrahlung zur Verfügung stehen, so muss der Latentspeicher zuverlässig diese Phase überbrücken können. Anders als bei Wärmespeichertechnologien, bei denen ausschließlich fühlbare Wärme genutzt wird (vgl. z.B. [11]) ist bei einem Latentspeicher nach dem kompletten Phasenwechsel keine nennenswerte effektiv nutzbare Restenergie mehr vorhanden. Eine möglichst exakte Angabe des restlichen Energieinhalts, verbunden mit möglichst exakten Verbrauchs- und (solaren) Erzeugungsprognosen sowie einem Quellenmanagement ist daher unabdingbar.

Eine weitere ungeklärte Frage ist die für eine bestimmte Systemkombination aus Latentspeicher, Anergienetz und Wärmepumpen unter energetischen und wirtschaftlichen Aspekten optimale Phasenwechseltemperatur. Zur Bestimmung dieser Temperatur wurde bislang so vorgegangen, dass mittels aufwendiger Betrachtungen auf Basis der Ergebnisse von Jahressimulationen eine Optimierung des Latentspeichers für wenige Systemkonfigurationen (Lastszenario, Wetterszenario, Systemhydraulik) durchgeführt wurde. Im vorliegenden Projekt wurde die Herangehensweise jedoch umgekehrt: In einem ersten Schritt wird durch eine energetische und wirtschaftliche Betrachtung eine optimale Phasenwechseltemperatur für das System auf Basis der Energieflüsse ermittelt, ohne die genaue Ausführung des Systems zu beachten. Anschließend wird der genaue Systemaufbau aus Hydraulikschema, Wärmepumpenleistung, Speicherkapazitäten (Latentspeicher und Nutzwärmespeicher), Leistung der Hybridkollektoren, Auslegung der Wärmeübertrager sowie den regelungstechnischen Einflussmöglichkeiten wie Variationsbreite des Volumenstroms im Solarkreislauf und erforderliche Funktionen (beispielsweise Zieltemperaturregelung statt Ein/Aus) entwickelt, damit für die gesamte Breite eines ausgewählten Anwendungsspektrums, das sich z. B. durch eine Variation des Energieverbrauchs und der Nutzwärmespeichertemperaturen auszeichnet, ein weitgehend optimaler Aufbau des Gesamtsystems entsteht.

1.2.4.3 Sorptionsspeicher

Ein Ansatz für die saisonale Speicherung von thermischer Energie wurde im EU-geförderten Projekt COMTES [12] erarbeitet, wo Feststoffsorption mit Zeolith für saisonale Solarwärmespeicherung genutzt wurde. Adsorption ist ein physikalischer Prozess, bei dem sich Wasserdampfmoleküle an der Oberfläche eines Feststoffs, wie z. B. Zeolith anhaften. Hierbei wird Wärme frei. Ein Ausheizen des Zeoliths führt zum Ausdampfen des Wassers, d. h. der Desorption. Für die Wärmespeicherung werden Sorptionsmaterial und Wasser in unterschiedlichen

Behältern getrennt voneinander aufbewahrt. Auf diese Art und Weise ist eine praktisch verlustfreie Wärme- bzw. thermische Energiespeicherung über beliebig lange Zeiträume möglich. Mit Tests an Funktionsmustern im Labormaßstab konnte die grundsätzliche Funktionsfähigkeit dieser Technologie nachgewiesen werden und wurde daher als vielversprechender Ansatz für saisonale thermische Energiespeicherung eingestuft.

Die Speicherdichte ist u. a. abhängig vom Trocknungsgrad des Sorptionsmaterials. Daher ist ein möglichst geringer Feuchtigkeitsgehalt des desorbierten Materials anzustreben. Der erreichbare Trocknungsgrad ist u. a. stark abhängig von der Ausheiztemperatur, welche bei der Nutzung von Solarthermie aus praktischen Gründen auf max. 180 °C beschränkt ist. Daher gab es im Zuge von COMTES bereits erste Überlegungen hinsichtlich eines sogenannten „charge boost“, mit welchem der Trocknungsgrad nach dem solaren Ausheizen des Sorptionsmaterials weiter erhöht werden kann. Bei diesem Verfahren wird der eigentliche Sorptionsspeicher (Hauptspeicher) um einen zweiten Sorptionsspeicher, den charge-boost-Speicher, ergänzt. Nach erfolgtem Ausheizen beider Speicher wird der Hauptspeicher auf Temperatur gehalten, während der charge-boost-Speicher abgekühlt wird. Im kalten Speicher herrscht nun ein deutlich niedrigerer Druck. Diese Druckdifferenz zwischen dem heißen und dem kalten Speicher kann nun genutzt werden, um den heißen Speicher weiter auszutrocknen. Durch erneutes Ausheizen des kalten Speichers kann der charge-boost-Prozess wiederholt werden und die Speicherdichte des Hauptspeichers sukzessive erhöht werden.

Für das Entladen des Sorptionsspeichers ist eine Niedertemperatur-Wärmequelle notwendig, um das getrennt gelagerte Wasser zu verdampfen. Dieser Verdampfungsprozess kann so konzeptioniert werden, dass er in der warmen Jahreszeit zusätzlich für Raumkühlung verwendet werden kann.

Im Rahmen des Vorhabens werden Sorptionsspeicher nur im österreichischen Teilprojekt untersucht. Die Technologie ist für den Einsatz als saisonaler Speicher in Anergienetzen für Quartiere, dem Fokus des deutschen Teilprojekts, unter aktuellen Bedingungen wirtschaftlich nicht darstellbar.

1.2.4.4 Elektrische Energiespeicher

Im vorliegenden Projekt wurden aus marktverfügbaren, elektrochemischen Batterietechnologien geeignete Ansätze ausgewählt und technologisch sowie regelungslogisch in die Gesamtenergieversorgungskonzepte integriert.

Anmerkung: Im allgemeinen Sprachgebrauch werden elektrische Energiespeicher auch „Stromspeicher“ genannt.

1.2.5 Solare Versorgungstechnologien für Wärme und Strom

Die Kombination aus Photovoltaik und Solarthermie wird als **photovoltaisch-thermischer Hybridkollektor³ (PVT-Kollektor)** bezeichnet und bringt einen klaren Vorteil hinsichtlich des Flächenbedarfs im Vergleich zur parallelen Nutzung mittels PV-Modulen und Sonnenkollektoren. Sollen hohe solarthermische und solarelektrische Deckungsanteile erreicht werden, so ist dies im Vergleich zu Einfamilienhäusern bei Geschosswohnbauten aufgrund des geringeren Verhältnisses von Dachfläche zu Wohnfläche – und damit zum Energieverbrauch – deutlich schwieriger. Bedingt durch den Wirkungsgradunterschied von Photovoltaik (15 % bis 20 %) und Solarthermie (30 % bis 60 %) sind für Photovoltaik deutlich größere Flächen notwendig, wenn der Strombedarf am Standort für Haushaltsstrom und gegebenenfalls E-Mobilität zu einem möglichst großen Anteil gedeckt werden soll. Als Konsequenz hiervon sind dann für die solare Wärmeerzeugung mittels Sonnenkollektoren keine oder nur noch sehr geringe Flächen verfügbar. Im Fall von Hybridkollektoren heißt das, dass ihr Einsatz speziell dann interessant ist, wenn zusätzlich zum Strombedarf ein ausreichend großer Wärmebedarf und gleichzeitig ein beschränktes Flächenpotential vorliegen. Beides trifft für den verdichteten Wohnbau im urbanen Raum zu.

Bei dem überwiegenden Teil der aktuell ca. 50 auf dem internationalen Markt verfügbaren PVT-Hybridkollektoren handelt es sich um nicht-abgedeckte Kollektoren. Durch die aktive Kühlung der PV-Module, die integraler Bestandteil der PVT-Hybridkollektoren sind, wird der elektrische Ertrag erhöht und die abgeführte Wärme auf niedrigem Temperaturniveau (bis ca. 40 °C) bildet einen gewissen Mehrwert gegenüber Standard-PV-Modulen. Der aktuelle Anwendungsbereich der Wärmeauskopplung derartiger Hybridkollektoren liegt bei der Schwimmbadwassererwärmung, der Trinkwasservorwärmung, der Erdreichregeneration und der quelseitigen Kombination mit Wärmepumpensystemen. Im Rahmen der vom BMWK geförderten Initiative IntegraTE [13] wurde ein Wikipedia-Artikel erstellt, der weiterführende Informationen zur Technologie von PVT-Hybridkollektoren und deren Anwendung liefert. [14]

Die Technologie abgedeckter PVT-Hybridkollektoren ist noch wenig auf dem Markt vertreten. Dies ist unter anderem darauf zurückzuführen, dass die Erreichung höherer Temperaturen zwar wünschenswert ist, doch erhöhte PV-Zellentemperaturen einen elektrischen Wirkungsgradverlust zur Folge haben (ca. 0,5 % pro Kelvin für monokristalline Siliziumzellen) und zusätzlich sich die Lebensdauer der Zellen verringern kann [15]. Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit sind die abgedeckten Hybridkollektoren noch nicht konkurrenzfähig mit den Einzeltechnologien bzw. deren Kombination, da die höhere Komplexität der Module angepasste Materialien und Konstruktionen erfordert.

Ein wichtiges Thema von integrierten PVT-Hybridkollektoren ist die Frage, wie flexibel die Komponente auf unterschiedliche Anforderungen reagieren kann. In Abhängigkeit von den Anforderungen des Gesamtsystems kann ein strom- oder wärmegeführter Betrieb des Hybridkollektors gefordert sein. Auf diese Anforderung kann entweder durch flexible Aufbauten in der

³ Für PVT-Kollektoren und PVT-Hybridkollektoren wurde zwischenzeitlich in der Normung der Begriff „photovoltaische Luft-Sole-Kollektoren“ festgelegt.

Produktion (verschiedene Produkte für unterschiedliche Anwendungen) oder durch Flexibilität während des Betriebs reagiert werden. Für beide Wege sind keine Lösungen am Markt verfügbar, wobei zur variablen Leistungssteuerung im Betrieb erste Forschungsergebnisse existieren. [16]

Für die Bereitstellung von Wärme auf sehr niedrigen Temperaturniveau, teilweise sogar unter der Umgebungstemperatur, wie dies für den effizienten Betrieb von Anergienetzen und Eis speichern erforderlich ist, sind weitere Fragestellungen ungeklärt:

- Gelingt es ein Produkt zu entwickeln, das einerseits solare Einstrahlung in Wärme auf Nutztemperaturniveau (40 bis 60°C) umwandelt und andererseits Wärme aus der Umgebungsluft bezieht, wenn die solare Einstrahlung für eine effektive Wärmeerzeugung zu gering ist?
- Wie wirkt sich der Betrieb unterhalb der Kondensationstemperatur und unterhalb des Gefrierpunkts auf die Leistungsfähigkeit und die Dauerhaftigkeit marktverfügbare PVT-Kollektoren aus?

1.2.6 Gesamtsystem

Die integrale Kopplung aller lokalen, volatilen Energieerzeuger, der Wärme- und Stromverbraucher, der Speicher (Gebäude, Wärme- und Stromspeicher) und der Versorgungsnetze ist eine äußerst komplexe Aufgabe, für die es derzeit noch keine standardisierten Lösungen gibt. Zur Beantwortung der Aufgabe sind eine Vielzahl von Aspekten wie die Nutzung der vorhandenen Flächen hinsichtlich Haustechnik-Komponenten (Bauvolumen) einerseits und lokaler Erzeugungstechnologien wie PV, Solarthermie oder PVT (Ausrichtung, Größe, Neigung) andererseits, Lastprofile für Wärme- und Strombedarf (Haushaltsstrom, E-Mobilität), die Dimensionierung aller Komponenten hinsichtlich Versorgungssicherheit und aktiver oder passiver **Entlastung der Versorgungsnetze** und nicht zuletzt die Regelung des Gesamtsystems zu berücksichtigen. Die aktive Entlastung der Versorgungsnetze setzt eine gewisse Gebäudeflexibilität vor allem hinsichtlich nutzbarer Speicherkapazitäten voraus [17], wobei eine Bewertung der Netzdienlichkeit stark von der Wahl der Systemgrenzen abhängig ist.

Erst durch eine Kombination von überall lokal verfügbaren Energiequellen, wie die Wärme aus der Umgebungsluft und die Solareinstrahlung, deren effiziente und geräuscharme Umwandlung in Strom und Nutzwärme, die verlustarme Speicherung zur saisonalen Entkoppelung von Angebot und Nachfrage (Latentspeicher für Umweltwärme, Batterie), dem Transport der Umweltwärme in Anergienetzen ohne thermische Verluste, dem Anheben auf Nutztemperaturniveau durch eine Wärmepumpe und eine möglichst effiziente Speicherung auf Nutztemperaturniveau zur Entkoppelung von Wärmeerzeugung und Verbrauch entsteht ein effizientes Gesamtsystem, welches auch im urbanen Raum einsetzbar ist.

Nach Auswahl und synergetischer Kombination der Einzelkomponenten zu einem unter ökonomischen und ökologischen Aspekten optimalen Gesamtsystem vervollständigt eine neu zu entwickelnde intelligente adaptive und prädiktive **Systemregelung** das Gesamtenergieversorgungskonzept zu einer flexiblen Komponente einer übergeordneten Versorgungsstrategie. Auf

der Wärmeseite ist bisher der witterungsgeführte Betrieb von Heizkreisen Stand der Technik, welcher auf Basis einer Heizkennlinie, der aktuellen Außentemperatur und der gewünschten Raumtemperatur eine benötigte Vorlauftemperatur bestimmt. Ähnliches gilt für Solarregler, welche meist auf Basis von Temperaturdifferenzen die Umwälzpumpe des Solarkreises der Anlage ein- und ausschalten. Im Zuge einer Marktrecherche bzgl. Regelungen von kombinierten Heizungs- und Solarthermieanlagen bzw. sogenannten multifunktionalen Reglern [18] zeigte sich, dass jeder Hersteller sein eigenes Bedienkonzept mit entsprechenden Assistententools zur Installation und Inbetriebnahme hat.

Regler für das gesamte Energiemanagement des Gebäudes, d. h. die Regelung sämtlicher im Gebäude vorhandenen elektrischen und thermischen Energieerzeugungsanlagen wie z.B. PV- und Solarthermieanlagen, Heizkessel und Kraft-Wärme-Kopplungsanlagen sowie der elektrischen und thermischen Verbraucher und im Gebäude vorhandener Energiespeicher sind bisher nicht am Markt verfügbar. Wie z. B. die im Projekt SolSys [19] untersuchten Anlagenkonzepte zeigen, werden die für die Regelung des Gesamtenergieversorgungssystems notwendigen Funktionen bisher durch die Kombination mehrerer einzelnen Regelungen realisiert. Im Gegensatz zum Einsatz einer Gesamtsystemregelung ist dies nicht nur mit höheren Kosten und einem höheren Aufwand verbunden, sondern ermöglicht auch keine vollständige Ausschöpfung der vorhandenen Energieeinsparungspotentiale die entsprechenden Studien [20] zufolge ca. 15 – 40 % betragen.

Insbesondere für eine effiziente und weitgehend auf regenerativen Energien basierende Versorgung von Quartieren sind solche „Gesamtsystemregler“ jedoch zwingend notwendig und werden daher im vorliegenden Projekt in einem gesonderten Arbeitspaket entwickelt.

Im Hinblick auf die von den deutschen Projektpartnern zu entwickelnden Gesamtenergieversorgungssysteme für Quartiere auf der Basis von Anergienetzen, Latentspeichern und Wärmepumpen ist zu berücksichtigen, dass es sich bei dem Gesamtenergieversorgungssystem nie um ein standardisiertes Serienprodukt handeln wird, da immer eine spezifische Anpassung an die Anforderungen des individuellen Quartiers notwendig ist. Es besteht daher eine große Diskrepanz zwischen Serienprodukten, die in großer Stückzahl gefertigt und ohne wesentliche Änderung in Kleinanlagen eingesetzt werden und den in dem hier vorgeschlagenen Forschungsvorhaben zu entwickelnden Lösungen für größere, multivalente Anlagen zur Gesamtenergieversorgung von Quartieren.

Während bei Kleinanlagen aus wirtschaftlichen Gründen oft ein enormes Potential an Energieeffizienz durch den Einsatz standardisierter Anlagenkonzepte verschenkt wird, ist bei Konzepten zur Gesamtenergieversorgung von Quartieren aufgrund der viel größeren, bereitzustellenden Energiemengen und damit auch der involvierten Finanzvolumina eine individuelle Anpassung der Gesamtenergieversorgungskonzepte wirtschaftlich darstellbar. Unter diesem Aspekt ist es wichtig, in dem hier vorgeschlagenen Forschungsvorhaben eine Methodik zur individuellen Konfiguration ökonomisch und ökologisch optimaler Gesamtenergieversorgungssysteme zu entwickeln.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Für das Projektvorhaben wurden gezielt die Kompetenzen von führenden Forschungsinstituten und Industriepartnern aus Deutschland und Österreich zu einem bilateralen, kooperativen Konsortium gebündelt, wobei die Finanzierung der deutschen und österreichischen Projektpartner jeweils national erfolgte.

Für eine effiziente und strukturierte Bearbeitung der einzelnen wissenschaftlichen und technischen Fragestellungen wurde das Gesamtvorhaben in insgesamt 6 Arbeitspakete (AP) untergliedert.

Die folgende Abbildung 1-1 zeigt die Struktur der Arbeitspakete, welche die enge Kooperation zwischen den Partnern widerspiegelt. In AP2 und AP3 werden die Komponenten Energienetze, Latentspeicher, vakuumwärmegedämmter Wasserspeicher, Sorptionskollektor und Hybridkollektor entwickelt und Funktionsmuster getestet. In AP4 werden Strom- und Wärmeversorgungskonzepte für Geschosswohnbauten definiert, simuliert und auf Komponentenebene optimiert. In AP5 wird die intelligente adaptive und prädiktive Regelung des Gesamtsystems entwickelt und hinsichtlich unterschiedlicher Szenarien (wirtschaftlich, ökologisch, Netzentlastung, etc.) optimiert. AP6 und AP1 umschließen thematisch die anderen Arbeitspakete. Dort werden die interne und externe Kommunikation sowie die Übertragbarkeit auf andere Anwendungsfälle abgehandelt.

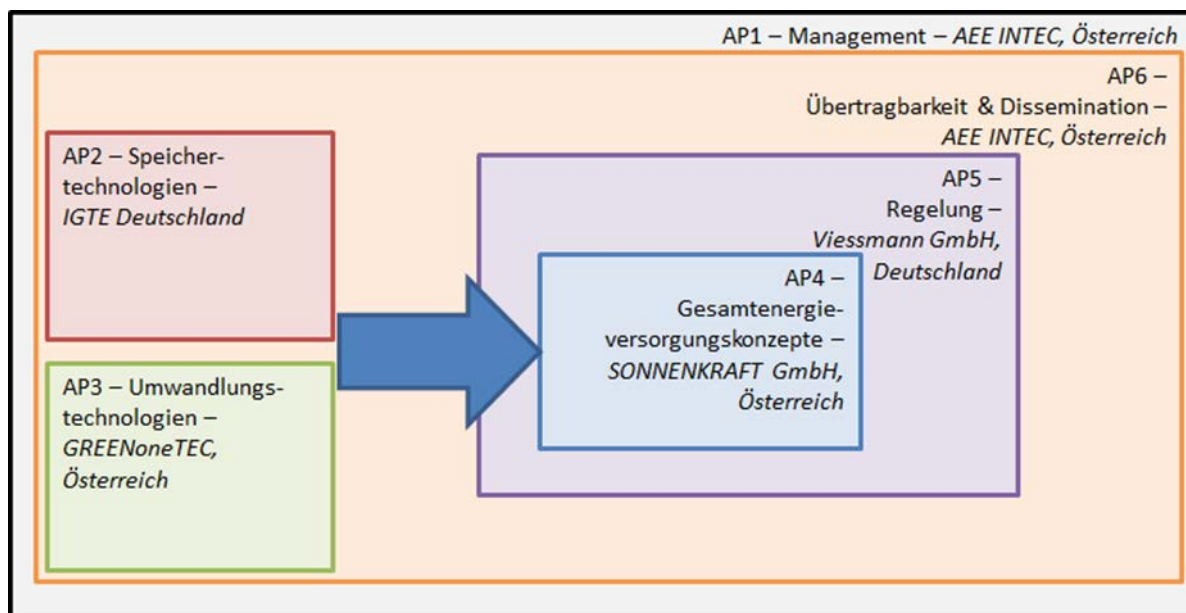


Abbildung 1-1: Struktur der Arbeitspakete im Projekt Sol4City

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben mehreren Veröffentlichungen auf einschlägigen Konferenzen erfolgte ein Austausch der Forschungsergebnisse aus dem Projekt Sol4City auch durch die führende Mitarbeit des IGTE der IEA SHC Task 66.

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IGTE arbeiteten in der Projektlaufzeit maßgeblich in den folgenden Subtasks mit:

- In der Subtask A bei der Definition von Bewertungsgrößen und Referenzgebäuden,
- in der Subtask C bei der Definition von ökonomischen und ökologischen Energieversorgungskonzepten mit hohen solaren Deckungsanteilen für den Gebäudebestand, Neubauquartiere und Kommunen,
- in der Subtask D im Hinblick auf die Beschreibung aktueller und zukünftiger Technologien.

Zudem haben Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IGTE und der Fa. VCS während der Projektlaufzeit an mehreren Veranstaltungen des Forschungsnetzwerks „EnergieWendeBauen“ teilgenommen.

Regelmäßige bilaterale Projekttreffen und Statusmeetings mit den österreichischen Partnern ermöglichten einen wichtigen Wissenstransfer. Diese Meetings fanden aufgrund der Covid-Beschränkungen im Projektzeitraum teilweise online statt.

2. Thermische und elektrische Energiespeicher (AP2)

Dieses Kapitel ist den Arbeiten im Projekt gewidmet, die sich mit der Entwicklung, bzw. Weiterentwicklung oder Optimierung thermischer und elektrischer Energiespeicher beschäftigen. Aufseiten der thermischen Energiespeicher wurden unter anderem die Technologien Sorptionskollektoren und Sorptionswärmespeicher untersucht. Diese Arbeiten wurden ausschließlich von den österreichischen Projektpartnern durchgeführt und können entsprechend dem zugehörigen Abschlussbericht entnommen werden. Ebenso das Zusammenwirken von Bauteilaktivierung und Langzeitwärmespeicher, sowie die technische Systemeinbindung, Dimensionierung und Regelung elektrischer Speicher sowie deren Potential zur Netzentlastung.

Von den deutschen Projektpartnern wurden die folgenden Themen untersucht: Die Entwicklung, Umsetzung und Erprobung eines Konzepts für hocheffiziente Vakuumdämmung für Warmwasserspeicher wird in den Abschnitten 2.1 und 2.3 beschrieben, Abschnitt 2.6 widmet sich der Optimierung der Speichertechnologie der Latentspeicher, sowie der Entwicklung einer Sensorik zur Messung des Beladungszustandes.

2.1 Hocheffiziente Warmwasserspeicher mit Vakuumdämmung

Die Zielstellung dieser Arbeiten ist die Entwicklung eines für die gegebenen Randbedingungen optimierten Vakuumwärmedämmkonzepts für Warmwasserspeicher (WWS). Daraufhin sollte der Funktionsnachweis in Form eines erfolgreich geprüften Funktionsmusters erbracht werden. Dieser Funktionsnachweis ist in Kapitel 2.3 beschrieben.

Zunächst wurden unterschiedliche grundsätzliche Vakuumwärmedämmkonzepte für WWS recherchiert und bzgl. ihrer Umsetzbarkeit geprüft. Zudem wurden die Wärmedämmungen aller WWS, welche die Energieeffizienzklasse A (EEK A) nach EU-Verordnung Nr. 812/2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU erreichen bzgl. der Bestandteile der Wärmedämmung und anderen Eigenschaften klassifiziert. Zusätzlich wurde eine Marktanalyse durchgeführt, um das Marktpotenzial von WWS mit EEK A zu ermitteln.

Die Berechnungsgleichungen zur Einordnung der WWS in die unterschiedlichen EEK sind in Tabelle 2-1 aufgeführt.

Tabelle 2-1: Einteilung von WWS in die EEK A+ bis D gemäß EU-Verordnung Nr. 812/2013

EEK	Warmhalteverluste S in W
A+	$S < 5,5 + 3,16 \cdot V^{0,4}$
A	$5,5 + 3,16 \cdot V^{0,4} \leq S < 8,5 + 4,25 \cdot V^{0,4}$
B	$8,5 + 4,25 \cdot V^{0,4} \leq S < 12 + 5,93 \cdot V^{0,4}$
C	$12 + 5,93 \cdot V^{0,4} \leq S < 16,66 + 8,33 \cdot V^{0,4}$
D	$16,66 + 8,33 \cdot V^{0,4} \leq S < 21 + 10,33 \cdot V^{0,4}$

Auf Basis der Recherche, der Marktanalyse sowie der vorhandenen Ausstattung und Erfahrung von VCS wurde ein Anforderungskatalog für die neu zu entwickelnden Wärmedämmungen erstellt. Um unterschiedliche Wärmedämmungen schnell und vereinfacht auf Grundlage des Anforderungskatalogs zu prüfen und zu dimensionieren, wurde ein Simulationsmodell eines WWS mit Wärmedämmung im Programm COMSOL Multiphysics aufgebaut, mit welchem eine Prüfung der Warmhalteverluste nach DIN EN 12897:2020 und DIN EN 15332:2020 simuliert werden kann. Im Folgenden wurden die Untersuchungen auf die EN 12897 begrenzt, da sich für die Simulation und den Vergleich keine relevanten Unterschiede zur Messung nach EN 15332 ergeben.

Zudem wurden Materialuntersuchungen zur Bestimmung von Stoffwerten für das Simulationsmodell durchgeführt. Das Simulationsmodell wurde anhand von Prüfungen eines WWS mit unterschiedlichen Wärmedämmungen nach DIN EN 12897:2020 validiert. Es wurden die drei vielversprechendsten Wärmedämmungen vertieft für unterschiedliche Speichervolumina simuliert. Daraus wurden Funktionsmuster der zwei favorisierten Wärmedämmungen gefertigt und nach DIN EN 12897:2020 geprüft. Die Fertigung und die Speicherprüfung dienen dem oben beschriebenen Funktionsnachweis und werden in Kapitel 2.3 beschrieben.

2.1.1 Recherche von hocheffizienten Wärmedämmkonzepten für Warmwasserspeicher

2.1.1.1 Grundlegende hocheffiziente Wärmedämmkonzepte

Die thermische Effizienz der Wärmedämmung eines WWS bestimmt sich aus seiner Dämmwirkung bezogen auf die Dämmdicke und die Temperaturdifferenz des WWS zur Umgebung. Für Reinstoffe kann zur Quantifizierung dieser Effizienz die Wärmeleitfähigkeit (WLF) in $W/(m \cdot K)$ verwendet werden. Bei porösen Wärmedämmstoffen tritt neben Wärmeleitung auch Wärmestrahlung innerhalb der Poren auf. Daher spricht man hierbei von der effektiven WLF. Bei einer aus mehreren Dämmelementen zusammengesetzten Wärmedämmung muss dessen Dämmwirkung über die Wärmeverlustrate eines Speichers mit der entsprechenden Wärmedämmung bestimmt werden. Die Wärmedämmungen mit der höchsten Effizienz sind Vaku-umwärmedämmungen. Bei diesen wird der Gasdruck innerhalb der Wärmedämmung herabgesetzt, um einen möglichst großen Anteil der Wärmeleitung durch das Gas zu unterbinden. Konventionelle Wärmedämmstoffe sind porös und schließen Gas in kleinen Poren ein, um eine Konvektion des Gases zu verhindern. Konvektion ist ein Wärmetransportmechanismus, der zu hohen Wärmeverlusten führt. Ohne Konvektion kann eine Wärmedämmung die vergleichsweise niedrige WLF des Gases ausnutzen. Die Wärmetransportmechanismen in konventionellen Wärmedämmstoffen sind:

- Wärmeleitung durch die Feststoffphase
- Wärmeleitung durch die Gasphase
- Wärmestrahlung

In offenporigen Wärmedämmstoffen ist das Füllgas die atmosphärische Luft. In geschlossenzelligen Schäumen, wie beispielsweise Polyurethan-Hartschaum (PUR), kann während des Herstellungsprozesses ein Gas mit einer geringeren WLF als Luft in den Poren eingeschlossen werden. In PUR werden derzeit meist Pentane (iso-, cyclo-, ...) in einer Mischung mit CO₂ verwendet. Die Wärmeleitung durch die Gasphase sowie Kopplungseffekte von Feststoff- und Gaswärmeleitung sind bei Temperaturen zwischen 10 °C und 100 °C in der Regel für den weitaus größten Anteil des gesamten Wärmedurchgangs durch einen konventionellen Wärmedämmstoff verantwortlich. Vakuumwärmeeisungen zielen darauf ab, diesen Anteil des Wärmedurchgangs durch Evakuierung des Gases zu eliminieren. Daher erreichen Vakuumwärmeeisungen in der Regel ca. 4 bis 15-fach niedrigere WLFen als konventionelle Wärmeeisungen, abhängig vom Füllmaterial der Vakuumwärmeeisung, der Art des konventionellen Wärmeeisungsstoffs und der Temperatur, siehe Abbildung 2-1.

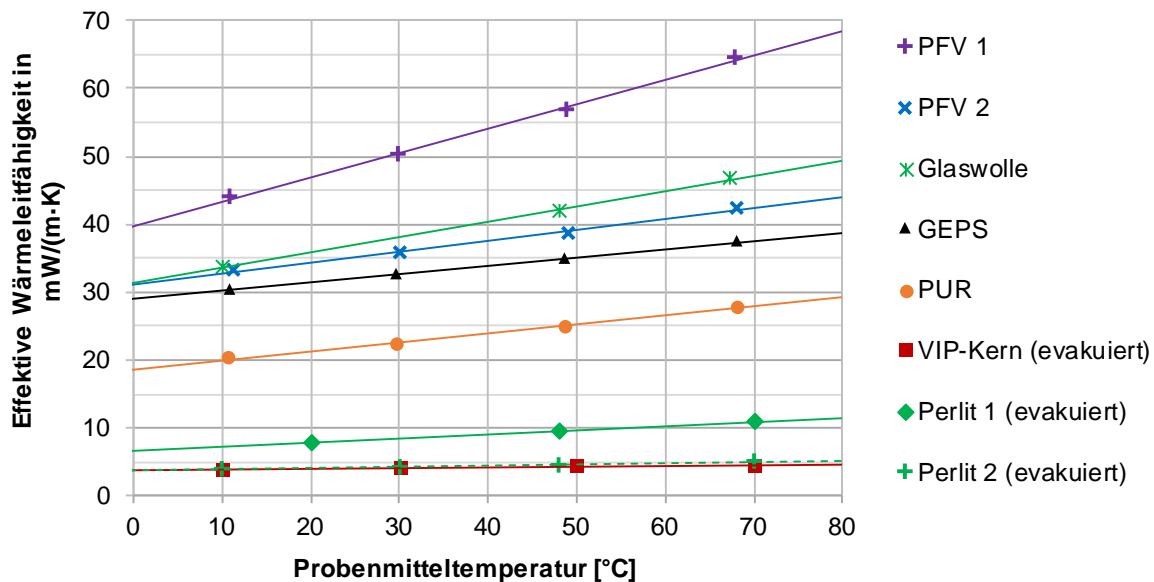


Abbildung 2-1: Effektive WLF über der Probenmitteltemperatur von an WWS häufig eingesetzten konventionellen Wärmeeisungsstoffs und Vakuumwärmeeisungen. Die Geraden sind Regressionslinien der Messpunkte. [21–24]. PFV: Polyesterfaservlies; GEPS: grafithaltiges expandiertes Polystyrol; VIP: Vakuumisulationspaneel

Es existieren im Wesentlichen zwei grundlegende Vakuumwärmeeisungskonzepte für WWS. Das erste Vakuumwärmeeisungskonzept besteht aus einer Kombination von konventionellen Wärmeeisungsstoffs wie beispielsweise Polyurethan-Hartschaum (PUR), Expandiertes Polystyrol (EPS) oder Polyesterfaservlies (PFV) mit Vakuumdämmpaneelen, die meist als Vakuumisulationspaneel (VIP) bezeichnet werden. Solche Komposit-Vakuumwärmeeisungen sind am Markt vorrangig für WWS mit Volumina bis zu 1 m³ verfügbar. VIPs erreichen ca. 4- bis 15-fach geringere effektive WLFen als die oben genannten konventionellen Wärmeeisungsstoffs, siehe Abbildung 2-1. Die Dämmstoffkosten liegen allerdings um ca. den Faktor 30 höher. In Abbildung 2-2 sind VIP dargestellt und in Abbildung 2-3 werden eine schematische

Abbildung sowie eine CAD-Zeichnung einer beispielhaften Zusammensetzung einer Komposit-Vakuumwärmedämmung gezeigt. In Abbildung 2-4 und Abbildung 2-5 sind weitere Umsetzungen dieses Wärmedämmkonzepts dargestellt.

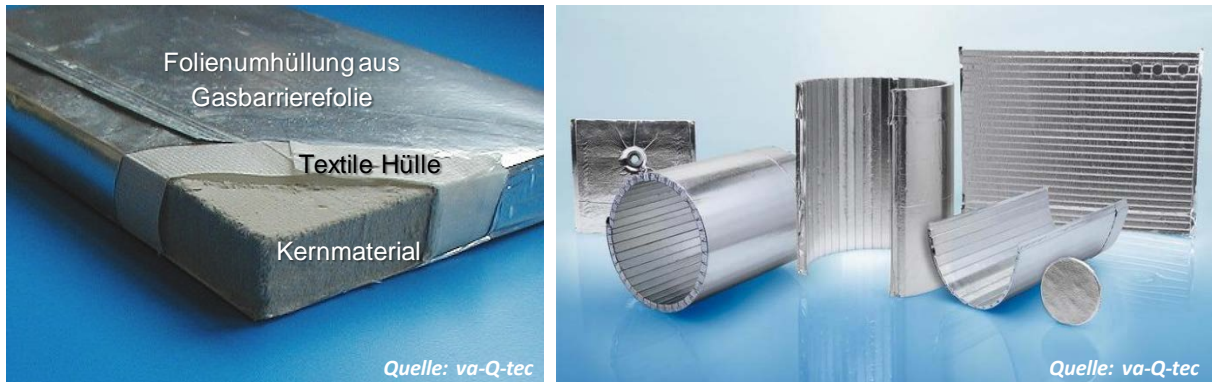


Abbildung 2-2: Vakuuminisationspaneele (VIP). Links: Aufbau eines VIP; rechts: unterschiedliche Ausführungen biegsamer und nicht-biegsamer VIP.

Die Wärmeverluste eines Speichers mit einer solchen Wärmedämmung sind u. a. abhängig vom Anteil der VIPs an der Wärmedämmung. VIPs werden darin üblicherweise eingesetzt, um eine bestimmte EEK zu erreichen, ohne eine bestimmte Gesamt-Dämmdicke der Wärmedämmung zu überschreiten.

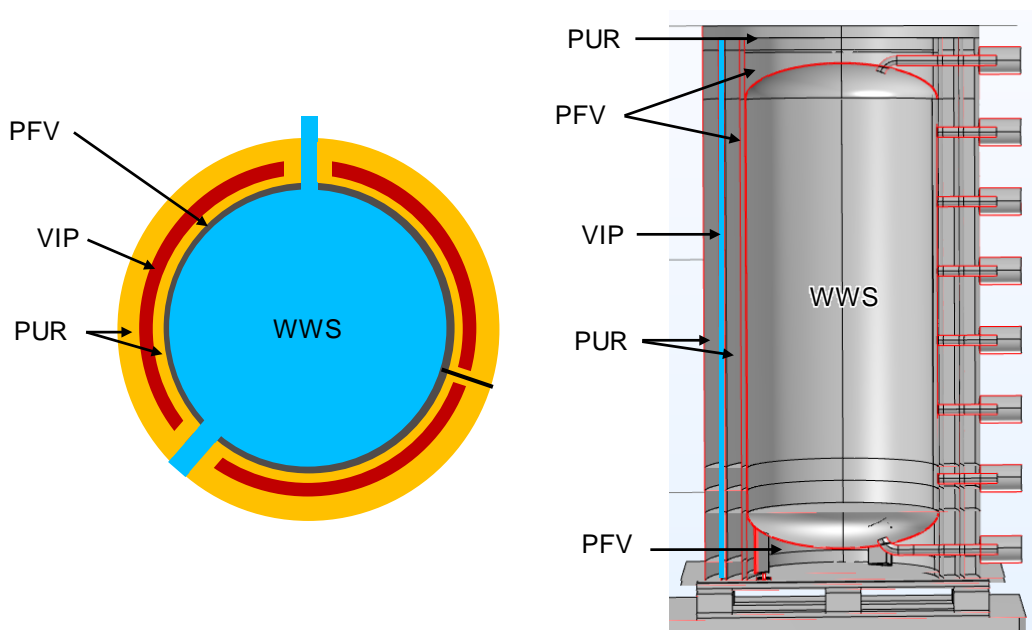


Abbildung 2-3: Komposit-Wärmedämmung aus PUR und VIPs. Links: schematische Schnittdarstellung des Querschnitts; rechts: Teilschnittdarstellung einer CAD-Zeichnung in Vorderansicht.

Die Komposit-Vakuumwärmedämmungen lassen sich außerdem unterteilen in abnehmbare und in fest am Speicher angebrachte Wärmedämmungen. Aus Gründen der Transportfähigkeit zum Aufstellort werden größere Speicher vorwiegend mit abnehmbaren Wärmedämmungen ausgestattet, kleinere Speicher hingegen überwiegend mit fest angebrachten Wärmedämmungen, welche einfacher und günstiger zu fertigen sind.

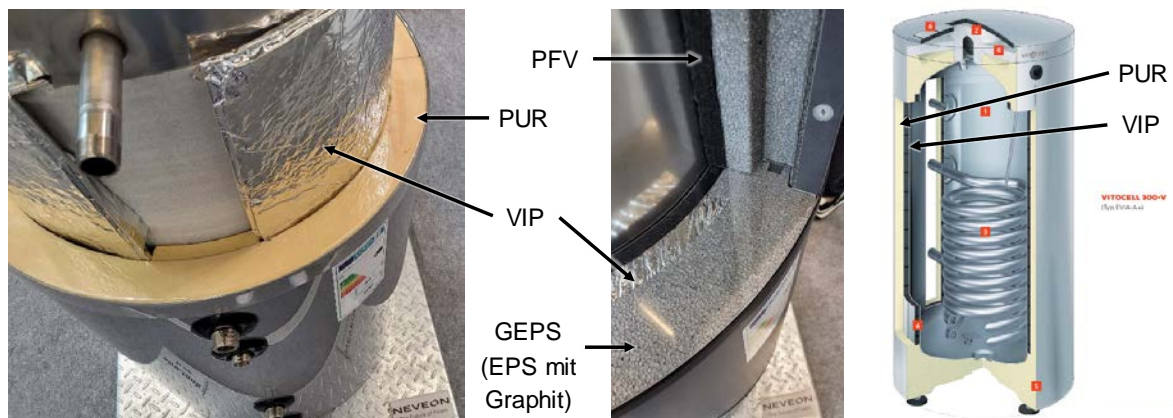


Abbildung 2-4: Komposit-Wärmedämmungen. Links: Ausstellungstück einer PUR-VIP-Wärmedämmung; Mitte: Ausstellungstück einer GEPS-VIP-Wärmedämmung; rechts: Schnittdarstellung des WWS „Vitocell 300-V Typ EVIA A+“ von VCS mit VIP und Speicher fest eingeschäumt in PUR [25], verändert durch den Autor.

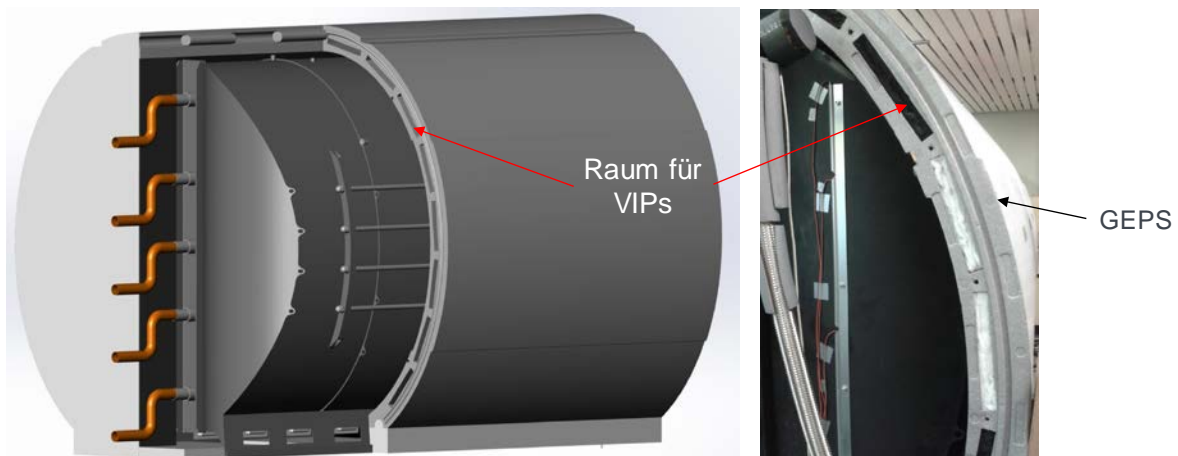


Abbildung 2-5: Abnehmbare Komposit-Wärmedämmung aus GEPS mit optional nachträglich anbringbaren VIPs [26].

Für das zweite grundlegende Vakuumwärmedämmkonzept werden doppelwandige Speicher benötigt. Der Spalt zwischen diesen Wänden wird üblicherweise mit einem Pulver befüllt und danach evakuiert. Beispielhafte Darstellungen dieser Speichertechnologie sind in Abbildung 2-6 zu sehen.

Anstelle der Pulverfüllung ist auch die Installation von sogenannten Multilayer-Wärmedämmungen im evakuierten Dämmraum zwischen den Wänden möglich, wie sie in der Vergangenheit überwiegend für Tieftemperaturtanks verwendet wurden [27, 28]. Bei der Multilayer-Wärmedämmung handelt es sich um infrarotreflektierende Folien, die meist durch textile Gewebe in Abstand gehalten werden. Außerdem existiert die Möglichkeit keine Füllstoffe zu verwenden und anstatt dessen infrarotreflektierende Oberflächen der Innenwände vorzusehen [29, 30]. Allerdings sind die letztgenannten beiden Optionen nach Kenntnis des Autors derzeit nicht marktverfügbar.

Doppelwandige WWS mit Vakuumwärmedämmung weisen um bis zu ca. 10-fach geringere Wärmeverlustraten auf als konventionell wärmegeämmte WWS mit gleichem Dämmvolumen,

gleicher Dämmdicke und bei gleichen Speicher- und Umgebungstemperaturen. Diese Speichertechnologie ist üblicherweise allerdings nur für Speicher mit Volumina $\geq 5 \text{ m}^3$ wirtschaftlich und ist für kleinere Speichervolumina daher nur sehr wenig verbreitet. Aufgrund des größeren Gesamtvolumens, der sehr hohen Dämmwirkung der Vakuumwärmedämmung, sowie aufgrund des vollständigen hermetischen Einschlusses der gesamten Wärmedämmung ist diese Speichertechnologie sehr gut geeignet für die Außenaufstellung. Dabei spart der Speicher wertvollen Innenraum ein und somit ist eine Nachrüstung von hohen Speicherkapazitäten auch für Bestandsgebäude möglich. [31, 32]

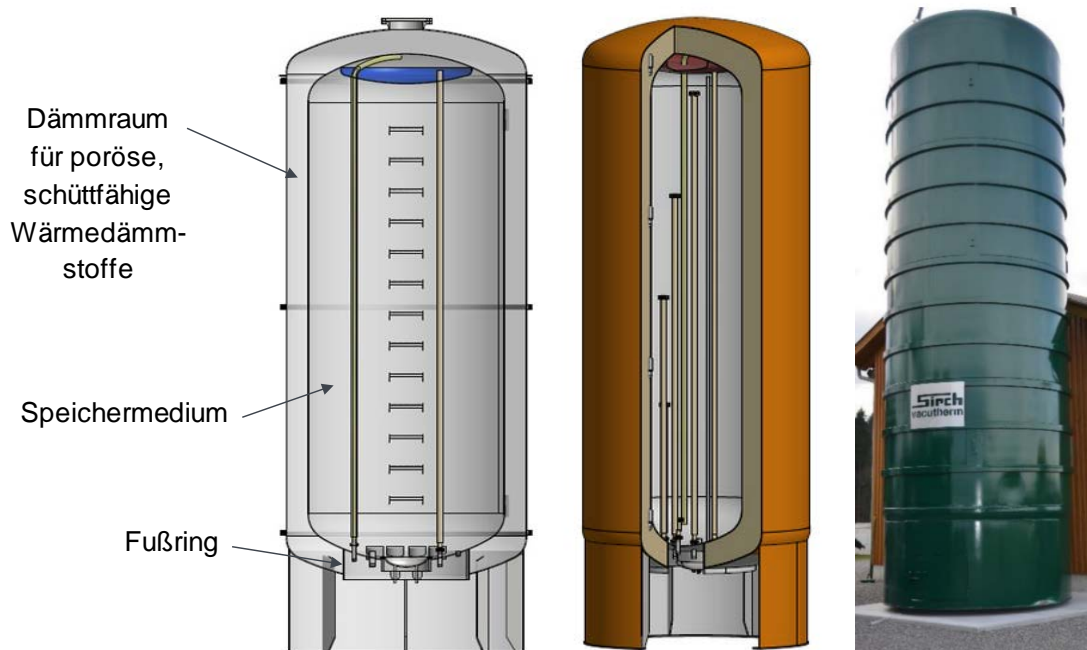


Abbildung 2-6: Doppelwandige vakuumwärmegedämmte WWS mit porösen schüttfähigen Wärmedämmstoffen im Dämmraum. Links und Mitte: CAD-Schnittdarstellungen; rechts: außenaufgestellter doppelwandiger vakuumwärmegedämmter WWS mit ca. 60 m^3 Speichervolumen. [31, 33]

Bei der Vakuumwärmedämmung von doppelwandigen WWS ist die erste Funktion der Füllmaterialien die Reduzierung der Wärmestrahlung. Füllmaterialien sind dabei in der Regel deutlich effektiver als infrarotreflektierende Beschichtungen der Innenseiten der Wände [31]. Die zweite Funktion besteht darin, denjenigen Vakuumdruck zu erhöhen, welcher notwendig ist, um signifikante Anteile der Gaswärmeleitung zu eliminieren. Je kleiner die mittlere Porengröße der Füllmaterialien bzw. der Abstand der Wände, in denen das Gas eingeschlossen ist, desto höher ist dieser Vakuumdruck. Dieser Effekt wird als Knudsen-Effekt oder Smoluchowski-Effekt bezeichnet, benannt nach den bekanntesten Erforschern dieses Phänomens. Höhere Vakuumdrücke sind leichter zu erreichen und aufrechtzuerhalten. Bei doppelwandigen WWS ist die Festigkeit der Wände hoch genug ist, um dem atmosphärischen Druck standzuhalten. Bei VIPs hingegen, wo dünne Folien den Vakuumdruck aufrechterhalten, hat das Füllmaterial auch die Funktion, die Form der Wärmedämmung durch seine Druckfestigkeit zu erhalten.

In doppelwandigen WWS werden üblicherweise expandierte Perlite als Füllmaterial verwendet. Bei VIP wird meist eine Mischung aus pyrogener Kieselsäure, Siliziumcarbid und Glas-

oder Kunststofffasern verwendet. VIPs haben in der Regel höhere Leckageraten als doppelwandige Stahltanks. Daher ist ein Füllmaterial mit einer geringeren mittleren Porengröße erforderlich. Dies wird durch die pyrogene Kieselsäure gewährleistet, die eine geringere mittlere Porengröße, aber auch höhere Kosten als expandierte Perlite bietet. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich die WLF der meisten VIPs aufgrund von Leckagen nach 25 Jahren ca. verdoppelt [34]. Im Gegensatz zu VIPs kann der Dämmraum von doppelwandigen Tanks erneut evakuiert werden, wenn ein signifikanter Anstieg des Gasdrucks und der Wärmeverluste festgestellt wird.

Neben den oben genannten zwei grundlegenden Vakuumwärmedämmkonzepten, existiert noch ein weiteres, sogenanntes Folien-Dämmkonzept, welches vom IGTE in der Vergangenheit erarbeitet wurde, aber bisher noch nicht zur Umsetzung kam [31]. Dabei handelt es sich um Dämmmatten am Speicher, welche von einer fest am Speicher angebrachte gasdichte Folie eingeschlossen werden, siehe Abbildung 2-7.



Abbildung 2-7: Folien-Dämmkonzept. Links: WWS umhüllt mit Aerogel-Dämmmatten; rechts WWS und Aerogel-Dämmmatten von luftdicht angebrachter Aluminiumverbundfolie umhüllt und evakuiert. Speicheranschluss verlaufen durch den Speicherboden. [31]

Dabei besteht einerseits die Möglichkeit den von der Folie eingeschlossenen Dämmraum zu evakuieren. Dafür sollten Matten mit hoher Druckfestigkeit und geringer mittlerer Porengröße eingesetzt werden. Das können Fasermatten mit eingebettetem Aerogelpulver sein, wie beispielsweise das Produkt Spaceloft vom Hersteller Aspen Aerogels. Andererseits kann der Dämmraum mit einem Gas mit geringerer WLF als Luft geflutet werden, wie beispielsweise dem Edelgas Krypton. Dafür können kostengünstigere konventionelle Polyesterfaservlies-Dämmmatten eingesetzt werden.

2.1.1.2 Warmwasserspeicher mit EEK⁴ A oder A+

Das Ziel innerhalb des Projekts Sol4City war es, eine möglichst kostengünstige Wärmedämmung für WWS zu entwickeln, welche auch nach 25 Jahren Betriebsdauer noch die EEK A oder A+ nach der EU-Verordnung Nr. 812/2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU erreichen sollen. Zuvor wurden diejenigen Wärmedämmkonzepte identifiziert und analysiert, welche bereits marktverfügbar sind und die EEK A oder A+ erreichen.

Über die Plattform „EPREL – Europäische Produktdatenbank für die Energieverbrauchskennzeichnung“ der EU [35] können sämtliche WWS, welche die EEK A oder A+ erreicht haben abgerufen werden. Für diese Speicher konnten für 153 Wärmedämmungen Informationen zum Wärmedämmkonzept und den eingesetzten Materialien gewonnen werden.

Es zeigte sich, dass in sämtlichen Fällen das oben beschriebene Prinzip der Komposit-Wärmedämmungen zum Einsatz kam, wobei in 61 % der Fälle auf VIPs verzichtet werden konnte. Die wesentlichsten Merkmale dieser Wärmedämmungen werden im Folgenden gezeigt und analysiert.

In Abbildung 2-8 links zeigt sich, dass nur 21 und damit nur 13,7 % der 153 WWS mit EEK A oder A+ ein Speichervolumen > 500 Liter besitzt und nur einer der Speicher ein Speichervolumen > 1.000 L aufweist. Das kann u. a. darauf zurückgeführt werden, dass die Angabe einer EEK nach der EU-Verordnung Nr. 812/2013 nur für Speicher ≤ 500 L vorgeschrieben ist. Zudem steigt mit größeren Speichervolumina der speichervolumen- und speicheroberflächen-spezifische Dämmaufwand zur Erreichung der EEK A oder A+ stark an. Dies zeigt sich u. a. deutlich an Abbildung 2-9, welche weiter unten aufgeführt und analysiert wird.

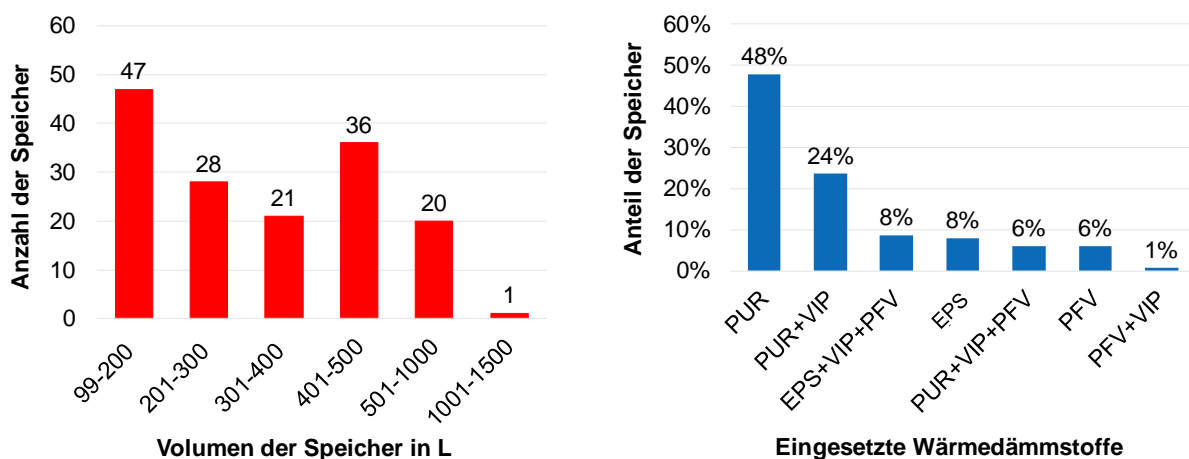


Abbildung 2-8: Links: Volumina der 153 recherchierten WWS mit EEK A oder A+; rechts: eingesetzte Wärmedämmstoffe der recherchierten WWS

Wie aus Abbildung 2-8 rechts hervorgeht, ist PUR der bei weitem am häufigsten eingesetzte Wärmedämmstoff für WWS mit EEK A oder A+. Zudem werden als weitere konventionelle Wärmedämmstoffe EPS (inklusive GEPS) und PFV eingesetzt, häufig in Kombination mit VIP.

⁴ Nach EU-Verordnung Nr. 812/2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU. In den Kapiteln 2.1 und 2.3 dieses Dokuments beziehen sich sämtliche genannten EEK auf diese Verordnung

Abbildung 2-9 zeigt zum einen, dass 39 % der Wärmedämmungen der betrachteten WWS VIPs enthalten. Zudem wird anhand des Diagramms deutlich, dass insbesondere WWS mit Speichervolumina > 500 L VIPs benötigen, wohingegen insbesondere WWS mit Volumina ≤ 200 L vorwiegend ohne VIPs auskommen. Diese deutet auf den höheren notwendigen Dämmaufwand für diese Speichervolumina hin. Da VIPs deutlich teurer sind als alle übrigen verwendeten Wärmedämmstoffe, kann davon ausgegangen werden, dass die Speicherhersteller aus wirtschaftlichen Gründen, wenn möglich auf deren Einsatz verzichten.

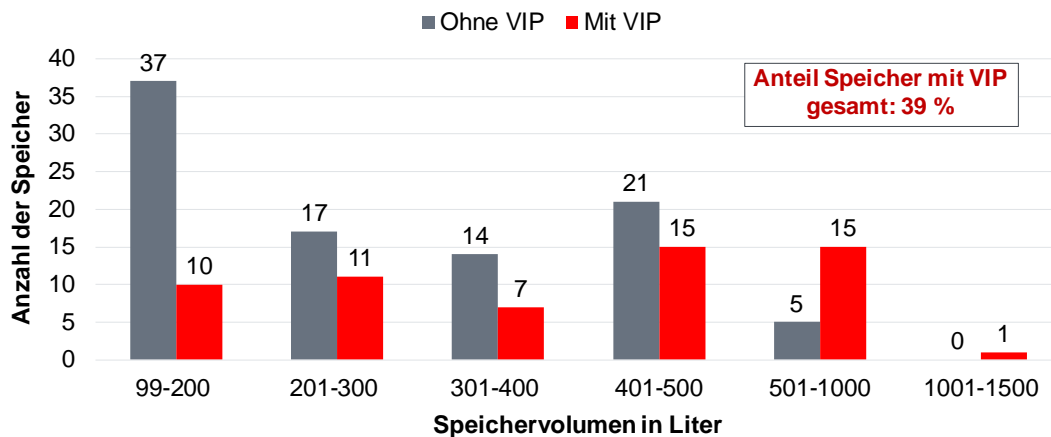


Abbildung 2-9: Anzahl und Anteil der WWS mit VIP in der Wärmedämmung, aufgeteilt nach Speichervolumina

In Abbildung 2-10 ist der Anteil der fest angebrachten und abnehmbaren Wärmedämmungen aufgeführt. Darin zeigt sich, dass Speicher mit größeren Volumina häufiger über abnehmbare Wärmedämmungen verfügen. Dies ist erwartbar, da mit größeren Speichervolumina entsprechend die Abmessungen der WWS ansteigen und somit ein Speichertransport samt Wärmedämmung in ein Gebäude an die Grenzen der Türabmessungen kommt.

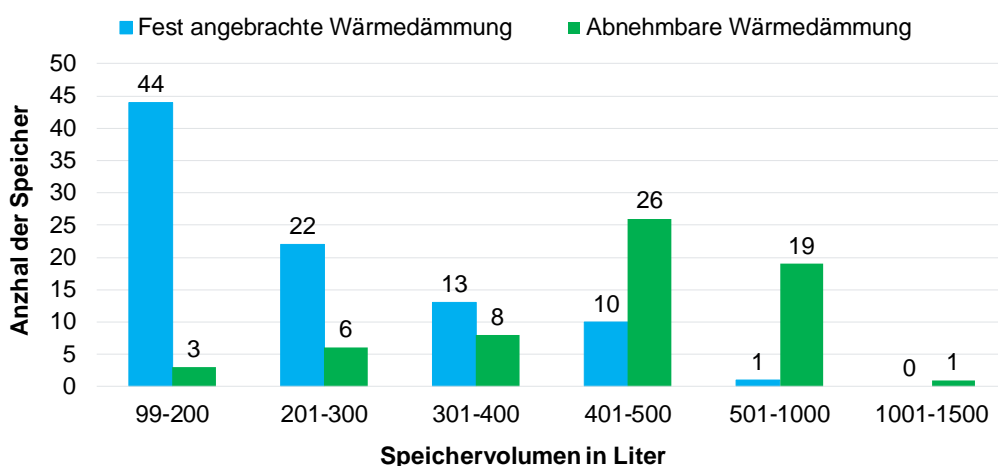


Abbildung 2-10: Anzahl der WWS mit fest angebrachter und abnehmbarer Wärmedämmung, aufgeteilt nach Speichervolumina

Abnehmbare Wärmedämmungen sind in der Regel aufwendiger zu fertigen und in der Anbringung als fest an den Speicher angeschäumte Wärmedämmungen, die zumeist aus PUR be-

stehen. Noch aufwendiger ist die Fertigung und/oder Installation von abnehmbaren Wärmedämmungen mit VIP. Diese werden in 61,7 % der 63 abnehmbaren Wärmedämmungen eingesetzt und sogar bereits in für Speichervolumina < 400 Liter, wie Abbildung 2-11 zeigt.

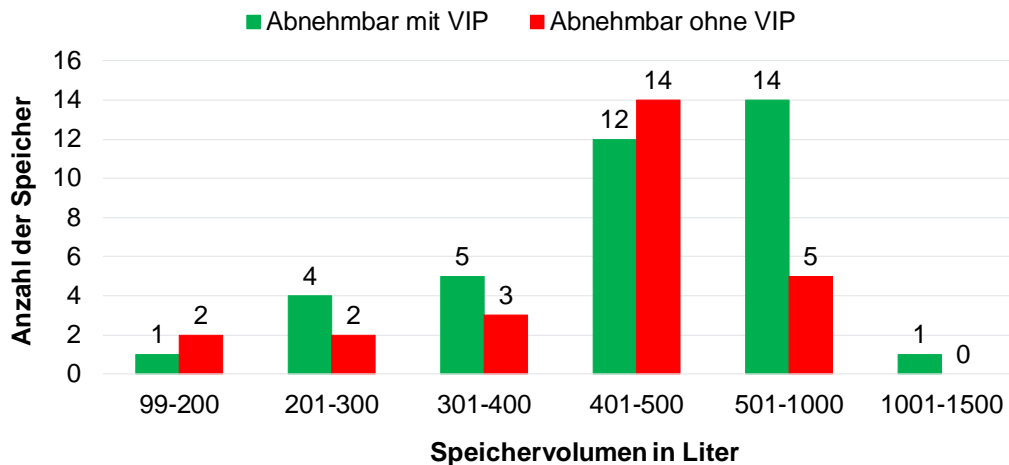


Abbildung 2-11: Anzahl der abnehmbaren Wärmedämmungen mit und ohne VIP, aufgeteilt nach Speichervolumina

Da für die im Projekt Sol4City entwickelten Wärmeversorgungskonzepte insbesondere WWS mit Speichervolumina ≥ 400 Liter benötigt werden, sind hierfür vorwiegend abnehmbare Wärmedämmungen notwendig.

2.1.2 Marktanalyse für Warmwasserspeicher mit EEK A

Zu Beginn des Vorhabens lag der Marktanteil für Warmwasserspeicher der Effizienzklasse A und A+ etwa bei 10 %. Dieser Wert hat sich bis zum Abschluss des Vorhabens 2024 nicht nennenswert verändert. Auch beim Angebot für diese Speicher auf der Webseite der EPREL (Europäische Produktdatenbank für die Energieverbrauchskennzeichnung)⁵ ist ein gleichbleibender Anteil zu beobachten. 2024 sind rund 680 Produkte der Energieeffizienzklasse A oder A+ verfügbar von insgesamt knapp 6000 Produkten, was einem Anteil von 11 % entspricht. Mit Beginn des Vorhabens wurde ein Anforderungskatalog für größere Speicher entwickelt (siehe folgendes Kapitel). Eine intern bestimmte Kostengrenze wurde aus der Marktanalyse festgelegt.

2.1.3 Anforderungskatalog für die neu zu entwickelnden Wärmedämmungen

Auf Basis der Recherchen und der Marktanalyse für WWS mit EEK A wurde ein Anforderungskatalog für die neu zu entwickelnden Wärmedämmungen und die dazugehörigen WWS erstellt, dessen Inhalt in Tabelle 2-2 aufgeführt ist.

Tabelle 2-2: Anforderungskatalog für die neu zu entwickelnde Wärmedämmung für WWS

⁵ <https://eprel.ec.europa.eu/screen/product/hotwaterstoragetanks>

F⁶/W⁷	Nr.	Bereich	Mindestvorgabe	Optimum
	1	Speichergröße		
F	1.1	Maximales Speichervolumen	1000 L	2000 L
F	1.2	Minimales Speichervolumen	600 L	400 L
F	1.3	Maximale Speicherhöhe mit Wärmedämmung	2,4 m	2,1 m
F	1.4	Maximaler Durchmesser ohne Wärmedämmung	1,1 m	0,79
W	1.5	Maximaler Durchmesser mit Wärmedämmung	keine Vorgabe	1,1 m
W	1.6	Maximale Dämmdicke am Mantel	17 cm	15 cm
W	1.7	Anschlussdimensionen geeignet für Volumenströme bis (Schichtung!)	20 m ³ /h	50 m ³ /h
W	1.8	Anschlussdurchmesser	keine Vorgabe	2"
	2	Funktionalität		
F	2.1	Maximaltemperatur des Speichermediums	80 °C	100 °C
F	2.2	Anzahl der Anschlüsse	4	8
F	2.3	Anzahl der internen Wärmeübertrager	0	2
W	2.4	Anzahl der Teile, aus welchen die Mantel-Wärmedämmung besteht	keine Vorgabe	2
F	2.5	Anschlussmöglichkeit für Frischwasserstationen	1	4
W	2.6	Zugänglichkeit der Anschlüsse und Dichtungen	wartbar	Einsehbar
F	2.7	Druckfestigkeit	3 bar	10 bar
F	2.8	Speichertyp	Heizwasserpuffer	Trinkwasser
	3	Wärmeverluste		

⁶ Forderung

⁷ Wunsch

F⁶/W⁷	Nr.	Bereich	Mindestvorgabe	Optimum
F	3.1	Erreichung Energieeffizienzklasse	A	A+
F	3.2	Gewährleistung Energieeffizienzklasse A nach Gebrauchsdauer von	20 Jahre	50 Jahre
F	3.3	Prüfung der Energieeffizienzklasse gemäß	DIN EN 15332:2020 bzw. DIN EN 12897:2020	EN 12977-3
	5	Weitere Eigenschaften		
W	5.1.1	Brandschutzklasse DIN EN 13501-1	D-s1	A2-s1-d0
F	5.1.2	Brandschutzklasse DIN 4102-1	B2	B0
F	5.1.3	Brandschutzklasse NF P 92.507 NF EN ISO 11925-2-2013	M3	M0
W	5.2	Transportabmessungen der abnehmbaren Wärmedämmung	keine Vorgabe	1 x 2,5 x 0,3 m
W	5.3	Maximales Transportgewicht der Einzelstücke der abnehmbaren Wärmedämmung	keine Vorgabe	max. 25 kg
W	5.4	Kippmaß bei Aufstellung	2,5 m	2,4 m / 2,1 m
W	5.5	Deckenhöhe im Aufstellraum bei Montage	Speicherhöhe + 0,1 m	Speicherhöhe
F	5.6	Eingesetzte Materialien sind ROHS und REACH konform	Konformität erreicht	Konformität erreicht

2.1.4 Auswahl grundlegendes Wärmedämmkonzept

Vor dem Hintergrund der im Anforderungskatalog geforderten Kosten der Wärmedämmung, können doppelwandige vakuumwärmegedämmte WWS ausgeschlossen werden. Das in Kapitel 2.1.1.1 und Abbildung 2-7 ebenfalls vorgestellte Folien-Dämmkonzept ist nicht abnehmbar, was aber für Speichervolumina von 1.000 L und größer notwendig wäre. Alternativ wurde daher eine abnehmbare folieneingeschweißte PFV-Wärmedämmung mit Argon- und Krypton-Atmosphäre geprüft. Dafür wurden zunächst Wärmeleitfähigkeitsmessungen von PFV in Luft und in Argon-Atmosphäre in Anlehnung an DIN EN 12667:2001 durchgeführt. Zur Herstellung und Aufrechterhaltung der Argon-Atmosphäre wurden für den Messzeitraum ausreichend gasdichte Folienbehälter gefertigt, welche die PFV-Proben enthielten, siehe Abbildung 2-12.



Abbildung 2-12: PFV-Proben zur Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit in unterschiedlicher Gasatmosphäre. Links: Aufbau Probenbeutel; rechts Einbau der Probenbeutel in einer Zweiplattenapparatur zur Messung der effektiven WLF.

Für die Messung bei Argon-Atmosphäre wurden diese zunächst evakuiert und danach mit Argon geflutet. Die Messergebnisse sind in Abbildung 2-13 aufgeführt.

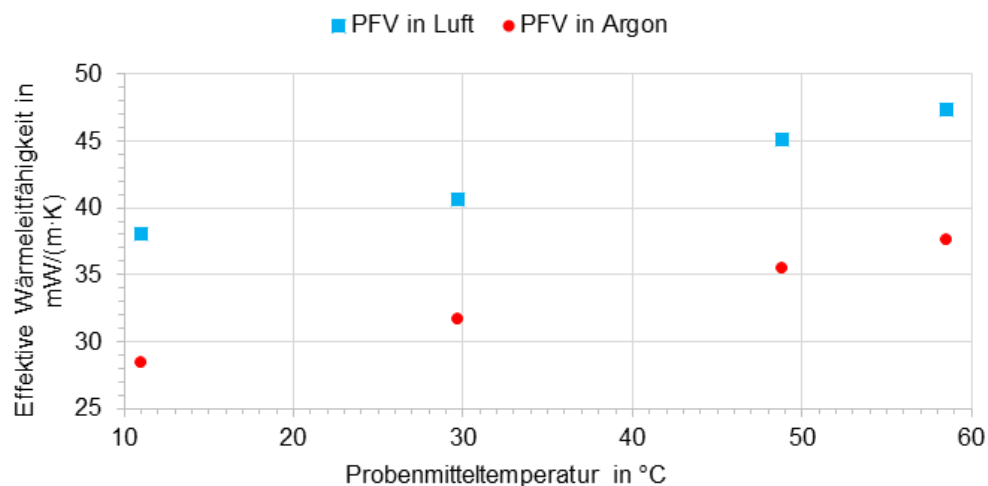


Abbildung 2-13: Gemessene effektive WLFen von PFV in Luft- und Argon-Atmosphäre über der Probenmitteltemperatur

Um die effektive WLF von PFV in Krypton-Atmosphäre abschätzen zu können, wurden die effektiven WLFen von PFV in Luft und Argon für die unterschiedlichen Messtemperaturen über der reinen Gas-WLF aufgetragen und diese Werte extrapoliert bis zur Gas-WLF von Krypton bei der entsprechenden Temperatur. Die Gas-WLFen sind [36] entnommen. Zum Vergleich wurden reale Messwerte eines expandierten Perlits in Luft-, Argon-, und Krypton-Atmosphäre [32] in dasselbe Diagramm aufgetragen, welches in Abbildung 2-14 dargestellt ist. Dabei zeigt sich, dass die Extrapolation für Perlit die gemessene effektive WLF um nur ca. 2 mW/(m·K) unterschätzt. Dieser Wert hängt allerdings von der Struktur des Wärmedämmstoffs ab, weshalb dieser nicht mit hoher Sicherheit auf die effektiven WLFen von PFV übertragen werden kann. Daher werden für PFV zur Abschätzung die extrapolierten Werte ohne entsprechende Korrektur verwendet.

In Abbildung 2-15 sind die effektiven WLFen von PFV in Kryptonatmosphäre auf der Basis der oben beschriebenen Berechnung den Messwerten von PFV in Argon- und Luft-Atmosphäre sowie von pentangeschäumtem PUR gegenübergestellt.

Dabei zeigt sich, dass nur in Krypton-Atmosphäre die WLF von PFV die von PUR leicht unterschreiten kann. Krypton hat allerdings üblicherweise Kosten von ca. 100 €/m³ [37]. Die Kombination PVF+Krypton ist dadurch teurer als PUR und das abnehmbare Folien-Dämmkonzept wurde nicht weiterverfolgt.

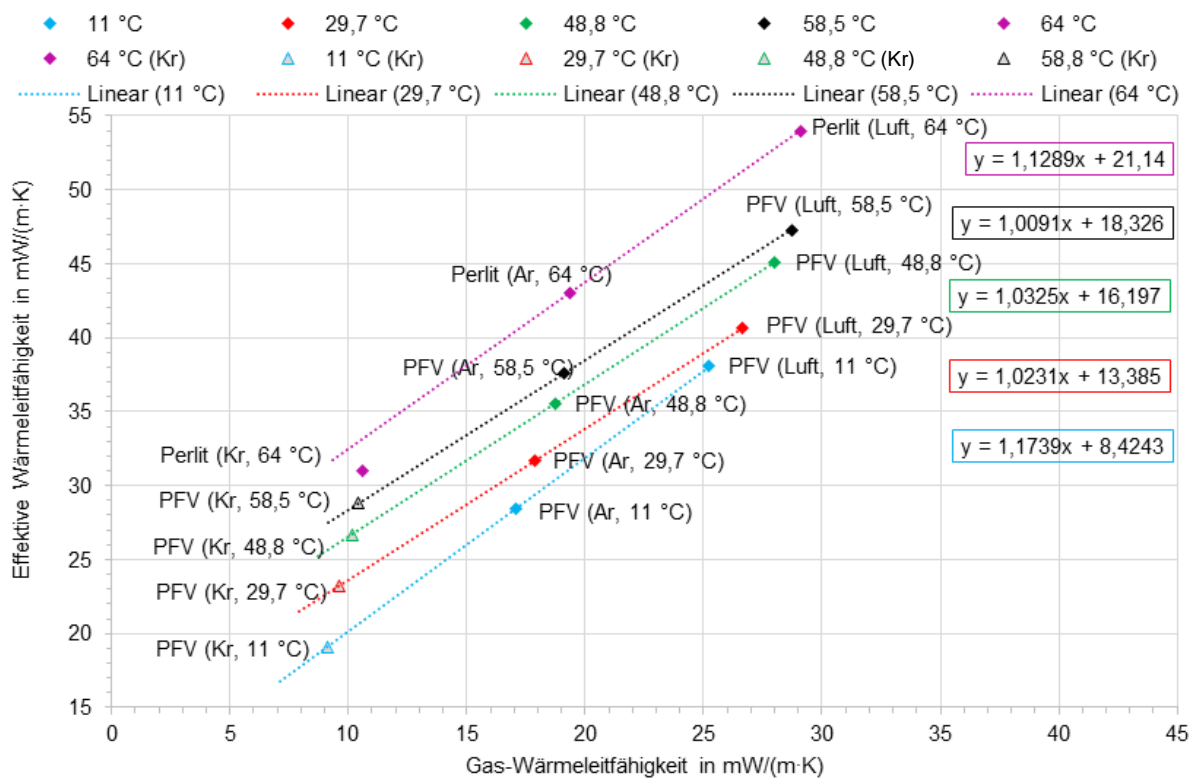


Abbildung 2-14: Extrapolation von Messwerten der effektiven WLF zur Abschätzung der effektiven WLF von PFV in Krypton-Atmosphäre. In farbigen Umrandungen die Gleichungen der gleichfarbigen Regressionsgeraden

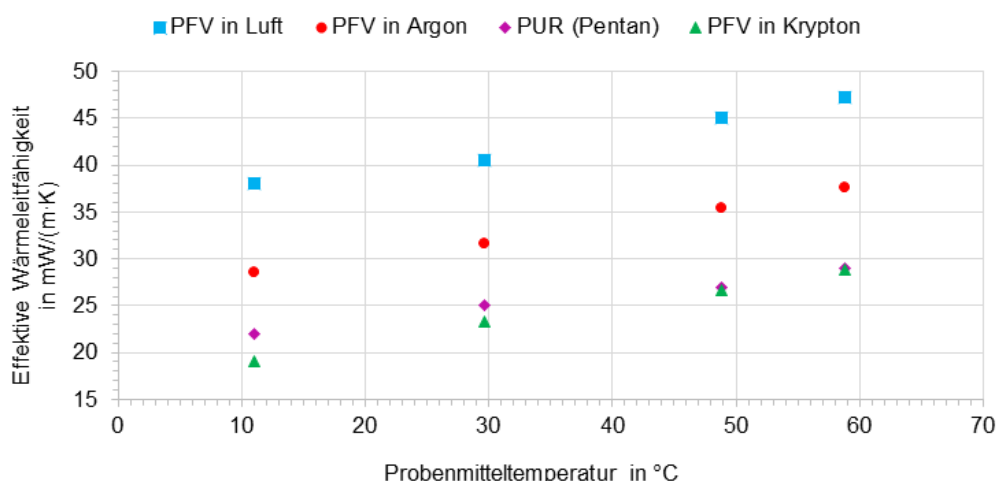


Abbildung 2-15: Effektive WLFen von PFV in Luft-, Argon- und Krypton-Atmosphäre sowie von pentangeschäumtem PUR

Auf Basis der Kostenvorgaben stellte sich lediglich die Komposit-Wärmedämmung als geeignet heraus, um eine Wirtschaftlichkeit der Wärmedämmung zu gewährleisten. Um die bzgl. thermischer Effektivität, Dämmstoffkosten, Herstelleraufwand und Handhabbarkeit geeignetste Wärmedämmung ermitteln zu können und eine Dimensionierung der Wärmedämmung vornehmen zu können wurde ein Simulationsmodell im Programm COMSOL Multiphysics aufgebaut, welches im folgenden Kapitel beschrieben wird.

2.1.5 Simulationsmodell

Das Simulationsmodell für WWS inklusive Wärmedämmung wurde im Programm COMSOL Multiphysics aufgebaut und simuliert. Darin wurden im beschriebenen Fall Wärmetransportmechanismen auf Basis der Finite Elemente Methode (FEM) berechnet. Simuliert wurden jeweils die Warmhalteverluste nach den in DIN EN 15332:2020 und DIN EN 12897:2020 beschriebenen Vorgaben. Das Modell wurde anhand von realen Messungen der Warmhalteverluste entsprechend DIN EN 12897:2020 validiert, wie in Kapitel 2.1.5.7 beschrieben wird.

2.1.5.1 Umgebungsbedingungen

Die Umgebungsbedingungen werden gemäß den Vorgaben aus DIN EN 15332:2020 und DIN EN 12897:2020 angenommen und voreingestellt. Als Umgebungstemperatur wird 20 °C eingestellt. Als Luftgeschwindigkeit wird der maximal zulässige Wert von 0,25 m/s eingestellt. Normgemäß wurde von einem Schutz gegen Sonneneinstrahlung und Niederschlag ausgegangen. Es wurden Speicher mit dem Volumina 500 L, 950 L, 1.500 L und 2.000 L modelliert und simuliert.

2.1.5.2 Geometrischer Aufbau des Simulationsmodells des WWS

Abbildung 2-16 zeigt den Aufbau des Simulationsmodells des WWS mit 950 L Wasservolumen unabhängig von der gewählten Wärmedämmung.

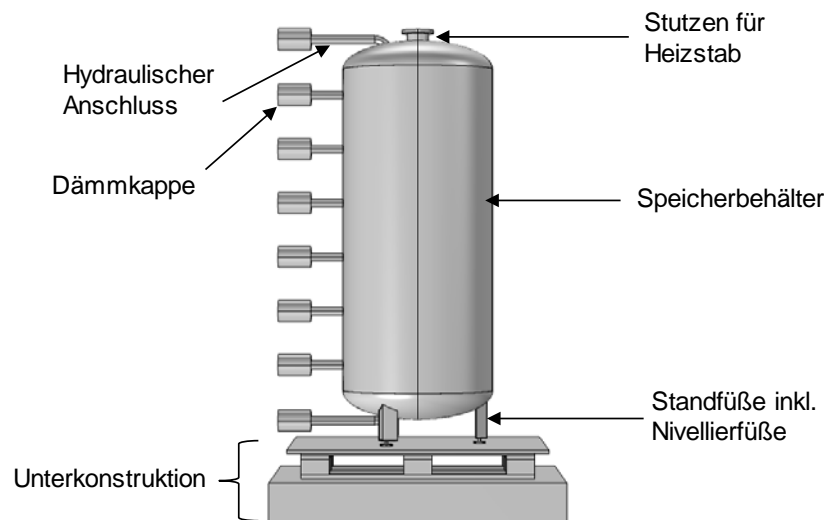


Abbildung 2-16: Geometrie des Simulationsmodell des WWS unabhängig von der gewählten Wärmedämmung

Das Modell basiert auf dem WWS Vitocell 340-M SVKC von VCS, der sowohl für die Validierungsmessungen als auch als Prototypspeicher zur Messung der Warmhalteverluste mit den entwickelten und gefertigten Wärmedämmungen diente, siehe Abbildung 2-29 und Abbildung 2-41.

Speicherbehälter

Der zu modellierende Speicherbehälter besteht beim Validierungs- und Prototypspeicher aus einem hohlzylindrischen Teil, welcher oben und unten mit einem abgeflachten Klöpperboden abschließt. Der hohlzylindrische Bereich wird auch im Modell als Hohlzylinder dargestellt, allerdings ohne die Schweißnähte und eventuelle Unrundheiten des Validierungsspeichers. Die geänderten Klöpperböden wären zu komplex in der Modellierung im Vergleich zu der geringen geometrischen Abweichung, welche erreicht wird, wenn diese durch einfache Geometrielemente modelliert werden. Aus diesem Grund wurden die abgeflachten Klöpperböden vereinfacht durch halbe Rotationsellipsoide dargestellt. Dabei entstehen nur geringe relative Abweichungen im Volumen von $< 1\%$, in der Höhe von $< 3\%$ und in der äußeren Oberfläche von $< 1\%$. Die Haupt-Abmaße der modellierten Speicherbehälter mit unterschiedlichen Speichervolumina sind in Tabelle 2-3 aufgeführt. Sowohl am realen Speicher als auch am Simulationsmodell wurde der Stutzen zur Einführung des Heizstabs für die Messung der Warmhalteverluste angebracht und Vorrichtungen zur Anbringung einer Frischwasserstation und von Klemmleisten für Temperatursensoren entfernt.

Stand- und Nivellierfüße

Der Stahlbehälter des Validierungsspeichers befindet sich auf drei angeschweißten Standfüßen. Durch eingeschraubte Nivellierfüße kann die Höhe des WWS angepasst werden, sodass die Wärmedämmung eben auf der Stellfläche aufliegt. Zum Schutz der Unterkonstruktion und um die Rutschgefahr zu verringern, befinden sich unterhalb der Nivellierfüße Kunststoffauflagen. Im Modell weichen sowohl Standfüße als auch Nivellierfüße nur gering von den Füßen

des Validierungsspeichers ab. Auf die Darstellung von Gewinden, Muttern und Schweißnähten wird verzichtet, da diese Elemente keine relevanten Auswirkungen auf die Warmhalteverluste haben, jedoch mit einem hohen Modellierungsaufwand verbunden sind. Die modellierten Stand- und Nivellierfüße sind in Abbildung 2-17 zu sehen.

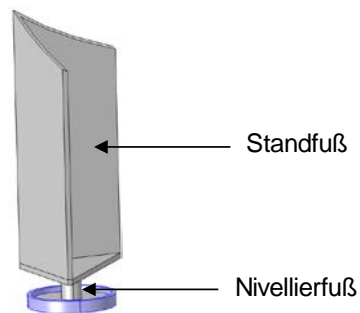


Abbildung 2-17: Modell des Stand- und Nivellierfußes des WWS

Hydraulische Anschlüsse, Messingkappen und Dämmkappen

Die hydraulischen Anschlüsse und die Muffe werden im Modell, anders als beim Validierungs- und Prototypspeicher, in einer senkrechten Reihe positioniert, um die Aufteilung der Gebiete für die anschließende Zuordnung der Materialeigenschaften zu vereinfachen. Diese Veränderung der Positionierung ist möglich, da im zylindrischen Bereich des Simulationsmodells nur der unterste Anschluss maximal 50 mm unterhalb h_{15} liegt. h_{15} ist die Höhe der zylindrischen Speicherwand, bei welcher vom untersten Punkt des Speicherbehälters betrachtet, 15 % des Speichervolumens erreicht sind, siehe Abbildung 2-27 in Kapitel 2.1.5.5. Über h_{15} , also in den oberen 85 % des Speichervolumens, hat das Speichermedium eine einheitliche Temperatur. Dadurch hat die genaue Positionierung der Anschlüsse in diesem Bereich keinen Einfluss auf die zu simulierenden Warmhalteverluste. Im zylindrischen Speicherbereich wird ein einheitlicher Abstand zwischen den Anschlüssen eingehalten. Bei den Modellen mit Speichervolumina von 500 L und 950 L werden, wie in Abbildung 2-18 links zu sehen, sechs Anschlüsse am zylindrischen Teil und jeweils ein Anschluss am Deckel und Boden angebracht. Davon unterscheiden sich die WWS mit 1500 L und 2000 L Speichervolumina. Bei diesen Speichergrößen werden in der Realität keine Anschlüsse am Speicherdeckel oder -boden angebracht. Deshalb werden, wie in Abbildung 2-18 rechts gezeigt, auch bei den entsprechenden Simulationsmodellen alle acht Anschlüsse im zylindrischen Bereich des Speichers angeordnet.

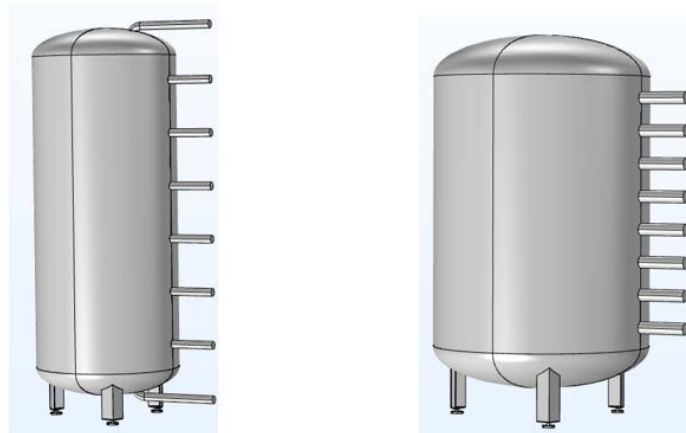


Abbildung 2-18: Links: WWS mit 950 L Speichervolumen; rechts: WWS mit 1500 L Speichervolumen

Die hydraulischen Anschlüsse werden als massive Bauteile mit einheitlicher WLF modelliert, siehe Kapitel 2.1.5.4. Die Modellierung von Schweißnähten und Gewinden wird vernachlässigt, da diese Elemente nur zu einer geringen Erhöhung der Simulationsgenauigkeit führen würden. Außerdem wird die Vereinfachung getroffen, dass die Länge und der Durchmesser aller Anschlüsse im zylindrischen Speicherbereich gleich sind. Für das Modell wird hierfür die gemittelte Länge und ca. der gemittelte Durchmesser aller Anschlüsse des Validierungs- und Prototypspeichers gewählt. Bei der Speicherprüfung werden die hydraulischen Anschlüsse mit Messingkappen oder Ventilen verschlossen. Die Verlängerung aller Anschlüsse durch diese Elemente wird gemittelt und zu der zuvor berechneten mittleren Länge der hydraulischen Anschlüsse addiert. Durch die Veränderung, dass alle Anschlüsse im zylindrischen Speicherbereich die gleichen Abmaße haben, muss nur ein Anschluss modelliert werden. Dieser kann anschließend vervielfacht und entsprechend angeordnet werden. Die Abmaße der modellierten hydraulischen Anschlüsse (mit Messingkappen) sind in Tabelle 2-3 aufgeführt. Anstatt jeden Anschluss in zwei Gebiete mit den Materialien Stahl und Messing aufzuteilen, wird dem gesamten untersten Anschluss im zylindrischen Speicherbereich das Material Messing zugewiesen. Damit wird der Messinganteil im Simulationsmodell überbewertet, was aufgrund der höheren WLF von Messing im Vergleich zu Stahl, eine konservative Annahme darstellt. Diese konservative Annahme wird angewendet, da eine Unterteilung der Anschlüsse in verschiedene Materialien aufgrund der gewichteten WLF (siehe Kapitel 2.1.5.4) sehr komplex wäre im Vergleich zur erreichbaren Erhöhung der Genauigkeit.

Die Dicke der Dämmkappen ist gemäß DIN EN 15332:2020 in Abhängigkeit vom Innendurchmesser der hydraulischen Anschlüsse gewählt. Die Länge entspricht der gemittelten Länge aller Dämmkappen, welche bei der Modellvalidierung verwendet wurden.

Unterkonstruktion

Die Nivellierfüße des WWS stehen zentriert auf einer 20 mm dicken Holzspanplatte, welche sich wiederum auf einer nach DIN EN 13698-1 genormten Europalette befindet. Der Boden wird durch eine 200 mm dicke Betonplatte modelliert, diese wird auf der Oberfläche mit einer konstanten Temperatur von 20 °C definiert, was der Umgebungstemperatur entspricht. Diese

Anordnung erfüllt die Anforderungen der Prüfnorm DIN EN 15332:2020 und ist in Abbildung 2-19 zu sehen.

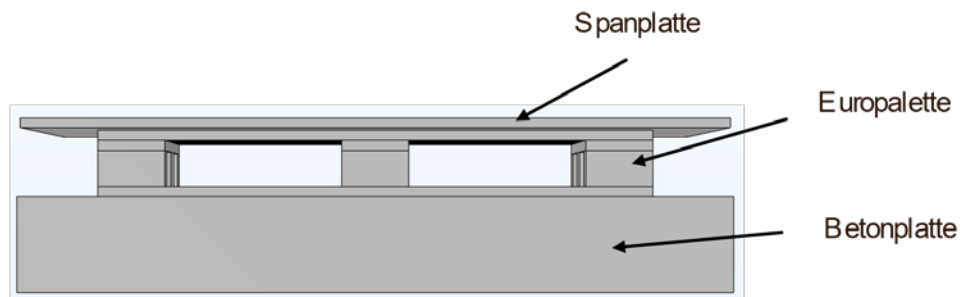


Abbildung 2-19: Modell der Unterkonstruktion des WWS

Wärmedämmung

Die Geometrie der Mantel-, Boden- und Deckeldämmung unterscheidet sich bei den einzelnen Wärmedämmungen und wird deshalb anhand der jeweiligen Simulationsmodelle in Kapitel 2.1.6 erläutert.

Zusammenfassung

In Tabelle 2-3 sind die Hauptabmessungen der vier modellierten WWS aufgeführt.

Tabelle 2-3: Hauptabmessungen der modellierten WWS mit Speichervolumina von 500 L, 950 L, 1500 L und 2000 L

Speichervolumen	500 L	950 L	1500 L	2000 L
Außendurchmesser	690 mm	790 mm	1100 mm	1100 mm
Höhe zylindrischer Speicherbereich	1206,7 mm	1699,5 mm	1365 mm	1845 mm
Gesamthöhe ohne Wärmedämmung (inkl. Stand- und Nivellierfüße)	1608 mm	2127 mm	1940 mm	2420 mm
Außendurchmesser Anschlüsse	1"	1¼"	2"	2"
Länge Anschlüsse im zylindrischen Speicherbereich	239,9 mm	239,9 mm	239,9 mm	239,9 mm

2.1.5.3 Materialeigenschaften der modellierten Wärmedämmstoffe

Den einzelnen modellierten Gebieten werden in der Simulationssoftware COMSOL Multiphysics Materialien zugeordnet. Hierfür werden entweder die in COMSOL Multiphysics voreingestellten oder neue, selbst definierte, Materialien verwendet. Da nur stationäre Speicherprüfungen simuliert werden, genügt es, die Materialien anhand ihrer WLFen und dem Emissionsgrad

zu definieren. Alterungsverhalten der Wärmedämmstoffe nach einer Betriebszeit von 25 Jahren werden bezüglich Veränderungen in der WLF berücksichtigt.

Im Rahmen dieses Projekts wurden WLF-Messungen der meisten verwendeten Wärmedämmstoffe mithilfe einer Zweiplattenapparatur (ZPA) in Anlehnung an DIN EN 12667 durchgeführt. Für andere Wärmedämmstoffe wurden Messwerte aus der Vergangenheit oder Literaturwerte verwendet.

Polyesterfaservlies (PFV)

In Abbildung 2-20 ist beispielhaft ein weißes PFV abgebildet:



Abbildung 2-20: PFV, weiß [38]

Im Rahmen des Projekts Sol4City wurden folgende PFV-Typen verwendet und simuliert:

- weißes Polyesterfaservlies geringer Dichte, welches in der Standard-Wärmedämmung des WWS Vitocell 340-M SVKC von VCS verwendet wird (PFV-LD-VI), Dichte im unkomprimierten Zustand: 14,82 kg/m³,
- graues Polyesterfaservlies geringer Dichte, welches als Teil einer GEPS-Manteldämmung der Wärmedämmung 1 von der Neveon Holding GmbH verwendet wurde (PFV-LD-Nev), Dichte im unkomprimierten Zustand: 18,4 kg/m³,
- graues Polyesterfaservlies geringer Dichte des Herstellers Sandler AG (PFV-LD-San), Dichte im unkomprimierten Zustand: 21,2 kg/m³,
- weißes Polyesterfaservlies hoher Dichte des Herstellers J.H. Ziegler GmbH (PFV-HD), Dichte im unkomprimierten Zustand: 40,6 kg/m³.

Die effektiven WLFen aller genannter PFV wurden im Rahmen des Projekts gemessen, siehe Tabelle 2-4. Da es insbesondere beim Einsatz von PFV als Konvektionsbremse am Inneren der Manteldämmung zur Komprimierung des Materials kommt, wurden sämtliche PFV geringer Dichte sowohl im unkomprimierten als auch im komprimierten Zustand gemessen. Beim PFV-LD-VI wurde die Dichte um den Faktor 1,2 erhöht, bei den anderen beiden PFV-LD um den Faktor 2.

Tabelle 2-4: WLFen der Polyesterfaservliese (PFV). Mit λ : (effektive) WLF und ϑ : Temperatur in °C

Wärmedämmstoff	Temperaturabhängige effektive WLF in mW/(m·K)
PFV-LD-VI	$\lambda_{PFV-LD-VI}(\vartheta) = 37,21 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,365 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} \cdot \vartheta$
PFV-LD-VI-K (komprimiert)	$\lambda_{PFV-LD-VI-K}(\vartheta) = 35,61 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,315 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
PFV-LD-Nev	$\lambda_{PFV-LD-Nev}(\vartheta) = 32,44 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,235 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
PFV-LD-Nev-K (komprimiert)	$\lambda_{PFV-LD-Nev-K}(\vartheta) = 28,88 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,169 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
PFV-LD-San	$\lambda_{PFV-LD-San}(\vartheta) = 30,54 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,181 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
PFV-LD-San-K (komprimiert)	$\lambda_{PFV-LD-San-K}(\vartheta) = 28,44 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,167 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
PFV-HD	$\lambda_{PFV-HD}(\vartheta) = 29,64 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,192 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$

Bei Analyse der Messwerte fällt auf, dass die Komprimierung der PFV jeweils zu einer Verringerung der effektiven WLF im Temperaturbereich ≥ 0 °C führt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit steigender Dichte die Extinktion der Wärmestrahlung zunimmt. Zwar steigt auch die Wärmeleitung über das Feststoffgerüst mit steigender Dichte, dieser Effekt fällt allerdings offenbar deutlich geringer aus.

Alterungsvorgänge sind bei PFV nicht relevant, da der Wärmedämmstoff durch die offenporige Struktur bereits zu Beginn kein Zellgas mit einer geringeren WLF als Umgebungsluft enthält. Deshalb finden keine Diffusionsvorgänge des Porengases statt und es kommt zu keiner signifikanten Änderung der WLF infolge einer Alterung.

Vakuumisolationspaneel (VIP), ungealtert

Der Aufbau und verschiedene Formen von VIP sind in Abbildung 2-2 dargestellt. Die metallbedampfte Folienumhüllung eines VIP hat eine deutlich höhere WLF als der Kern des VIP, weshalb sie als Wärmebrücke fungiert. Je geringer die VIP-Fläche orthogonal zur Wärmestromrichtung ist, desto höher ist der Anteil der Wärmebrücke und desto höher ist die effektive Gesamtwärmeleitfähigkeit. Die effektive WLF der ungealterten VIP wurde bestimmt auf Basis von Literaturwerte zum VIP-Kernmaterial Vacupor N des Herstellers Morgan Advanced Materials [23] und Bestimmungen von Randeckten von VIP durch [39]. Aus [39] wurde der Aufschlag von Randeckten für ein quadratisches VIP mit einer Kantenlänge von 500 mm und einer Dicke von 15 mm gewählt. Dieser beträgt 0,49 mW/(m·K). Dies entspricht einer konservativen Annahme, da die meisten in den Wärmedämmungen geplanten VIP eine deutlich größere Fläche besitzen.

Die im Simulationsmodell verwendete effektive WLF von ungealtertem VIP $\lambda_{VIP,0a}$ ergibt sich damit zu:

$$\lambda_{VIP,0a}(\vartheta) = 5,268 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,01 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta \quad (2-1)$$

Vakuumisolationspaneel (VIP), gealtert

Mit zunehmender Zeit steigt die effektive WLF eines VIP durch Feuchte- und Gaseintrag an. Um diese Alterungsvorgänge nach einer Dauer von 25 Jahren zu berücksichtigen, wurde die WLF des VIP auf Grundlage von [34] um zwei konstante Terme ergänzt. Diese betragen für den Feuchteeintrag 2,65 mW/(m·K) und für den Gaseintrag 1,14 mW/(m·K). Die temperaturabhängige effektive WLF eines VIP nach 25 Jahren $\lambda_{VIP,25a}(\vartheta)$ kann danach gemäß Gleichung (2-2) berechnet werden.

$$\lambda_{VIP,25a}(\vartheta) = 9,058 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,01 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta \quad (2-2)$$

Da in [34] die WLFen nur bei einer Probenmitteltemperatur betrachtet werden, fehlt eine Anpassung des temperaturabhängigen Terms. Dieser kann bei höherem Gasdruck und höherer Feuchtebelastung als höher angenommen werden. Somit handelt es sich dabei eher um eine optimistische Annahme. Auch fehlen in der Literatur aussagekräftige Untersuchungen zur Temperaturabhängigkeit der Foliendichtigkeit von VIP.

Kaschiertes VIP (va-Q-patch, VQP), ungealtert

Es wurde die effektive WLF des kaschierten VIP „va-Q-patch“ (VQP) des Herstellers va-Q-tec, siehe Abbildung 2-21, gemessen.



Abbildung 2-21: „va-Q-patch“ (VQP). Biegbares, in PE-Schaum kaschiertes VIP des Herstellers va-Q-tec.

Die Kaschierung besteht aus beidseitig aufgeklebten Schaumstoffbahnen aus Polyethylen (PE-Schaum) von jeweils 2 mm Dicke. Da sich die Dicke des PE-Schaum nicht mit der Dicke der VIP-Kerne ändert, ist die effektive WLF der VIP dickenabhängig. Um diese Dickenabhängigkeit zu bestimmen, wurde für den PE-Schaum die effektive WLF von PFV-LD-VI $\lambda_{PFV-LD-VI}(\vartheta)$ angenommen und mit Hilfe der Berechnung einer Reihenschaltung der Wärmewiderstände von VIP und PE-Schaum die effektive WLF des VIP bestimmt. Damit konnte wiederum mit Hilfe der Berechnung einer Reihenschaltung der Wärmewiderstände von VIP und PE-Schaum eine VIP-dickenabhängige effektive WLF der VQP berechnet werden. Diese ist für die relevanten Dicken in Tabelle 2-5 aufgelistet.

Tabelle 2-5: Temperaturabhängige effektive WLF von ungealtertem VQP in Abhängigkeit von der VIP-Dicke

VIP-Dicke in mm	Temperaturabhängige effektive WLF in mW/(m·K)
10	$\lambda_{VQP,0a,10}(\vartheta) = 6,380 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0423 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
15	$\lambda_{VQP,0a,15}(\vartheta) = 5,780 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0380 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
20	$\lambda_{VQP,0a,20}(\vartheta) = 5,471 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0358 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
25	$\lambda_{VQP,0a,25}(\vartheta) = 5,183 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0347 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
30	$\lambda_{VQP,0a,30}(\vartheta) = 5,074 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0338 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
35	$\lambda_{VQP,0a,35}(\vartheta) = 5,066 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0330 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$

Kaschiertes VIP (va-Q-patch, VQP), gealtert

Für gealtertes VQP werden zunächst auf die WLF des enthaltenden VIP die Zuschläge von 2,65 mW/(m·K) für den Feuchteintrag und 1,14 mW/(m·K) für den Gaseintrag aufaddiert (s. Abschnitt „Vakuuminisulationspaneel (VIP), gealtert“).

Tabelle 2-6: Temperaturabhängige effektive WLF von gealtertem VQP in Abhängigkeit von der VIP-Dicke

VIP-Dicke in mm	Temperaturabhängige effektive WLF in mW/(m·K)
10	$\lambda_{VQP,25a,10}(\vartheta) = 10,170 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0423 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
15	$\lambda_{VQP,25a,15}(\vartheta) = 9,570 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0380 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
20	$\lambda_{VQP,25a,20}(\vartheta) = 9,261 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0358 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
25	$\lambda_{VQP,25a,25}(\vartheta) = 8,973 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0347 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$
30	$\lambda_{VQP,25a,30}(\vartheta) = 8,864 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0338 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$

VIP-Dicke in mm	Temperaturabhängige effektive WLF in mW/(m·K)
35	$\lambda_{VQP,25a,35}(\vartheta) = 8,856 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,0330 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta$

Polyurethan-Hartschaum (PUR), ungealtert

PUR ist beispielhaft in Abbildung 2-22 dargestellt:



Abbildung 2-22: PUR [40]

Im Projekt Sol4City und diesem Bericht werden jeweils mit Pentan als Hauptbestandteil des Treibmittels geschäumte PUR betrachtet, untersucht und angewendet, da dieses über eine vergleichsweise geringe effektive WLF verfügt.

Am IGTE wurden bereits 2015 WLF-Messungen von zwei ungealterten PUR des Herstellers Puren durchgeführt. Ein PUR mit der Bezeichnung E40 hat eine Dichte von 40 kg/m^3 , das andere PUR mit der Bezeichnung E80 hat eine Dichte von 80 kg/m^3 . Mithilfe der aus den jeweiligen Messpunkten ermittelten Ausgleichsgeraden aus den Gleichungen (2-3) und (2-4) können die temperaturabhängigen effektiven WLFen $\lambda_{PUR,0a,40}$ und $\lambda_{PUR,0a,80}$ berechnet werden.

$$\lambda_{PUR,40,0a}(\vartheta) = 19,604 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,160 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta \quad (2-3)$$

$$\lambda_{PUR,80,0a}(\vartheta) = 23,240 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,144 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta \quad (2-4)$$

In Abbildung 2-23 lässt sich erkennen, dass im abgebildeten Temperaturbereich E80 eine höhere effektive WLF aufweist als E40. Bei Schäumen hat der Wärmetransport über den Festkörperanteil einen größeren Anteil als bei Faserdämmstoffen wie PFV. Außerdem ist die Dichte von 80 kg/m^3 von E80 ca. doppelt so hoch wie die des PFV mit der höchsten Dichte. Daher führt bei den betrachteten PUR die höhere Dichte aufgrund der zunehmenden Wärmeleitung über den Festkörperanteil zu einer höheren effektiven WLF. Auch bei den PUR wird durch die höhere Dichte zwar der Anteil der Wärmestrahlung stärker gehemmt, wie an der geringeren Steigung über der Temperatur sichtbar ist, allerdings ist dieser Beitrag im betrach-

teten Temperaturbereich geringer als die Erhöhung der Wärmeleitung über den Festkörperanteil. Für die WLF von ungealtertem PUR wurden im Simulationsmodell zunächst die effektive WLF von E40 eingesetzt.

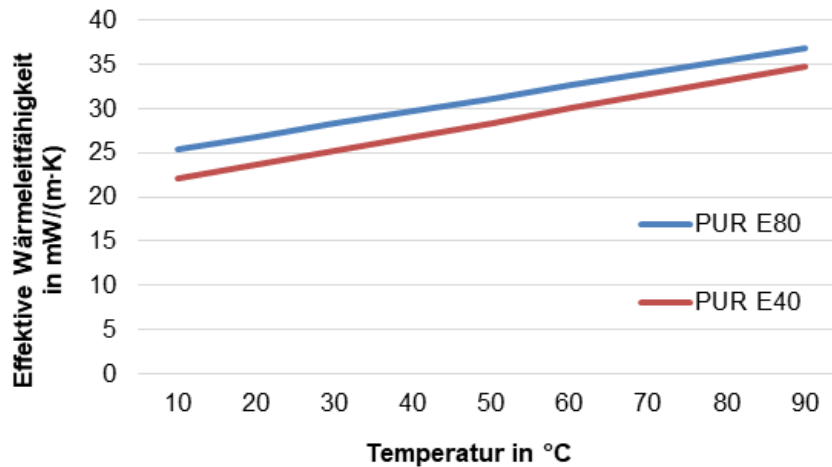


Abbildung 2-23: Interpolierte gemessene effektive WLFen der ungealterten PUR E40 und E80

Polyurethan-Hartschaum (PUR), gealtert

In den Poren des geschäumten PUR ist zunächst das bei der Herstellung verwendete Treibmittel eingeschlossen. Durch Diffusionsvorgänge werden Teile des Treibmittels durch Umgebungsluft ausgetauscht. Bei den in Sol4City betrachteten PUR befindet sich vorwiegend Pentan und CO₂ in den Poren, wobei CO₂, aufgrund der geringeren Molekülgröße, deutlich schneller ausdiffundiert und das Pentan zu einem größeren Anteil in den Poren enthalten bleibt. Pentan besitzt eine deutlich geringere WLF als Luft. Die Diffusionsvorgänge führen somit zu einer Erhöhung der WLF von PUR.

Zur Abschätzung der Erhöhung der effektiven WLF von PUR nach 25 Jahren wurden zwei Ansätze gewählt. Ein Ansatz besteht in der Anwendung der DIN EN 13165:2016, wonach mit festen Zuschlägen $\Delta\lambda_{PUR,10a}$ auf die effektive WLF des ungealterten Materials in Abhängigkeit von der Zellgasfüllung, Bauteildicke und Kaschierung gerechnet wird. Nach DIN EN 13165:2016 wird davon ausgegangen, dass die Zunahme der effektiven WLF durch Alterung nach 10 Jahren abgeschlossen ist. In Tabelle 2-7 sind die Werte für eine pentanbasierte Zellgasfüllung und keine bzw. diffusionsoffene Kaschierung des PUR aufgeführt. Für eine diffusionsdichte Kaschierung wird nach DIN EN 13165:2016 unabhängig von der Bauteildicke ein Zuschlag von 1,5 mW/(m·K) angesetzt.

Tabelle 2-7: Alterungszuschläge zur effektiven WLF von pentangeschäumtem PUR ohne Kaschierung nach 10 Jahren gemäß DIN EN 13165

Plattendicke d_{PUR} in mm	$\Delta\lambda_{PUR,10a}$ in mW/(m·K)
$d_{PUR} < 80$	5,8
$80 \leq d_{PUR} < 120$	4,8
$120 \leq d_{PUR}$	3,8

Da die Bauteildicken des PUR in den entwickelten Wärmedämmungen zum größten Teil mehr als 120 mm betragen, wird eine Zuschlag von $\Delta\lambda_{PUR,10a} = 3,8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ gewählt. Da in der Realität von einer Teilkaschierung des PUR ausgegangen werden kann (u. a. durch ggf. an der Innenseite eingesetzte VIP und eine Kunststoffbahn außen und ggf. auch innen), kann dies bereits als konservative Annahme gewertet werden. Die effektive WLF von gealtertem PUR, welche zur Dimensionierung der Wärmedämmungen verwendet wurde, ergibt sich nach diesem Ansatz somit gemäß Gleichung (2-5) zu:

$$\lambda_{PUR, Norm, 25a}(\vartheta) = 23,404 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,160 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta \quad (2-5)$$

Zur Prüfung der Plausibilität der Abschätzung des gewählten Ansatzes und da die PUR-Proben des E40 nicht mehr vorhanden waren, wurden die E80-Proben ca. 6 Jahre nach der ersten Messung erneut bzgl. der temperaturabhängigen effektiven WLF gemessen. Die Messergebnisse sind in Abbildung 2-24 den Ergebnissen der ungealterten Proben und der prognostizierten effektiven WLF nach 10 Jahren Alterung gemäß DIN EN 13165:2016 gegenübergestellt. Da die mittlere Probendicke 60,3 mm betrug und die Proben zu keiner Zeit diffusionsdicht kaschiert waren, wurde entsprechend Tabelle 2-7 ein Alterungszuschlag von $5,8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ gewählt.

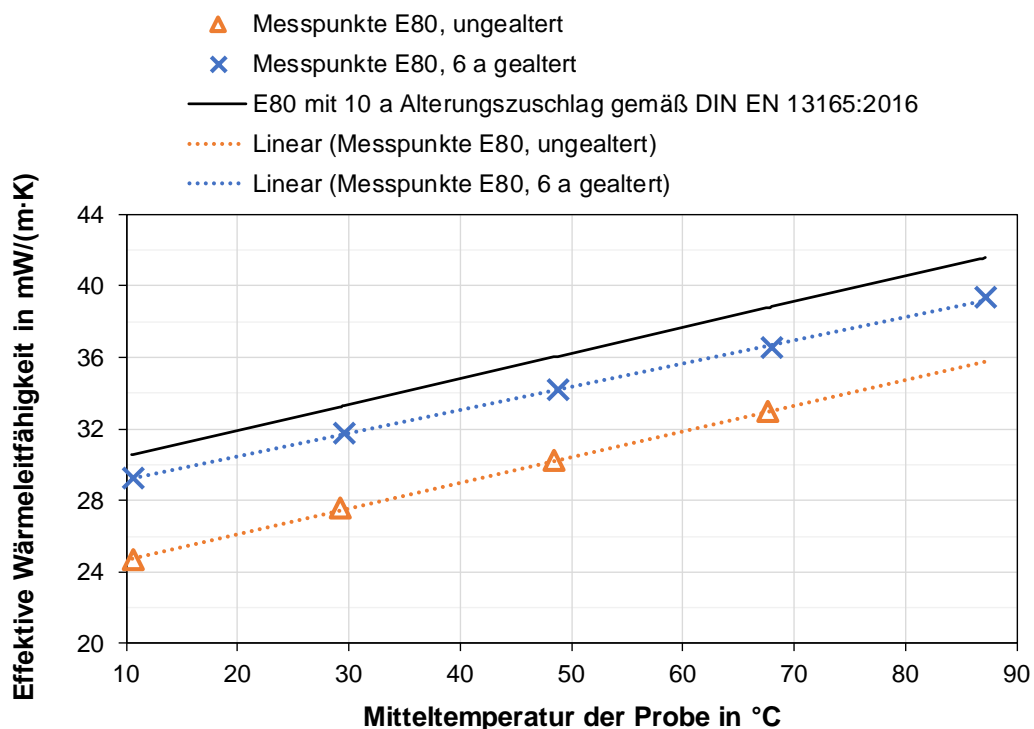


Abbildung 2-24: Effektive WLFen des PUR E80 ungealtert und 6 a gealtert (Messwerte) sowie E80 ungealtert zzgl. 10 a Alterungszuschlag gemäß DIN EN 13165:2016 von $5,8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$

Die Messwerte der 6 a gealterten PUR-Proben liegen zwischen den Messwerten der ungealterten Proben und der Prognose einer 10-jährigen Alterung gemäß DIN EN 13165:2016. Somit bestätigen sie die Plausibilität der gewählten Annahme zur Erhöhung der effektiven WLF durch

Alterung aus der Norm DIN EN 13165:2016. Da die Geschwindigkeit der Diffusion des Austauschprozesses, bei welchem das ursprüngliche Zellgas teilweise durch Umgebungsluft ersetzt wird, mit der Zeit abnimmt, scheint auch die Verortung der Messwerte der 6 a gealterten PUR-Proben deutlich näher an den Werten der prognostizierten 10-jährigen Alterung plausibel.

Der zweite Ansatz zur Bestimmung der effektiven WLF von PUR nach einer Alterung von 25 Jahren stammt von WAGNER [41]. Dabei handelt es sich um eine deutlich konservativere Annahme, da die WLF in diesem Fall für den relevanten Temperaturbereich deutlich höher ist als $\lambda_{PUR, Norm, 25a}$ nach DIN EN 13165:2016. Details zur Bestimmung der WLF können [41] entnommen werden. Zahlenwert-Gleichung (2-6) zeigt die temperaturabhängige effektive WLF von PUR mit der konservativen Annahme $\lambda_{PUR, kons, 25a}$ in $W/(m \cdot K)$.

$$\lambda_{PUR, kons, 25a}(T) = 2,829 + \frac{2,576 \cdot T^{3/2}}{T + (245,4 \cdot 10^{-(12/T)})} + 1,846 \cdot 10^{-7} \cdot T^3 \quad (2-6)$$

Die Temperatur T muss hier in Kelvin eingesetzt werden. Im Folgenden wird beim Verwenden dieser WLF von der konservativen Annahme der WLF des PUR gesprochen. Die für die Simulationsstudien verwendeten effektive WLF von PUR sind in Abbildung 2-25 grafisch dargestellt.

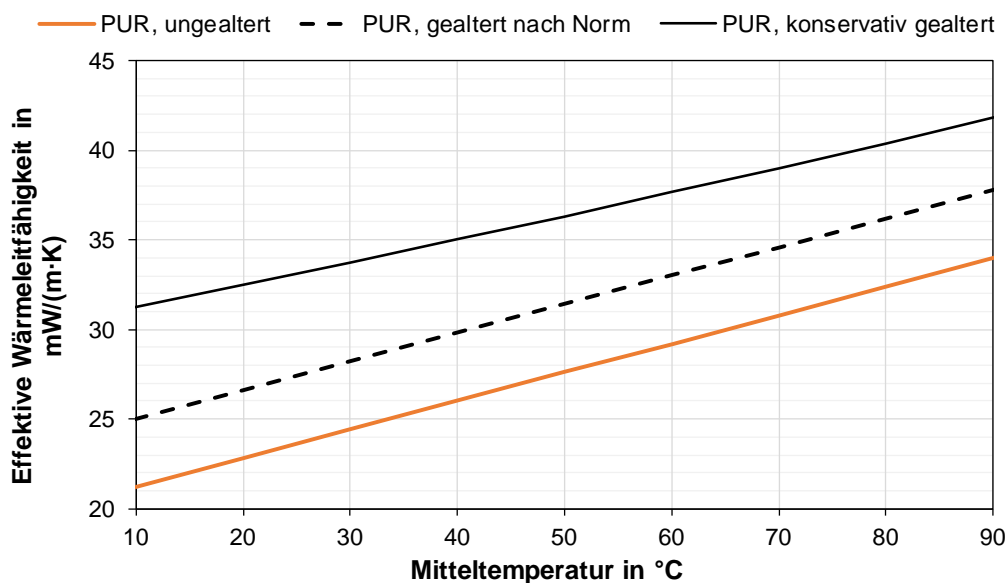


Abbildung 2-25: Für die Simulationsstudien verwendeten eff. WLF von PUR über der Temperatur

Grafithaltiges expandiertes Polystyrol (GEPS)

In Abbildung 2-26 sind EPS und GEPS mit unterschiedliche hohen Grafitanteilen dargestellt:



Abbildung 2-26: EPS (weiße Platte) und GEPS (graue Platten) [42]

Am IGTE wurde die temperaturabhängige effektive WLF eines GEPS mit einer Dichte von $21,26 \text{ kg/m}^3$ bereits vor Projektbeginn bestimmt. Aus einer linearen Regression der Messwerte resultiert die in Gleichung (2-7) dargestellte temperaturabhängige WLF λ_{GEPS} .

$$\lambda_{GEPS}(\vartheta) = 31,30 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,156 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta \quad (2-7)$$

Das zum Schäumen der Polymerkugeln verwendete Treibmittel wird bereits in einem kurzen Zeitraum nach der Herstellung durch eindiffundierende Umgebungsluft ersetzt, weshalb angenommen wird, dass das zur Messung verwendete GEPS bereits vollständig gealtert ist. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass sich bei der mittels ZPA gemessene WLF λ_{GEPS} keine signifikanten Änderungen über die Zeit ergeben. [43]

Elastomer-Schaum

Den aus dem Elastomer-Schaum AF/ArmaFlex bestehenden Dämmkappen wird im Simulationsmodell eine temperaturabhängige WLF λ_E zugeordnet, welche zuvor in einer Messung des IGTE bestimmt wurde, siehe Gleichung (2-8).

$$\lambda_E(\vartheta) = 32,11 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,102 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta \quad (2-8)$$

Die Dämmkappen werden für den Zeitraum der Speicherprüfung gemäß DIN EN 15332:2020 verwendet. Vor einer Speicherprüfung können diese neu beschafft werden und liegen dann bei der Prüfung in einem ungealterten Zustand vor. Aus diesem Grund werden bei den Dämmkappen keine Alterungsvorgänge bei der WLF berücksichtigt.

2.1.5.4 Materialeigenschaften der übrigen Stoffe

Speichermedium und Speicherbehälter

Da nur stationäre Simulationen durchgeführt werden und damit die Wärmekapazität des Speichermediums nicht relevant ist, wird dieses nicht simuliert.

Für den Speicherbehälter und die Standfüße des Speichers im Simulationsmodell wird das von COMSOL Multiphysics voreingestellte Material Konstruktionsstahl mit einer temperaturunabhängigen WLF von $44,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ eingestellt. Durch die geringe Wandstärke des Stahlbehälters von $\leq 5 \text{ mm}$ und die hohe WLF ergibt sich ein sehr hoher Wärmedurchgangskoeffizient im Vergleich zur anliegenden Wärmedämmung. Zudem werden auch in den Speicherprüfungen die Speichertemperaturen üblicherweise außen am Speichermantel gemessen. Daher wird im Modell der Temperaturunterschied zwischen Innen- und Außenoberfläche des Stahlbehälters vernachlässigt. Somit werden die zeitlich und örtlich konstanten Temperaturen des Speichermediums auf der Außenoberfläche des Speicherbehälters definiert, wodurch eine Vernetzung der Speicherwand nicht notwendig ist. Durch diese Vereinfachung werden die hohen Rechenzeiten, welche durch die Vernetzung der geringen Wandstärke zustande kommen würden, vermieden.

Nivellierfüße

Die Nivellierfüße bestehen aus Stahl mit einer temperaturunabhängigen WLF von $44,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und befinden sich unterhalb der Standfüße. Unterhalb der Nivellierfüße befinden sich Schutzkappen aus Polyamid. Als WLF für Polyamid wird ein Literaturwert von $0,41 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ eingestellt [44].

Hydraulische Anschlüsse

Die hydraulischen Anschlüsse bestehen aus dünnwandigen Stahl-, beziehungsweise Messinghohlzylindern und sind mit Wasser gefüllt. Aufgrund der geringen Wandstärke würde eine Vernetzung der Rohre, wie schon beim Speicherbehälter erwähnt, zu langen Berechnungszeiten führen. Dennoch können die hydraulischen Anschlüsse bei der Vernetzung nicht vernachlässigt werden, da sie als Wärmebrücke fungieren. Dies kann mit dem geringen Wärmewiderstand von Metall, sowie der Parallelschaltung der Wärmewiderstände von Metall und Wasser erklärt werden. Zur Vermeidung der langen Rechenzeiten wurde deshalb eine gewichtete Misch-WLF berechnet, welche dem gesamten Anschluss zugeordnet wird. Da die Querschnitte über den Anschluss konstant bleiben, werden als Gewichtungsfaktor die dimensionslosen, konstanten Querschnittsanteile von Wasser $f_{Q,W}$ und Metall $f_{Q,M}$ verwendet, welche mit dem Innenradius $r_{A,i}$ in mm und Außenradius $r_{A,a}$ in mm der Anschlüsse berechnet werden.

Die WLF eines Anschlusses λ_A in $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ergibt sich durch Einsetzen der in COMSOL Multiphysics voreingestellten, temperaturabhängigen WLF von Wasser λ_W , sowie durch die Verwendung der WLF des jeweiligen Metalls λ_M Konstruktionsstahl $\lambda_{KS} = 44,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ oder Messing $\lambda_{Me} = 120 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, siehe Gleichung (2-9) [45].

$$\lambda_A(T) = f_{Q,W} \cdot \lambda_W(T) + f_{Q,M} \cdot \lambda_M$$

$$= \frac{r_{A,i}^2}{r_{A,a}^2} \cdot \left(-0,86908 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,00895 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot T - 1,58366 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}^3} \cdot 10^{-5} \cdot T^2 \right. \\ \left. + 7,97543 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}^4} \cdot 10^{-9} \cdot T^3 \right) + \left(1 - \frac{r_{A,i}^2}{r_{A,a}^2} \right) \cdot \lambda_M \quad (2-9)$$

Die gewählte Misch-WLF kann als eine optimistische Annahme gewertet werden, da in der Realität neben der Wärmeleitung auch noch Konvektion im Wasser auftritt. Aufgrund der Wärmedämmung der Anschlüsse ist die Auswirkung dieser Vereinfachung allerdings gering.

Unterkonstruktion

Der Europalette und der Holzspanplatte wird das von COMSOL Multiphysics voreingestellte Material Kiefernholz zugeordnet. Die WLF von beiden Materialien sind nicht temperaturabhängig, dafür aber abhängig von der relativen Luftfeuchtigkeit. Da bei den Umgebungsbedingungen die relative Luftfeuchtigkeit konstant mit 0 % definiert ist, ergibt sich für die Europalette und die Holzspanplatte eine konstante WLF von 0,1 W/(m·K). Die Materialeigenschaften der Betonplatte sind irrelevant, da auf deren Oberfläche eine konstante Temperatur von 20 °C vorgegeben wurde.

Hohlräume

Die im Modell vorhandenen Hohlräume wären in der Realität mit Luft gefüllt. Allerdings wird die Vereinfachung getroffen, dass Hohlräume mit einer konservativen WLF von 1000 W/(m·K) modelliert werden, womit der Wärmewiderstand nahezu vernachlässigt wird. Durch diese vereinfachende Annahme kann die aufwändige Simulation von Konvektion in Hohlräumen, sowie Oberfläche-zu-Oberfläche Wärmestrahlung vermieden werden.

2.1.5.5 Physikalische Vorgänge und Vorgaben

Da, wie oben beschrieben, physikalische Vorgänge im Speichermedium und in der Speicherwand bei den Simulationen nicht betrachtet werden, wird eine konstante Temperatur auf den Außenoberflächen der Speicherwand definiert. Hierfür wird der Speicherbehälter, bestehend aus einem hohlzylindrischen Teil und zwei Rotationsellipsoid-Hälften, in vier Bereiche eingeteilt, welche in Abbildung 2-27 durch verschiedene Farben kenntlich gemacht sind.

Bereich 1 mit der Höhe h_B [m] schließt in z-Richtung den Bereich vom untersten Punkt des Speicherbodens bis zum Koordinatenursprung ein. Die Bereiche 2 und 3 haben in z-Richtung die gleiche Höhe und ergeben zusammen die Höhe h_{15} [m], wobei die obere Grenze von Bereich 3 bei 15 % des gesamten Speichervolumens liegt. In Bereich 4, also den oberen 85 % des Speichervolumens, wird für die Simulationsstudie gemäß DIN EN 15332:2020 eine Temperatur von $\vartheta_{Sp,4} = 65$ °C festgelegt [46]. In den Bereichen 1 bis 3 ist von einer Temperaturschichtung auszugehen, da die Annahme getroffen wurde, dass das Heizelement direkt an der

Grenze zwischen Bereich 3 und 4 positioniert wird und die Höhe des Heizelementes vernachlässigt wird. Über dem Heizelement tritt freie Konvektion und unter dem Heizelement lediglich Wärmeleitung auf.

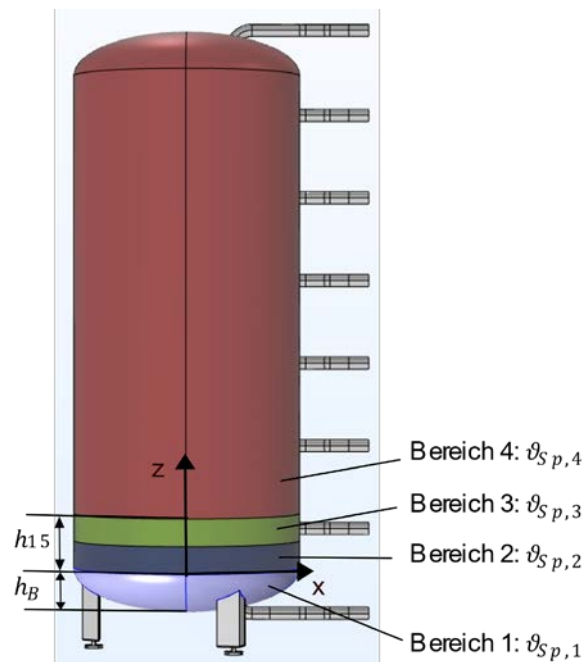


Abbildung 2-27: Einteilung der Bereiche für die Temperaturschichtung an einem 950 L WWS

Für die Temperaturschichtung wurde mithilfe von Messdaten von VCS bei einer Speicherprüfung die Gleichung (2-10) in Abhängigkeit von der Koordinate z bestimmt, wobei diese Temperaturschichtung für den Bereich $-h_B \leq z \leq h_{15}$ gilt.

$$\vartheta_{Sp}(z) = 27,5329 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}} \cdot z + 65 \text{ } ^{\circ}\text{C} - 27,5329 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{m}} \cdot h_{15} \quad (2-10)$$

Da in COMSOL Multiphysics eine koordinatenabhängige Temperaturdefinition nicht möglich ist, werden den Bereichen 1 bis 3 die folgenden Temperaturen zugeordnet:

- $\vartheta_{Sp,1} = \vartheta_{Sp}(-h_B)$
- $\vartheta_{Sp,2} = \vartheta_{Sp}(h_{15}/4)$
- $\vartheta_{Sp,3} = \vartheta_{Sp}(h_{15} \cdot 3/4)$

Wärmetransportmechanismen werden für die Außenoberflächen, Festkörper und Fluide definiert. An den Außenoberflächen wird freie Konvektion und durch die festgelegte Luftgeschwindigkeit von 0,25 m/s auch erzwungene Konvektion simuliert. Außerdem wird Wärmestrahlung an die Umgebung an allen Außenoberflächen an die Umgebung durch einen Emissionsgrad von $\varepsilon = 0,9$ definiert. In Festkörpern und Fluiden wird nur der Wärmetransportmechanismus Wärmeleitung simuliert. Die eingesetzten porösen Wärmedämmstoffe werden mittels temperaturabhängigen, effektiven WLFen definiert. Diese berücksichtigen bereits den Wärmestrahlungsanteil in den Poren. Konvektion tritt bei den verwendeten porösen Festkörpern innerhalb der Poren nicht in signifikanter Höhe auf.

2.1.5.6 FEM-Netz

Durch das FEM-Netz wird das Modell in Elemente mit endlicher Größe zerlegt, welche anschließend bzgl. ihrer für die Simulation relevanten Eigenschaften berechnet werden können. Mit abnehmender Elementgröße und steigender Gleichmäßigkeit in der Vernetzung, steigt die Güte des FEM-Netzes, was wiederum zu einem genaueren Ergebnis führt. Allerdings steigt mit abnehmender Elementgröße die benötigte Berechnungszeit an. Die gewählten FEM-Netze mit Hilfe von Sensitivitätsanalysen so gewählt, dass eine Netzverfeinerung keinen signifikanten Genauigkeitsmehrwert mehr liefert, der eine Steigerung der Rechenzeit rechtfertigen würde. In Abbildung 2-28 ist ein Ausschnitt des vernetzten Simulationsmodells eines WWS mit 950 L Speichervolumen dargestellt, wobei die unterschiedliche Geometrie und Größe der Elemente bei den verschiedenen Gebieten erkennbar sind.

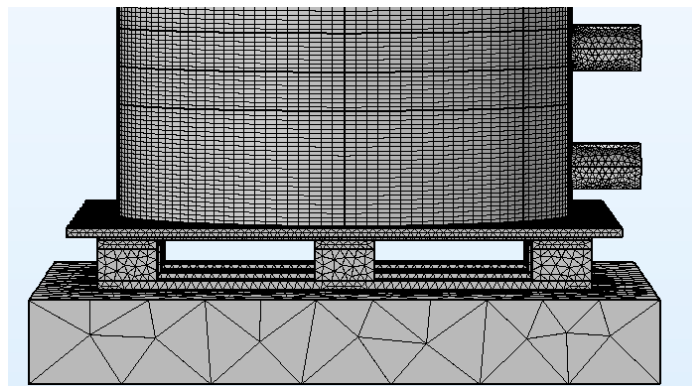


Abbildung 2-28: Ausschnitt des simulierten 950 L WWS im vernetzten Zustand

2.1.5.7 Validierung des Simulationsmodells

Zur Validierung des Simulationsmodells wurden die Warmhalteverluste des kommerziell verfügbaren Warmwasserspeichers Vitocell 340-M SVKC von VCS mit einem Speichervolumen von 950 L, der sowohl für die Validierungsmessungen als auch als Prototypspeicher zur Messung der Warmhalteverluste mit den entwickelten und gefertigten Wärmedämmungen diente, mit unterschiedlichen Wärmedämmungen gemäß DIN EN 12897:2020 gemessen. Bei der ersten Messung wurde die Standardausführung der Wärmedämmung des WWS aus PFV-LD-VI (siehe Kapitel 2.1.5.3) angebracht, siehe Abbildung 2-29. Bei der zweiten Messung wurde diese Wärmedämmung um VIPs in Form von va-Q-patches der Fa. va-Q-tec ergänzt, siehe Abbildung 2-30.

Die Standardausführung der Wärmedämmung des WWS aus PFV-LD-VI hat einer Dämmdicke von ca. 14 cm am Mantel und im Mittel ca. 11 cm an den beiden Böden. Die hydraulischen Anschlüsse werden mit Elastomerschaum wärmegeklämt. Der Speicher wird durch den untersten hydraulischen Anschluss über einen Heizstab beheizt. Damit wird der Speicher nahezu vollständig auf eine Temperatur von 65 °C erwärmt. Am Speicherboden wird eine zeitlich gemittelte Temperatur von 64,1 °C gemessen.

In der Speicherprüfung wurden Warmhalteverluste von 135,4 W ermittelt, womit der Speicher gemäß Tabelle 2-1 die EEK C erreicht. Anhand des Speichermodells werden Warmhalteverluste von 137 W berechnet. Die Abweichung zur Messung beträgt 1,6 W und damit nur 1,2 % bezogen auf den Messwert.

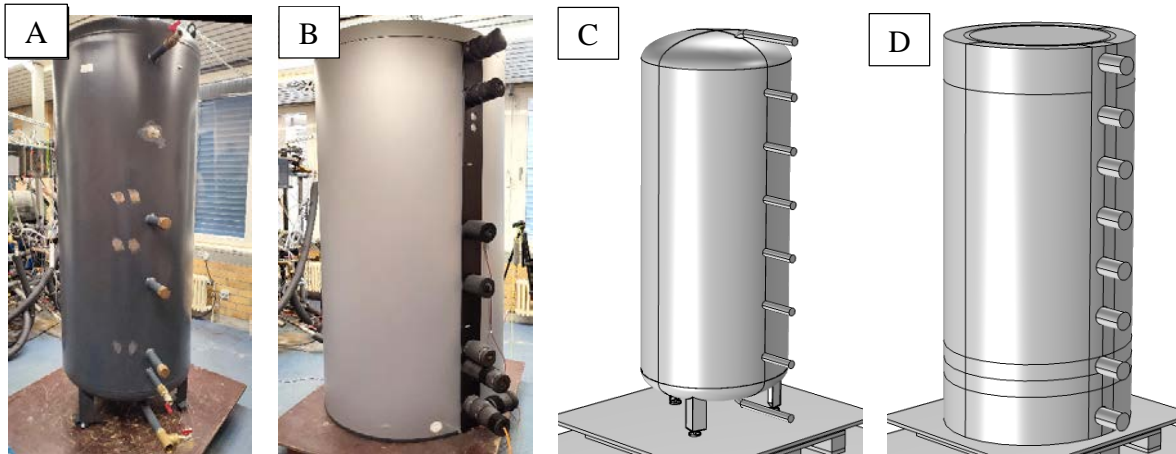


Abbildung 2-29: WWS zur Validierung des Simulationsmodells. A: ohne Wärmedämmung; B: mit Wärmedämmung (PFV-LD-VI); C: Simulationsmodell ohne Wärmedämmung; D: Simulationsmodell mit Wärmedämmung (PFV-LD-VI)

Bei der zweiten Messung der Warmhalteverluste wurden zwei va-Q-patches mit Abmessungen der enthaltenen VIPs von jeweils 1900 mm x 700 mm x 15 mm an den Speichermantel angeklebt, bevor die Dämmung aus PFV-LD-VI angebracht wurde, siehe Abbildung 2-30. An den Rändern der va-Q-patches existiert ein Überstand des Schaumstoffs, in welchen die VIPs eingeschlossen sind, von jeweils 50 mm Breite und 4 mm Dicke. Die va-Q-patches wurden in Abstand zueinander aufgeklebt, da sich zwischen diesen die Muffe am Speicher befindet (in den Abbildungen vom Speicher verdeckt). Im Speichermodell wurde der Überstand der va-Q-patches aus Schaumstoff vernachlässigt.

Es wurden Warmhalteverluste des um die va-Q-patches ergänzten Warmwasserspeichers von 110,4 W gemessen. Die Warmhalteverluste konnten also durch die va-Q-patches um 25 W und damit um 18,5 %, bezogen auf den Messwert mit der Standard-Wärmedämmung, verringert werden. Damit wird gemäß Tabelle 2-1 weiterhin die EEK C erreicht. Der Grenzwert zur EEK B liegt bei 104,1 W. Die Simulation ergab Warmhalteverluste von 113 W, womit sich eine Differenz von 2,6 W zur Messung ergibt, was einer relativen Abweichung von nur 2,4 %, bezogen auf den Messwert, entspricht. Die Reduktion der Warmhalteverluste durch den Einsatz der va-Q-patches beträgt auf Basis der Simulation 24 W und damit 1 W weniger als bei der Messung, was einer relativen Abweichung von nur 3,9 % entspricht, bezogen auf die Differenz aus der Messung.

Die Ergebnisse der Validierungen sind in Tabelle 2-8 zusammengefasst. Die Validierungen zeigen, dass das einfache Simulationsmodell die realen Warmhalteverluste von Warmwasserspeichern mit hoher Genauigkeit vorhersagen kann. Zudem zeigt sich, dass im Simulationsmodell insgesamt konservative Annahmen getroffen wurden, da die simulierten Werte der

Warmhalteverluste die gemessenen Werte übertreffen. Somit ist von einer hohen Sicherheit bzgl. der Vorhersagen auszugehen.

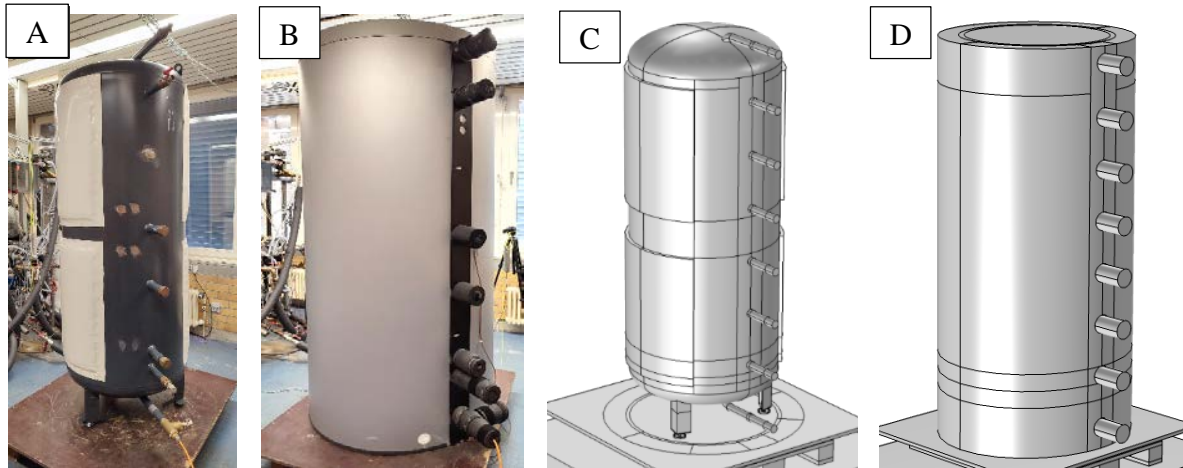


Abbildung 2-30: WWS zur Validierung des Simulationsmodells. A: mit va-Q-patches; B: mit va-Q-patches und PFV-LD-VI; C: Simulationsmodell mit va-Q-patches; D: Simulationsmodell mit va-Q-patches und PFV-LD-VI

Tabelle 2-8: Ergebnisse der Validierungen des Simulationsmodells anhand von Messungen der Warmhalteverluste eines WWS mit einem Speichervolumen von 950 L

Größe	Gemessen	Berechnet	Differenz
Warmhalteverluste ohne va-Q-patches	135,4 W	137,0 W	1,6 W (1,2 %)
Warmhalteverluste mit va-Q-patches	110,4 W	113,0 W	2,6 W (2,4 %)
Differenz mit und ohne va-Q-patches	25,0 W	24,0 W	1,0 W (3,9 %)

2.1.6 Simulationsergebnisse

In Abstimmung unter den Projektpartnern und auf Basis des Anforderungskatalogs haben sich drei Wärmedämmungen als am vielversprechendsten herausgestellt. Diese unterscheiden sich vor allem bezüglich der eingesetzten Wärmedämmstoffe am Speichermantel (Manteldämmung), welche im Folgenden aufgelistet sind:

- Wärmedämmung 1: Kombination von auf den Speichermantel aufklebbaren VIPs mit abnehmbaren GEPS-Manteldämmungselementen,
- Wärmedämmung 2: abnehmbare PUR-Schalen mit integrierten VIPs und
- Wärmedämmung 3: abnehmbare PUR-Schalen mit erhöhter Dicke.

Als Bodendämmung wurde jeweils PFV vorgesehen und für die Deckeldämmung wurden sämtliche Wärmedämmstoffe der drei Wärmedämmungen in Betracht gezogen. Zudem wurde auch an den Hauptelementen der Manteldämmung kompressible PFV vorgesehen, um Kamineffekte durch Lücken der Wärmedämmung zu verhindern.

In den Simulationen der Wärmedämmungen 1 und 2 wurden jeweils die VIP-Dicken variiert, um mit möglichst geringer VIP-Dicke und nach dem Anforderungskatalog vorgeschriebener maximale Gesamtdicke der Manteldämmung von 17 cm mit 25 a gealterten Wärmedämmstoffen EEK A zu erreichen. Diese Vorgehensweise wurde gewählt, um die Dämmstoffkosten möglichst gering zu halten, da VIP die bei weitem höchsten Kosten der verwendeten Wärmedämmstoffe aufweist. In den Simulationen der Wärmedämmung 3 wird jeweils die PUR-Dicke der Manteldämmung entsprechend angepasst, wobei in den Bereichen der Anschlüsse jeweils die Maximaldicke von 17 cm eingehalten wurde.

Als Schrittweite für die Dickenvariation wurden 5 mm gewählt. Somit wird der Grenzwert zur Erreichung der EEK A für unterschiedliche Wärmedämmungen und Speichervolumina unterschiedlich stark unterschritten.

In Tabelle 2-9 sind die aus der EU-Verordnung Nr. 812/2013 resultierenden Grenzwerte der Warmhalteverluste S_A [W] zur Erreichung von EEK A für die unterschiedlichen simulierten Speichervolumina der WWS aufgeführt. Um eine höhere Sicherheit bzgl. der Erreichung von EEK A zu gewährleisten, wurde zudem ein um 3 % verringerter Zielwert $S_{A,Sich}$ [W] für die EEK A definiert.

Tabelle 2-9: Obere Grenzwerte der Warmhalteverluste zur Realisierung der EEK A ohne (S_A) und mit Sicherheit ($S_{A,Sich}$)

Speichervolumen in L	S_A für EEK A in W	$S_{A,Sich}$ Für EEK A in W
500	59,55	57,76
950	74,49	72,26
1500	87,72	85,09
2000	97,38	94,46

Für die unterschiedlichen Wärmedämmungen werden die Höhe der Deckel- und der Bodendämmung angegeben. Diese beziehen sich im Fall für den Deckel auf den Abstand vom obersten Punkt des oberen Klöpperbodens bis zum Abschluss der Manteldämmung und für den Boden auf den Abstand zwischen dem untersten Punkt des unteren Klöpperbodens zum unteren Rand der Speicherfüße (ohne Nivellierfüße). Für jede Wärmedämmung und jedes Speichervolumen wurden im Simulationsmodell die gleichen Dämmdicken für die Deckeldämmung angenommen.

2.1.6.1 Wärmedämmung 1

Abbildung 2-31 zeigt den Aufbau des Simulationsmodells von Wärmedämmung 1 in Schnittdarstellung. Bei den senkrechten und waagerechten Linien in Abbildung 2-31 handelt es sich nicht um Schnittkanten für die Unterteilung der Manteldämmung in mehrere Segmente, sondern um Unterteilungen von Gebieten im Simulationsmodell. Die Schnittdarstellung zeigt den Aufbau des 950 L-Speichermodells, die prinzipielle Anordnung der Wärmedämmstoffe bleibt

für alle Speichervolumina identisch. Direkt an die äußere Speicherwand sind entweder VIP inklusive PE⁸-Schaumkaschierung (va-Q-patches (VQP) des Herstellers va-Q-tec) oder PFV-LD⁹ angebracht.

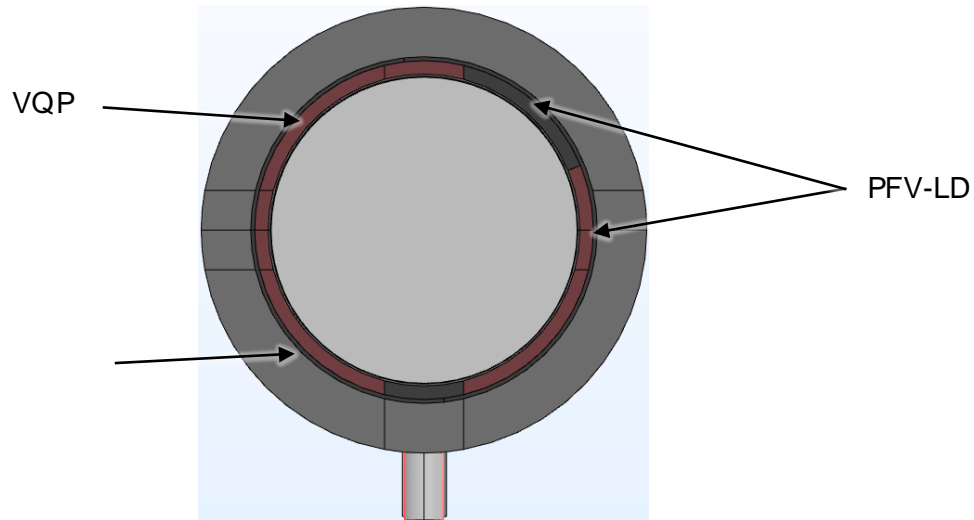


Abbildung 2-31: Wärmedämmung 1 im Simulationsmodell als Schnittdarstellung für den 950 L-Speicher

Für die WLF der VQP im ungealterten Zustand wird $\lambda_{VQP,0a,d}$ eingesetzt, siehe Tabelle 2-5, und im gealterten Zustand $\lambda_{VQP,25a,d}$, siehe Tabelle 2-6. An Stellen der Speicherwand, an welchen aufgrund der hydraulischen Anschlüsse oder der Muffe (siehe Abbildung 2-41) keine VQP angebracht werden können, wird PFV-LD-Nev vorgesehen und die WLF $\lambda_{PFV-LD-Nev}$ eingesetzt, siehe Tabelle 2-4. Anliegend an den VQP folgt eine Schicht aus PFV-LD-Nev, welche von 20 mm auf 10 mm komprimiert angenommen wird, weshalb die WLF von PFV-LD-Nev-K $\lambda_{PFV-LD-Nev-K}$ eingesetzt wird, siehe Tabelle 2-4. Die Annahme einer 10 mm dicken PFV-LD-Schicht und die WLF $\lambda_{PFV-LD-Nev}$ gilt für alle Speichervolumina. Die äußerste Wärmedämmschicht ist aus GEPS mit der WLF λ_{GEPS} , siehe Gleichung (2-7).

Die Manteldämmung weist für das Simulationsmodell des 950-Liter-Speichers, wie auch für den Prototyp-Speicher, eine Höhe von 2315 mm auf, wodurch die Höhe der Deckeldämmung vom obersten Punkt des oberen Klöpperbodens bis zum oberen Rand der Manteldämmung $d_{Deckel} = 183$ mm beträgt. Diese Höhe wird konsistent bei allen Speichervolumina in den Simulationsmodellen für Wärmedämmung 1 angenommen.

Für die Boden- und Deckeldämmung sind verschiedene Optionen denkbar, welche im Folgenden näher beschrieben werden. Abbildung 2-32 zeigt die beiden ausgearbeiteten Varianten für die Bodendämmung bei Wärmedämmung 1.

⁸ PE: Polyethylen

⁹ Polyesterfaservlies niedriger Dichte

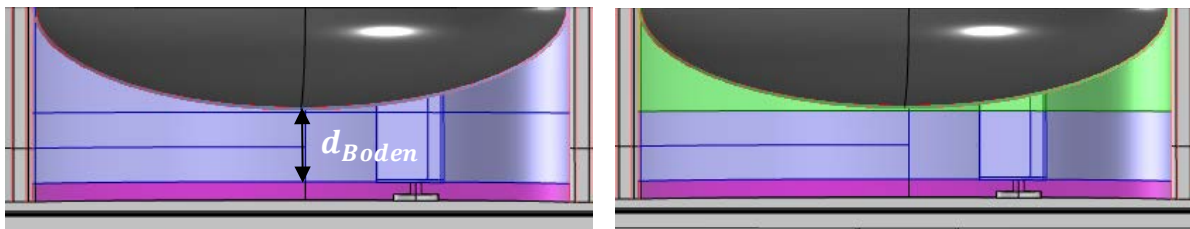


Abbildung 2-32: Bodendämmungen im Simulationsmodell bei Wärmedämmung 1. Links: Bodendämmung 1; rechts: Bodendämmung 2

Der dunkelgrau dargestellte Bereich in Abbildung 2-32 ist der untere Klörperboden des WWS im Simulationsmodell. In der Bodendämmung 1 wird der untere Bereich über dem Hohlraum (Magenta) vollständig mit PFV-HD (Abbildung 2-32 blau) gedämmt und somit wird diesem Bereich auch die WLF λ_{PFV-HD} zugewiesen, siehe Tabelle 2-4. In der Realität ist das Anbringen der Bodendämmung aus PFV-HD allerdings aufwendig, da PFV-HD nur sehr schwer komprimierbar ist. PFV-HD müsste also an die Form des Bodens angepasst werden. Daher werden auch Simulationen mit Bodendämmung 2 durchgeführt. Dort wird der Bereich, welcher am Klörperboden anschließt, mit PFV-LD-VI wärmegeklämt (Abbildung 2-32 rechts, grün). Dieses ist deutlich einfacher komprimierbar als PFV-HD. Alternativ lässt sich auch die gesamte Bodendämmung aus PFV-LD-San ausführen, welches nur eine geringfügig höhere eff. WLF besitzt als PFV-HD, jedoch deutlich einfacher komprimierbar ist. PFV-LD-San wurde allerdings erst nach Abschluss der Simulationsstudie zur Wärmedämmung 1 identifiziert.

Bei beiden Varianten für die Bodendämmung ist in Magenta der Hohlraum dargestellt. Diesem wird im Simulationsmodell eine WLF von $1000 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ zugewiesen, siehe Kapitel 2.1.5.4.

Abbildung 2-33 zeigt mögliche Varianten der Deckeldämmung. In Deckeldämmung 1 wird PFV-HD (Abbildung 2-33 links, blau) als Wärmedämmstoff eingesetzt. Analog zur Bodendämmung wird auch hier angenommen, dass durch die geringe Komprimierbarkeit des PFV-HD der Bereich direkt am Klörperboden nur aufwendig lückenlos mit PFV-HD gedämmt werden kann. Daher wird dort bei Deckeldämmung 2 PFV-LD-VI eingesetzt (Abbildung 2-33 rechts, grün).

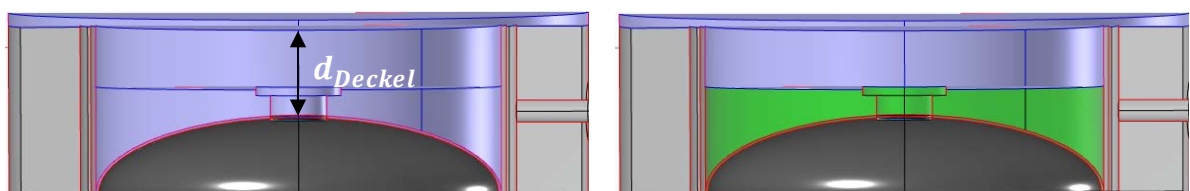


Abbildung 2-33: Deckeldämmungen im Simulationsmodell bei Wärmedämmung 1. Links: Deckeldämmung 1; rechts: Deckeldämmung 2

Für beide Deckeldämmungen wird als Abdeckung eine Schicht aus PFV-HD vorgesehen, welche mit einer Dicke von 25 mm angenommen wird. Weiterhin ist in Abbildung 2-33 zu sehen, dass der Bereich des PFV-LD-VI mit Abschluss des Flanschdeckels des Prototyp-Speichers (siehe Abbildung 2-41) endet.

Neben diesen beiden Varianten besteht die Möglichkeit den Teil der Deckeldämmung über dem Flansch aus GEPS (Abbildung 2-34 links, halbdunkles grau) zu gestalten. Diese Variante wird als Deckeldämmung 3 bezeichnet. Es besteht bei jeder Deckeldämmung für die Wärmedämmung 1 auch die Möglichkeit ein VIP im Deckel (Abbildung 2-34 rechts, rot) einzubauen. Dies ist in Abbildung 2-34: Deckeldämmungen im Simulationsmodell bei Wärmedämmung 1. Links: Deckeldämmung 3; rechts: Deckeldämmung 4

(rechts) am Beispiel von Deckeldämmung 1 zu sehen und wird als Deckeldämmung 4 bezeichnet.

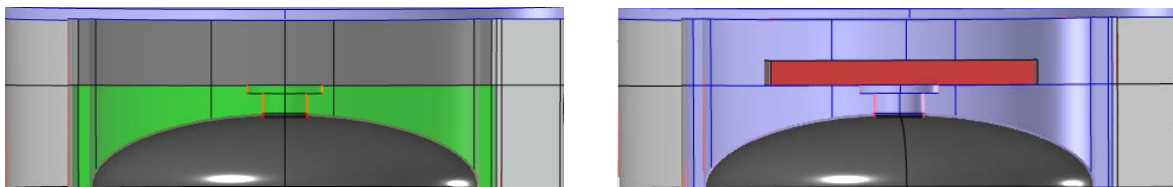


Abbildung 2-34: Deckeldämmungen im Simulationsmodell bei Wärmedämmung 1. Links: Deckeldämmung 3; rechts: Deckeldämmung 4

Es stellte sich allerdings heraus, dass die Verringerung der Wärmeverluste durch den Einsatz von VIP im Deckel, beispielhaft am 950 L-Speicher und für eine Boden- und Deckeldämmung aus PFV-HD simuliert, nur 0,90 % (0,65 W), bezogen auf die Wärmeverluste ohne VIP im Deckel, beträgt. Da die Kosten deutlich höher sind als der erzielte Nutzen, wurden Simulationen des VIP im Deckel nur dann eingesetzt, wenn nur mit dem VIP im Deckel $S_{A,Sich}$ nach 25 Jahren Betriebszeit erreicht wird. Ebenfalls wurde auf Simulationen von GEPS im Deckel für andere Speichervolumina als 950 L verzichtet, denn GEPS weist eine, über den in dieser Studie relevanten Temperaturbereich, sehr ähnliche WLF wie PFV-HD auf. Die Ergebnisse der Simulationsstudien zu Wärmedämmung 1 sind für die relevantesten Kombinationen aus Boden- und Deckeldämmungen mit 25 a gealterten Wärmedämmstoffen in Tabelle 2-10 aufgezeigt. Simulationsergebnisse für die weiteren Speichervolumina finden sich in Anhang B: Weitere Simulationsergebnisse zu den hocheffizienten Wärmedämmungen.

Tabelle 2-10: Simulationsergebnisse mit 25 a gealterter Wärmedämmung 1 für 950 L-Speicher

Variante Bodendämmung	Variante Deckeldämmung	Wärmeverluste S_A in W	$S_A - S_{A,Sich}$ in W
Bodendämmung 1	Deckeldämmung 1	72,23	-0,03
Bodendämmung 2	Deckeldämmung 2	74,17	1,91
Bodendämmung 1	Deckeldämmung 2	73,46	1,20
Bodendämmung 1	Deckeldämmung 3	73,48	1,22
Bodendämmung 1	Deckeldämmung 4	71,58	-0,68

Es ist zu sehen, dass der Wert $S_{A,Sich}$ mit der Bodendämmung 1 in Kombination mit Deckeldämmung 1 oder 4 unterschritten wird.

Die Simulationsstudien werden nach diesen Ergebnissen jeweils für Bodendämmung 1 und Deckeldämmung 1 für alle betrachteten Speichervolumina durchgeführt.

Für alle simulierten Speichervolumina von 500 L, 950 L, 1500 L und 2000 L sind die Hauptabmessungen der Manteldämmung, Bodendämmung 1 und Deckeldämmung 1 in Tabelle 2-11 aufgeführt. Diese sind bereits so optimiert, dass das VIP-Volumen so gering wie möglich gehalten werden kann, um dennoch $S_{A,Sich}$ einzuhalten. Dadurch werden die speichervolumenbezogenen Dämmstoffkosten so gering wie möglich gehalten. Die Gesamtdicke der Manteldämmung für Wärmedämmung 1 beträgt 169 mm, womit die im Anforderungskatalog (Tabelle 2-2) definierte maximale Dämmdicke von 17 cm leicht unterschritten wird.

Tabelle 2-11: Dimensionierung und Simulationsergebnisse der Wärmedämmung 1

Speichervolumen	500 L	950 L	1500 L	2000 L
Manteldämmung	13 cm GEPS 2,9 cm VQP 1 cm PFV-LD	12,5 cm GEPS 3,4 cm VQP 1 cm PFV-LD	13 cm GEPS 2,9 cm VQP 1 cm PFV-LD	12,5 cm GEPS 3,4 cm VQP 1 cm PFV-LD
Bodendämmung	11 cm PFV-HD	10 cm PFV-HD	13 cm PFV-HD	13 cm PFV-HD
Deckeldämmung	18,8 cm PFV-HD	18,8 cm PFV-HD	18,8 cm PFV-HD	18,8 cm PFV-HD
Warmhalteverluste nach 0 a Alterung $S_{A,0a}$	53,58 W	66,96 W	78,33 W	85,08 W
Warmhalteverluste nach 25 a Alterung $S_{A,25a}$	56,73 W	72,23 W	84,04 W	92,94 W
$S_{A,25a} - S_{A,Sich}$	-1,03 W	-0,03 W	-1,05 W	-1,52 W
Relative Abweichung von der Kostengrenze	50,40 %	45,98 %	-3,07 %	6,66 %

Abbildung 2-35 zeigt die speichervolumenbezogenen Dämmstoffkosten von Wärmedämmung 1 für die simulierten Speichervolumina sowie Anteile der eingesetzten Wärmedämmstoffe an den Kosten. Im öffentlichen Teil des Berichts wird die Kosten-Achse nur relativ zu den Zielkosten dargestellt.

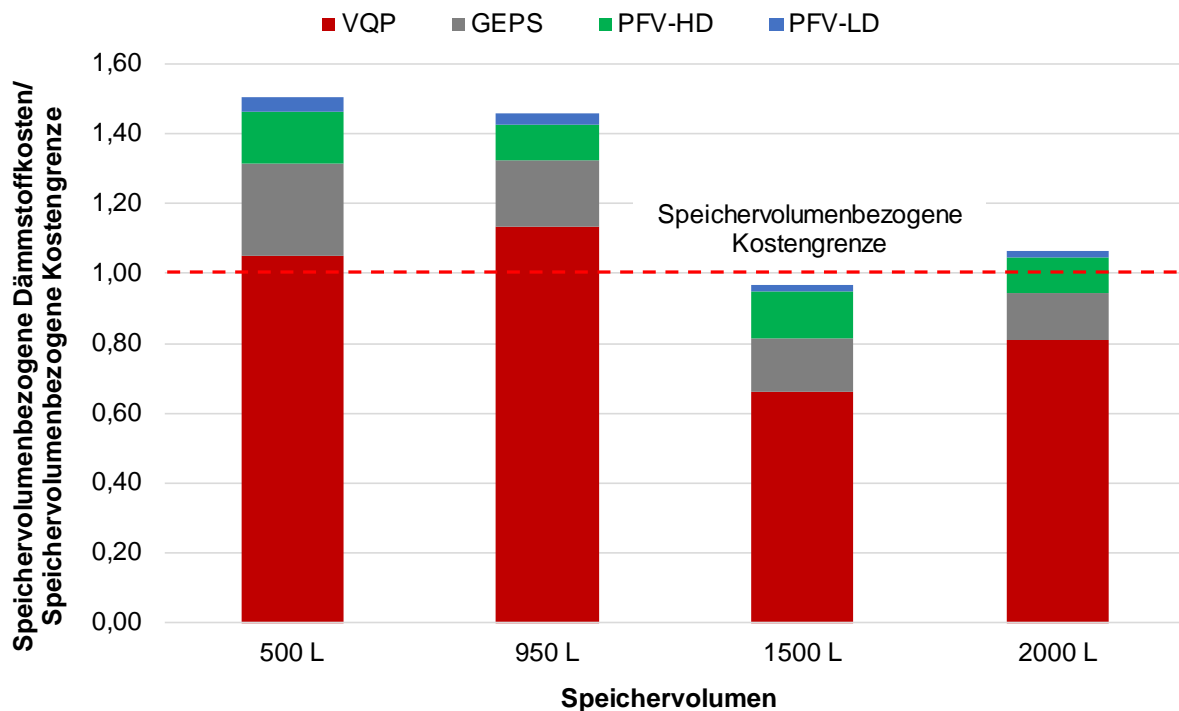


Abbildung 2-35: Relative speichervolumenbezogene Dämmstoffkosten von Wärmedämmung 1 für die simulierten Speichervolumina sowie Anteile der eingesetzten Wärmedämmstoffe an den Kosten.

Die prozentuale Abweichung von der speichervolumenbezogenen Kostengrenze in Tabelle 2-11 bezieht sich immer auf den Wert der festgelegten Kostengrenze. Falls die Kostengrenze unterschritten wird, ergibt sich ein negatives Vorzeichen.

Abbildung 2-35 und Tabelle 2-11 zeigen, dass lediglich für den 1.500 L-Speicher die Kostengrenze der speichervolumenbezogenen Dämmstoffkosten unterschritten werden kann. In Tabelle 2-11 ist zu sehen, dass die Kostengrenze für die beiden Speichervolumina unter 1.500 L um ca. 50 % überschritten wird, was eine starke Abweichung von der Kostengrenze ist. Dies liegt an den hohen Kosten für die VQP. In Abbildung 2-35 ist erkennbar, dass bei den Speichervolumina 500 L und 950 L die Kostengrenze bereits durch die Kosten der VQP überschritten wird.

2.1.6.2 Wärmedämmung 2

Abbildung 2-36 zeigt den Aufbau der Manteldämmung im Simulationsmodell von Wärmedämmung 2 in Schnittdarstellung. Analog zu Wärmedämmung 1 sind keine Schnittkanten für die Unterteilung der Manteldämmung dargestellt, sondern Unterteilungen von Gebieten im Simulationsmodell.

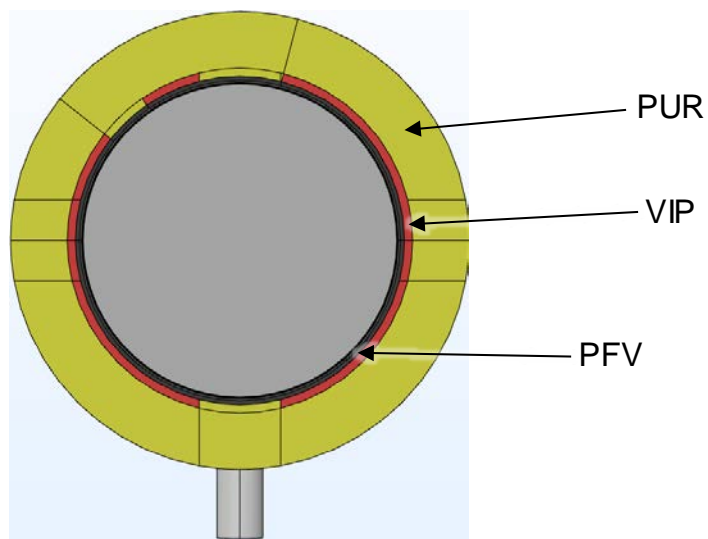


Abbildung 2-36: Wärmedämmung 2 im Simulationsmodell als Schnittdarstellung für den 950 L-Speicher

In der Wärmedämmung 2 sind drei VIPs vorgesehen. Die Länge der VIPs im Simulationsmodell entspricht jeweils der Länge des zylindrischen Teils des WWS und reicht demnach vom obersten Rand des unteren Klöpperbodens bis zum untersten Rand des oberen Klöpperbodens. Direkt an der Speicher-Außenwand anliegend befindet sich das PFV-LD, wobei diesem die eff. WLF von komprimiertem PFV-LD-San-K $\lambda_{PFV-LD-San-K}$ zugewiesen wird, da das PFV-LD von 20 mm auf 10 mm komprimiert wird. Die Dämmdicke des PUR wird für die einzelnen Speichervolumina so ausgelegt, dass die Gesamt-Dämmdicke 169 mm beträgt, um die nach Anforderungskatalog maximale Dämmdicke am Mantel um 1 mm zu unterschreiten. Diese Unterschreitung hat auch den Zweck, dass in der Fertigung noch eine 1 mm-dicke Kunststoffbahn außen zum Schutz des PUR vorgesehen wird. Diese wird im Simulationsmodell jedoch nicht berücksichtigt, da ein nur sehr geringer Genauigkeitsgewinn vergleichsweise hohen Rechenzeiten entgegensteht.

Es werden analog zu Wärmedämmung 1 die Bodendämmung 1 und Bodendämmung 2 angenommen, siehe Abbildung 2-32. Auch die Deckeldämmung 1 und Deckeldämmung 2 werden simuliert, siehe Abbildung 2-33. Neben den Deckeldämmungen aus PFV werden auch Simulationen zu einer Deckeldämmung aus PUR durchgeführt. Diese Variante ist in Abbildung 2-37 dargestellt, wobei die PUR-Deckeldämmung in Gelb dargestellt ist.

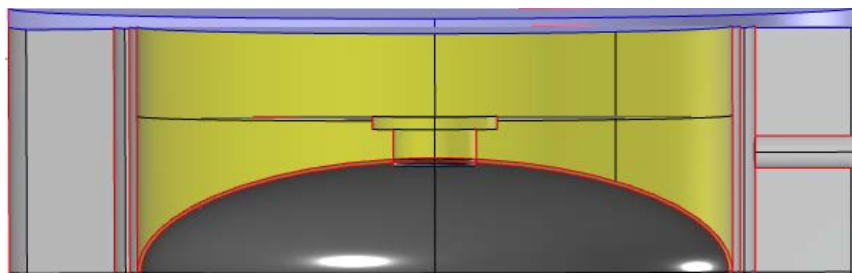


Abbildung 2-37: Deckeldämmung 5 im Simulationsmodell bei Wärmedämmung 2

Es wird, analog zu den übrigen Deckeldämmungen, eine Abdeckung aus PFV-HD mit einer Dicke von 25 mm vorgesehen. Die Gesamthöhe der Manteldämmung beträgt 2300 mm für

den 950 L-Speicher, wodurch die Höhe der Deckeldämmung vom obersten Punkt des oberen Klöpperbodens bis zum Abschluss der Manteldämmung 173 mm beträgt, was für alle Speichervolumina angenommen wird.

In Tabelle 2-12 sind die aus den Simulationen resultierenden Abmessungen der Wärmedämmstoffe sowie die simulierten Warmhalteverluste nach 0 und 25 Jahren Alterung der Wärmedämmstoffe dargestellt. Für eine höhere Sicherheit der Einhaltung der geforderten Warmhalteverluste, wird die konservativere eff. WLF des PUR $\lambda_{PUR,kons,25a}$ eingesetzt. Analog zu Wärmedämmung 1 wird die VIP-Dicke so gering wie möglich gehalten, um die speichervolumenbezogenen Dämmstoffkosten so gering wie möglich zu halten bei Sicherstellung der Erreichung von $S_{A,Sich}$. In Anhang B: Weitere Simulationsergebnisse zu den hocheffizienten Wärmedämmungen befinden sich Ergebnisse zu den Simulationsstudien mit weiteren VIP-Paneeldicken und der WLF $\lambda_{PUR,Norm,25a}$ für PUR. Außerdem befinden sich dort auch Simulationsstudien zur Deckeldämmung 5, welche stets geringere Wärmeverluste bewirkt als die Deckeldämmung 1, bei gleichbleibenden Rahmenbedingungen für die Boden- und Manteldämmung. Die Anforderung an die Wärmedämmung 2 ist es allerdings, $S_{A,Sich}$ auch mit der Bodendämmung 1 und Deckeldämmung 1 zu erreichen.

Tabelle 2-12: Dimensionierung und Simulationsergebnisse der Wärmedämmung 2

Speichervolumen	500 L	950 L	1500 L	2000 L
Manteldämmung	14,9 cm PUR 1 cm VIP 1 cm PFV-LD	14,4 cm PUR 1,5 cm VIP 1 cm PFV-LD	14,9 cm PUR 1 cm VIP 1 cm PFV-LD	13,9 cm PUR 2 cm VIP 1 cm PFV-LD
Bodendämmung	11 cm PFV-HD	10 cm PFV-HD	13 cm PFV-HD	13 cm PFV-HD
Deckeldämmung	17,3 cm PFV-HD	17,3 cm PFV-HD	17,3 cm PFV-HD	17,3 cm PFV-HD
Warmhalteverluste nach 0 a Alterung $S_{A,0a}$	46,85 W	57,95 W	68,76 W	72,85 W
Warmhalteverluste nach 25 a Alterung $S_{A,25a}$	55,69 W	71,02 W	85,06 W	91,20 W
$S_{A,25a} - S_{A,Sich}$	-2,07 W	-1,24 W	-0,03 W	-3,26 W
Relative Abweichung von der Kostengrenze	12,55 %	16,19 %	-27,32 %	-4,07 %

Die Aufteilung der Gesamtkosten auf die einzelnen Wärmedämmstoffe ist in Abbildung 2-38 dargestellt.

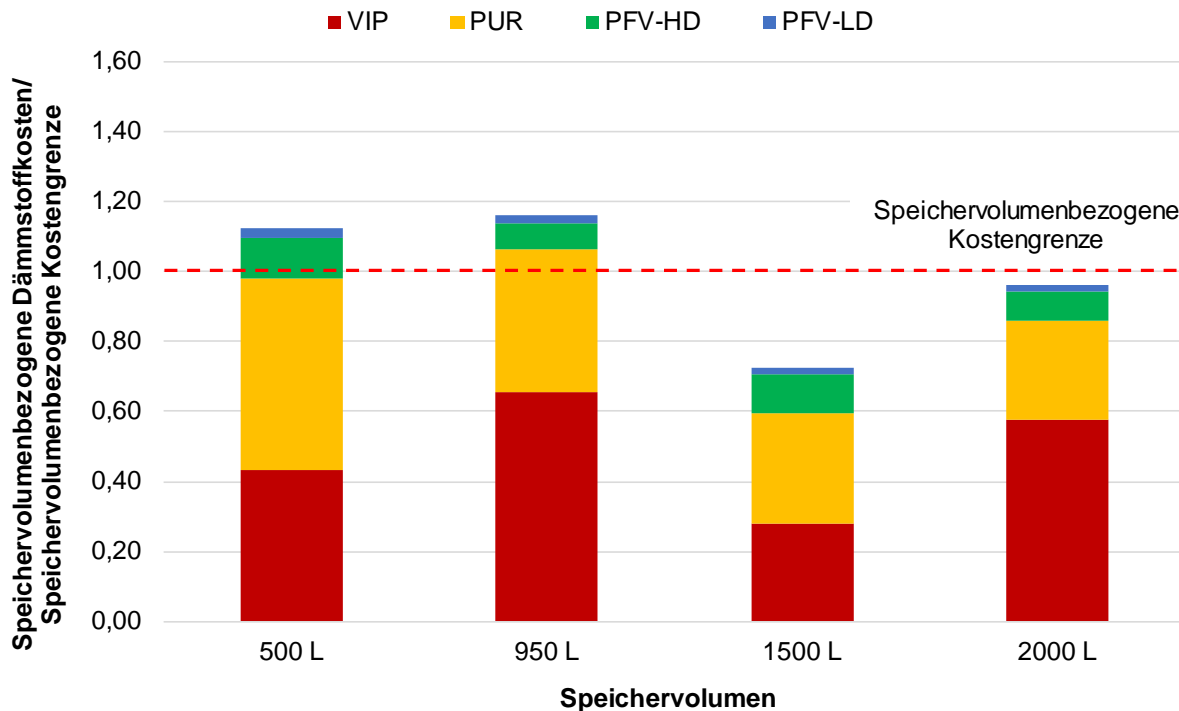


Abbildung 2-38: Relative Anteile der einzelnen Wärmedämmstoffe an den speichervolumenbezogenen Dämmstoffkosten für Wärmedämmung 2

Während bei Wärmedämmung 1 lediglich der 1.500 L-Speicher die Kostengrenze unterschreiten konnte, unterschreitet bei Wärmedämmung 2 zusätzlich der 2.000 L-Speicher die Kostengrenze. Auch die beiden Speichervolumina unter 1.500 L zeigen hier eine maximale Abweichung von der Kostengrenze von 16,19 %, während die Abweichung bei Wärmedämmung 1 noch bei maximal 50,40 % lag. Diese Abweichungen beziehen sich jeweils auf den Wert der Kostengrenze. Die Reduzierung der speichervolumenbezogenen Dämmstoffkosten von Wärmedämmung 2 im Vergleich zu Wärmedämmung 1 liegt an dem deutlich geringeren VIP-Volumen. Da PUR eine geringere WLF als GEPS aufweist und die WLF von reinen VIP geringer ist als die WLF von VQP ist diese geringere Dicke der VIP realisierbar.

2.1.6.3 Wärmedämmung 3

Der Aufbau des Simulationsmodells von Wärmedämmung 3 ist in Abbildung 2-39 als Schnittdarstellung für den 950 L-Speicher zu sehen. Auch hier sind alle senkrechten und waagerechten Linien keine Schnittkanten für die Unterteilung der Manteldämmung in mehrere Segmente, sondern Unterteilungen von Gebieten im Simulationsmodell. Die im Anforderungskatalog geforderte maximale Gesamtdicke der Wärmedämmung am Speichermantel von 17 cm resultiert aus der Forderung einer Maximallänge der Anschlüsse von 20 cm. Damit könnten die An-

schlüsse zum Anschluss von hydraulischen Leitungen um mindestens 3 cm aus der Wärmedämmung herausragen. Es reicht also aus, wenn diese maximale Gesamtdicke im Bereich der Anschlüsse eingehalten wird. Dies gelingt beispielsweise über die in Abbildung 2-39 gezeigten Abflachungen der Manteldämmung. Beim verwendeten Prototyp-Speicher (siehe Abbildung 2-41) sind in Umfangsrichtung an zwei Stellen hydraulische Anschlüsse vorgesehen. Daher wurden im Simulationsmodell an zwei Stellen Abflachungen vorgenommen, obwohl dort zur Vereinfachung sämtliche hydraulischen Anschlüsse an einer Stelle in Umfangsrichtung modelliert wurden. Um die Masse eines Elements der Manteldämmung auf ≤ 25 kg zu begrenzen, kann ggf. die Anzahl der Manteldämmungselemente erhöht werden.

Die Manteldämmung besteht bei der Wärmedämmung 3 nur aus PUR und PFV-LD. Für PFV-LD wurde die WLF $\lambda_{PFV-LD-San-K}$, analog zu Wärmedämmung 2, verwendet. Für die WLF von PUR im ungealterten Zustand wurde $\lambda_{PUR,40,0a}$ und im gealterten Zustand sowohl $\lambda_{PUR,kons,25a}$ als auch $\lambda_{PUR,Norm,25a}$ eingesetzt. Bei der Wärmedämmung 3 wurde die Bodendämmung 1 und Bodendämmung 2 simuliert, sowie die Deckeldämmungen 1, 2 und 5, siehe Abbildung 2-32, Abbildung 2-33 und Abbildung 2-37. Die Höhe der Manteldämmung beträgt für den 950 L-Speicher 2.300 mm, analog zu Wärmedämmung 2, womit auch die Höhe der Deckeldämmung für alle Speichervolumina 173 mm beträgt.

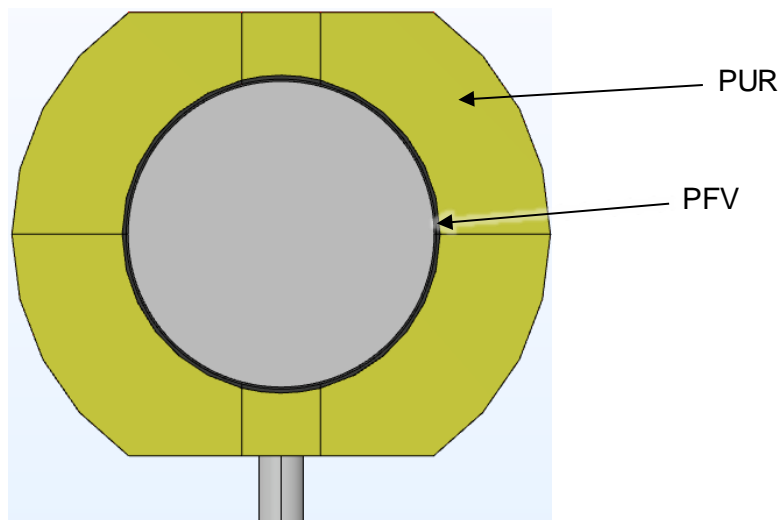


Abbildung 2-39: Wärmedämmung 3 im Simulationsmodell als Schnittdarstellung für den 950 L-Speicher

Da in Wärmedämmung 3 keine VIP vorhanden sind, wird hierbei die Dämmdicke des PUR bestimmt, welche benötigt wird, um Wärmeverluste $\leq S_{A,Sich}$ zu erhalten. Dabei wurden die Dämmdicken im konservativsten Fall (WLF PUR: $\lambda_{PUR,kons,25a}$, Bodendämmung 2 und Deckeldämmung 2) sowie im am wenigsten konservativen Fall (WLF PUR: $\lambda_{PUR,Norm,25a}$, Bodendämmung 1 und Deckeldämmung 5) ermittelt. Die Ergebnisse dieser Simulationen sind beispielhaft für den 950 L-Speicher in Tabelle 2-13 dargestellt.

Tabelle 2-13: Notwendige Dämmdicke von PUR für Wärmedämmung 3 in Abhängigkeit von der WLF des gealterten PUR und der Boden- und Deckeldämmung für den 950 L-Speicher

Dicke PUR in cm	WLF PUR	Variante Bodendämmung	Variante Deckeldämmung	Wärmeverluste S in W	$S_{A,25a} - S_{A,Sich}$ in W
17	Norm	Bodendämmung 1	Deckeldämmung 5	71,06	1,20
18	Norm	Bodendämmung 2	Deckeldämmung 2	71,46	0,80
20	Kons.	Bodendämmung 1	Deckeldämmung 5	71,91	0,35
24	Kons.	Bodendämmung 2	Deckeldämmung 2	72,03	0,23

Es ist zu erkennen, dass ein Unterschied von 7 cm Dämmdicke zwischen der konservativsten Annahme und der am wenigsten konservativen Annahme auftritt. Dadurch ergeben sich auch Unterschiede in den speichervolumenbezogenen Dämmstoffkosten von 24,41 % bezogen auf die konservativste Annahme. Außerdem wäre die Gesamtmasse der PUR-Dämmung, bei einer Annahme der PUR-Dichte von 40 kg/m³, mit 24 cm Dämmdicke auch um 18,76 kg höher als mit einer PUR-Dämmung von 17 cm. Dies führt zu einer höheren notwendigen Anzahl an Manteldämmelementen und somit zu höherem Herstellungsaufwand sowie Nachteilen beim Transport und bei der Anbringung der Manteldämmung.

Zur Simulation der weiteren Speichervolumina wurde die WLF des gealterten PUR als konservativ angenommen ($\lambda_{PUR,kons,25a}$). Zudem wurden Bodendämmung 1 und Deckeldämmung 1 gewählt. Die Ergebnisse der Dimensionierung von Wärmedämmung 3 sind in Tabelle 2-14 aufgelistet.

Tabelle 2-14: Dimensionierung und Simulationsergebnisse der Wärmedämmung 3

Speichervolumen	500 L	950 L	1500 L	2000 L
Manteldämmung	17 cm PUR 1 cm PFV-LD	20 cm PUR 1 cm PFV-LD	18 cm PUR 1 cm PFV-LD	22 cm PUR 1 cm PFV-LD
Bodendämmung	11 cm PFV-HD	10 cm PFV-HD	13 cm PFV-HD	13 cm PFV-HD
Deckeldämmung	17,3 cm PFV-HD	17,3 cm PFV-HD	17,3 cm PFV-HD	17,3 cm PFV-HD
Warmhalteverluste nach 0 a Alterung $S_{A,0a}$	51,12 W	62,98 W	70,54 W	79,64 W

Speichervolumen	500 L	950 L	1500 L	2000 L
Warmhalteverluste nach 25 a Alterung $S_{A,25a}$	57,71 W	72,05 W	84,45 W	91,85 W
$S_{A,25a} - S_{A,Sich}$	-0,05 W	-0,21 W	-0,64 W	-2,61 W
Relative Abweichung von der Kostengrenze	-22,25 %	-35,92 %	-49,88 %	-48,47 %

Tabelle 2-14 zeigt, dass für jedes Speichervolumen die Kostengrenze für die speichervolumenbezogenen Dämmstoffkosten unterschritten wird. Außerdem ist zu sehen, dass die speichervolumenbezogenen Dämmstoffkosten tendenziell mit steigendem Speichervolumen sinken. Dies kann auf die für die betrachteten Speichergeometrien geringeren Oberflächen/Volumen-Verhältnissen der größeren Speicher zurückgeführt werden. In Abbildung 2-40 sind die Anteile der einzelnen Wärmedämmstoffe an den speichervolumenbezogenen Kosten aufgetragen.

Da bei Wärmedämmung 3 keine VIP zum Einsatz kommen, werden die Kosten nun durch das PUR dominiert. Da dieses allerdings deutlich kostengünstiger als VIP ist, kann auch die Kostengrenze deutlich unterschritten werden. In Anhang B: Weitere Simulationsergebnisse zu den hocheffizienten Wärmedämmungen befinden sich weitere Simulationsergebnisse zur Wärmedämmung 3, mit unterschiedlichen Kombinationen aus Boden- und Deckeldämmung sowie Warmhalteverluste bei der WLF von gealtertem PUR nach Norm ($\lambda_{PUR, Norm, 25a}$). Die notwendigen Dämmdicken sind dabei stets mit aufgeführt.

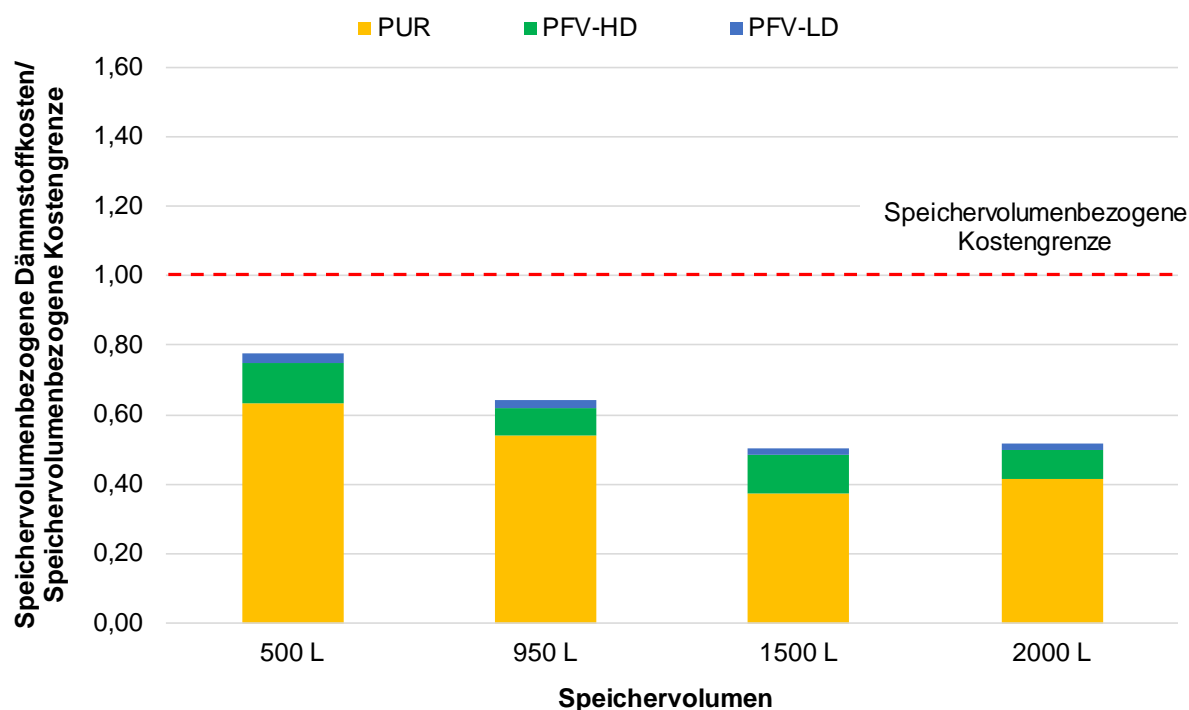


Abbildung 2-40: Relative Anteile der einzelnen Wärmedämmstoffe an den speichervolumenbezogenen Dämmstoffkosten für Wärmedämmung 3.

2.1.6.4 Fazit Simulationsergebnisse

Mit der Wärmedämmung 3 konnte die EEK A nach 25 a Alterung mit den geringsten Dämmstoffkosten erreicht werden, gefolgt von Wärmedämmung 2. Wärmedämmung 1 besitzt die höchsten Dämmstoffkosten. Die Kostenziele beziehen sich jedoch nur auf die Wärmedämmung und beachten weder den Platzbedarf im Aufstellraum des Speichers noch zusätzlichen Aufwand in der Logistik und Fertigung (Formenbau, Beherrschen der Qualität bei großen Schaumdicken). Auch aus Marktsicht ist eine Vergrößerung der heute üblichen Durchmesser um 15-20 cm wenig attraktiv. Für die weiteren Untersuchungen fiel die Entscheidung auf die Fertigung und Prüfung der Wärmedämmungen 1 und 2, da auch diese nahe am Kostenziel liegen oder dieses unterschreiten. Außerdem wird der Erkenntnisgewinn bei einer Fertigung und Prüfung eines Funktionsmusters von Wärmedämmung 3 als am geringsten angesehen.

2.2 Entwicklung eines Sorptionskollektors

Dieser Arbeitspunkt wird ausschließlich von den österreichischen Projektpartnern bearbeitet.

2.3 Funktionsmusterbau und -tests; Speicher

Wie in Kapitel 2.1.6.4 begründet, wurden zu den Wärmedämmungen 1 und 2 Funktionsmuster konstruiert und gefertigt. Diese wurden anschließend am in Abbildung 2-41 gezeigten Prototyp-Speicher angebracht und es wurden daraufhin Prüfungen der Warmhalteverluste gemäß DIN EN 12897:2020 durchgeführt.

2.3.1 Prototyp-Speicher

Als Prototyp-Speicher wurde der kommerziell verfügbare WWS Vitocell 340-M SVKC von VCS mit einem Speichervolumen von 950 L eingesetzt, der auch bereits für die Validierungsmessungen verwendet wurde, siehe Kapitel 2.1.5.7. An diesem WWS wurden im Vergleich zum Vitocell 340-M SVKC in Standardausführung folgende Anpassungen vorgenommen:

- Anbringung eines Stutzens am Behälterdeckel, um einen Heizstab für die Messung der Warmhalteverluste in der gewünschten Höhe zu platzieren
- Entfernung von Gewindestiften und anderen angeschweißten Teilen zur Befestigung von Klemmleisten für Temperatursensoren oder von Frischwasserstationen, um eine Anbringung von VIPs möglichst nahe an der Behälterwand gewährleisten zu können
- Verlängerungen der hydraulischen Anschlüsse aufgrund der im Vergleich zur Standard-Wärmedämmung des WWS höheren Dicke der Funktionsmuster-Manteldämmungen

Der Prototyp-Speicher mit den oben genannten Anpassungen im Vergleich zum kommerziell vertriebenen Produkt ist in Abbildung 2-41 dargestellt.

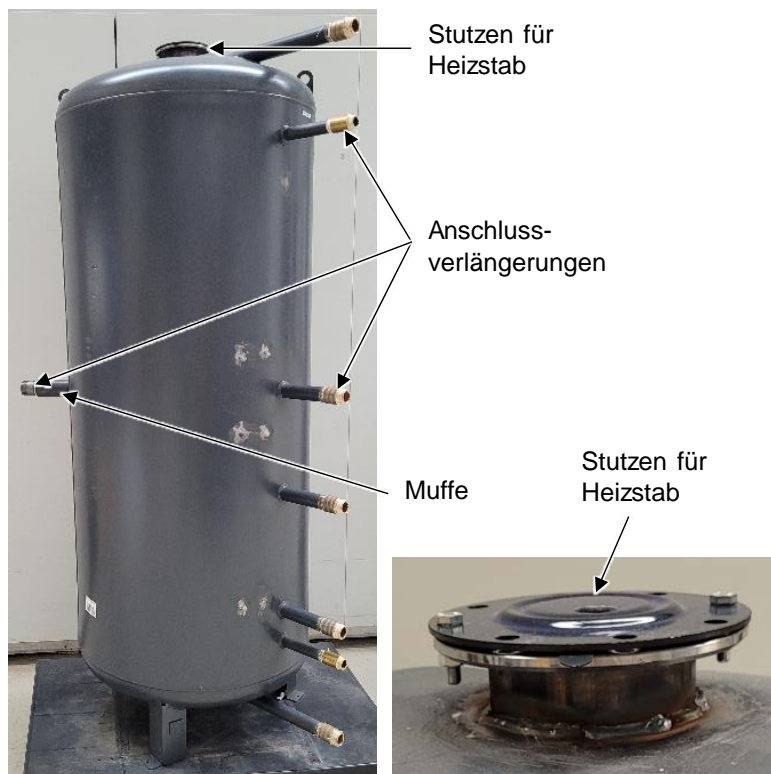


Abbildung 2-41: Prototyp-Speicher zur Prüfung der Warmhalteverluste mit Funktionsmuster-Wärmedämmungen

2.3.2 Wärmedämmung 1

2.3.2.1 Boden- und Deckeldämmung

Aus PFV-HD wurde eine Boden- und Deckeldämmung konstruiert und als Prototyp händisch gefertigt. Ziel dieser Entwicklung ist die Realisierung von Wärmedämmungs-Segmenten, welche sich möglichst passgenau an die Geometrie der Klöpperböden des Prototyp-Speichers anbringen lassen können. Da PFV-HD eine deutlich geringere WLF als das PFV-LD von VCS, welches derzeit von VCS als Standard-Bodendämmung verwendet wird, aufweist, sind geringere Wärmeverluste durch eine Boden- und Deckeldämmung aus PFV-HD zu erwarten.

Bodendämmung aus PFV-HD

Die Bodendämmung aus PFV-HD ist in Abbildung 2-42 links zu sehen. In Abbildung 2-42 rechts ist schematisch die Unterseite des Prototyp-Speichers als dunkelgraue Kreisscheibe dargestellt. Die Standfüße des Prototyp-Speichers sind im Schnitt als weiße, durchgezogene Linien zu sehen. Die weißen, gestrichelten Linien dienen der Abgrenzung der Bereiche am unteren Klöpperboden des Prototyp-Speichers, in welche die drei Segmente der Bodendämmung geschoben werden. So wird Teil 1 an Position 1, Teil 2 an Position 2 und Teil 3 an Position 3 geschoben.

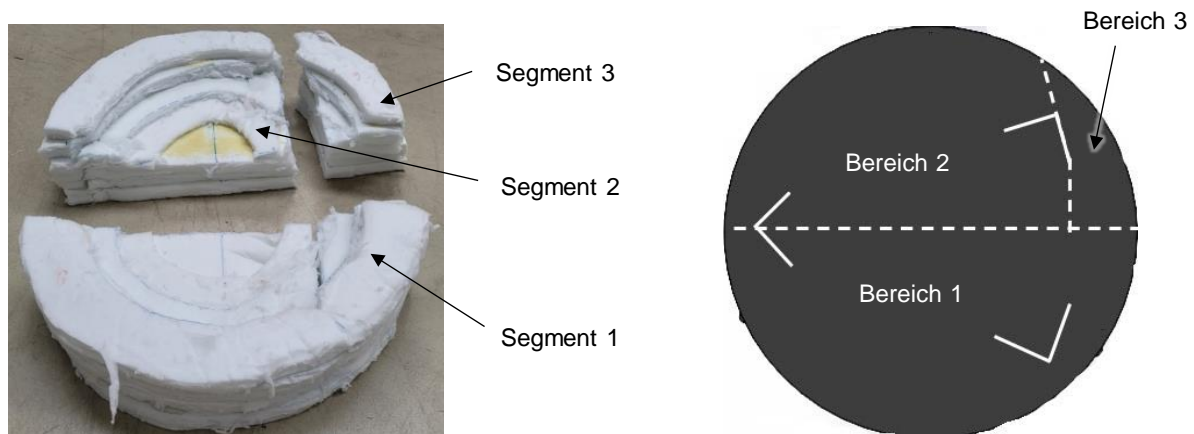


Abbildung 2-42: Draufsicht der dreiteiligen PFV-HD Bodendämmung (links) und die schematische Anordnung der einzelnen Segmente der Bodendämmung am Prototyp-Speicher (rechts)

Um aus den PFV-HD-Matten eine Bodendämmung herstellen zu können, wurde zunächst ein CAD-Modell erstellt, bei der die Kontur des unteren Klöpperbodens des Prototyp-Speichers aus einem Vollzylinder ausgeschnitten wurde. So ist beispielsweise die Kontur der Standfüße und die Bohrung für den hydraulischen Anschluss deutlich sichtbar. Auf Basis dieses CAD-Modells und einer Zeichnungsableitung (siehe Abbildung 2-43) wurden Segmente aus den 40 mm-dicken PFV-HD-Matten ausgeschnitten, bearbeitet und die Bodendämmung schichtweise aufgebaut. Die einzelnen Schichten wurden dann über eine Klebung miteinander verbunden. Insgesamt besteht die Bodendämmung aus mindestens drei Teilen, wobei ein viertes Teil unter den drei Komponenten als ununterbrochene Schicht aus PFV-HD vorgesehen wer-

den kann, um einen durchgehenden Spalt, welcher durch ein unzureichendes Zusammenfügen der einzelnen Segmente der Bodendämmung entstehen könnte, vom Klöpperboden zum Untergrund zu vermeiden. Dieses vierte Teil füllt dann die Höhe der Nivellierfüße aus. Die anderen drei Teile der Bodendämmung weisen jeweils Aussparungen für die Standfüße in Form von Einschnitten auf. Durch diese Aussparungen gelingt eine einfache Montage der Bodendämmung an den unteren Klöpperboden des Prototyp-Speichers. Eine weitere Aussparung durch einen weiteren Einschnitt wurde für den hydraulischen Anschluss (Abbildung 2-43 (2)) am unteren Teil des Prototyp-Speichers in der CAD-Zeichnung berücksichtigt.

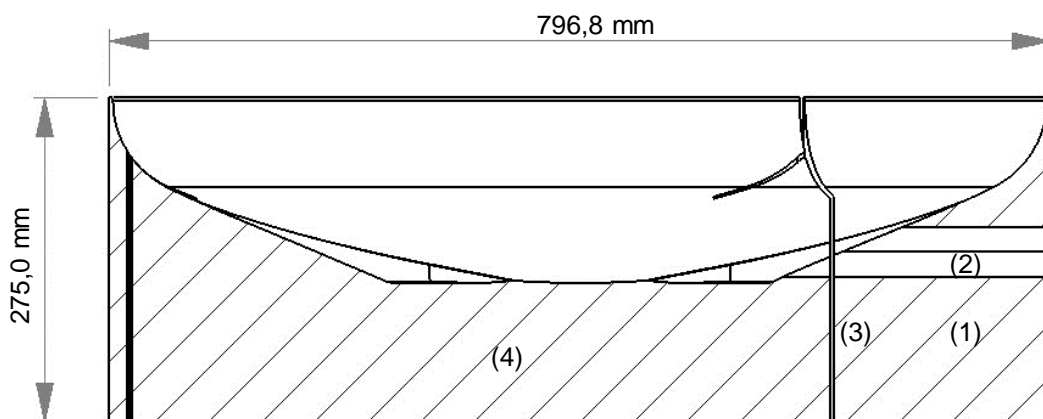
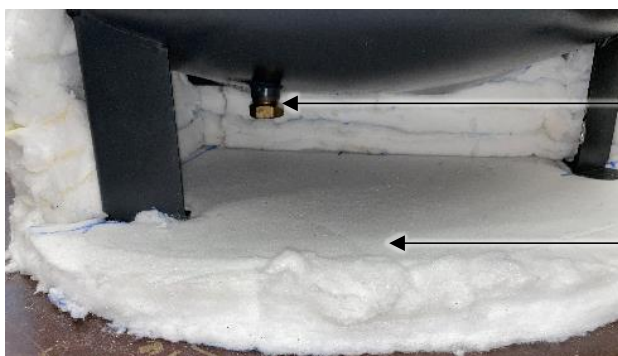


Abbildung 2-43: Schnittdarstellung des CAD-Modells der PFV-HD Bodendämmung (schraffiert).

In Abbildung 2-43 sind auch die Hauptabmessungen der Bodendämmung (schraffierter Bereich) dargestellt. Auch die Aussparungen für die Standfüße (3) sind gut sichtbar für Teil 2 (4) und Teil 3 (1). Für eine mögliche Serienfertigung wäre auch eine zweiteilige Ausführung denkbar. Aufgrund der Schwierigkeit der händischen Bearbeitung des PFV-HD zu exakt passenden Hälften wurde ein drittes Teil erstellt, um mit diesem auftretende Ungenauigkeiten bei der Montage zu erkennen und auszubessern. Ein Blick in die Bodendämmung ohne Segment 2 ist in Abbildung 2-44 zusammen mit der untersten Schicht aus PFV-HD (Segment 4) dargestellt.

Der senkrechte Anschluss am unteren Klöpperboden wurde in der CAD-Konstruktion der Bodendämmung aus PFV-HD nicht berücksichtigt. Allerdings wurde in das physische Teil 2 eine Aussparung dafür vorgesehen.



Senkrechter Anschluss
am unteren
Klöpperboden

Segment 4

Abbildung 2-44: Segmente 1, 3 und 4 der Bodendämmung aus PFV-HD am Prototyp-Speicher

Deckeldämmung aus PFV-HD

Analog zur Bodendämmung wurde auch für die Deckeldämmung ein CAD-Modell erstellt, bei welchem die Kontur des oberen Klöpperbodens aus einem Vollzylinder ausgeschnitten wurde und bei welchem die erstellte Zeichnung als Basis für die Fertigung der Deckeldämmung dient. Die Deckeldämmung besteht aus zwei Segmenten, siehe Abbildung 2-45. Die Innendurchmesser der einzelnen Ringsegmente in Segment 1 sind dabei an die Kontur des oberen Klöpperbodens des Prototyp-Speichers angepasst. Außerdem befinden sich in Segment 1 Aussparungen für die Ösen, mit welchem der Prototyp-Speicher beispielsweise an einem Kran bewegt werden kann, sowie für den oberen hydraulischen Anschluss. Durch diese Aussparungen kann Segment 1 passgenau auf den oberen Klöpperboden montiert werden. An Segment 1 schließt Segment 2 an, welches eine Aussparung für den Flansch aufweist.

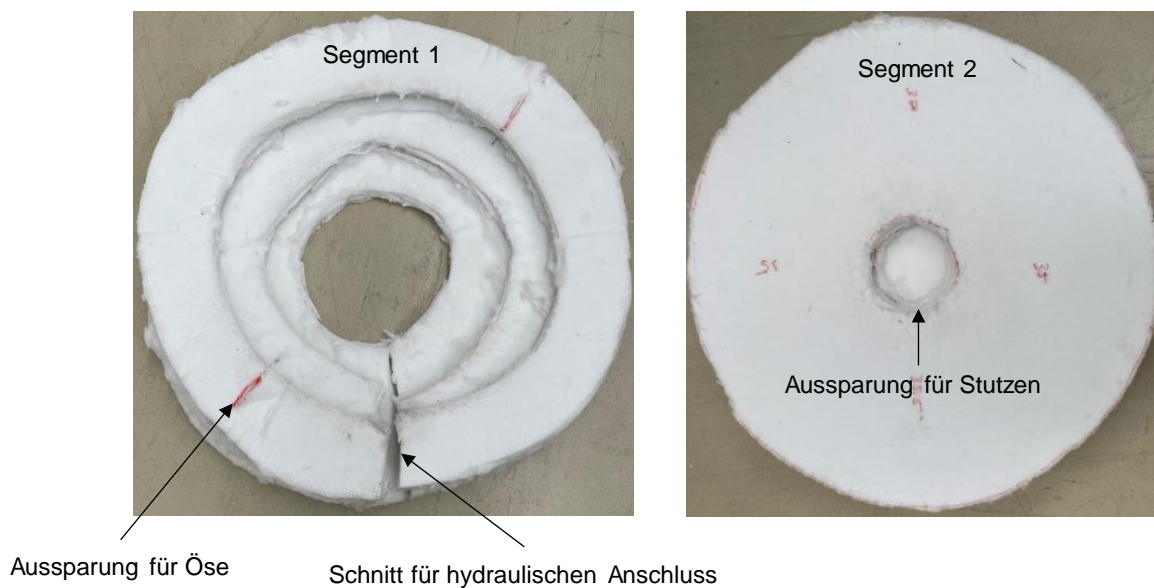


Abbildung 2-45: Segment 1 (links) und Segment 2 (rechts) der Deckeldämmung aus PFV-HD

2.3.2.2 Manteldämmung

Abbildung 2-46 zeigt den Aufbau der Manteldämmung der Wärmedämmung 1 in einer CAD-Zeichnung als Draufsicht.

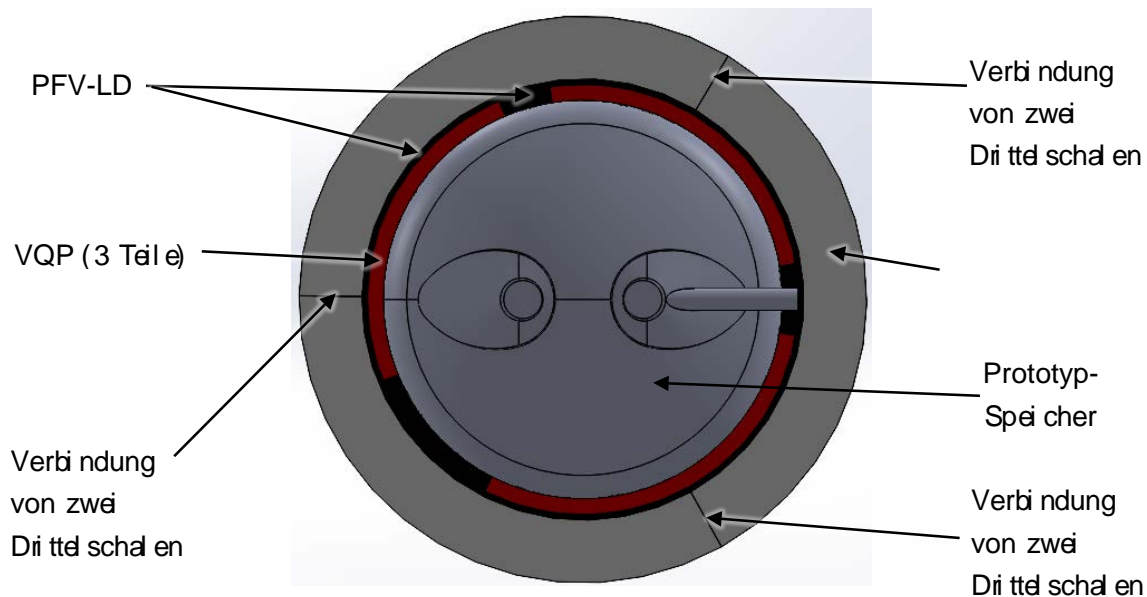


Abbildung 2-46: Draufsicht der Manteldämmung der Wärmedämmung 1

Die Wärmedämmung 1 wurde in Kooperation mit dem Unternehmen Neveon entworfen. Die VQP wurden vom Unternehmen va-Q-tec beschafft. Die Fertigung der GEPS-Manteldämmung erfolgte durch Neveon und wurde als dreiteilige Manteldämmung konzipiert. Die VQP werden direkt auf die Speicherwand aufgeklebt. Zwei der drei VIPs in den VQP weisen die Maße 1665 mm x 640 mm x 30 mm, und das dritte VIP die Maße 1665 mm x 770 mm x 30 mm auf. Die nötige Dicke der VQP wurde durch eine Simulationsstudie der Wärmedämmung 1 bestimmt (siehe Kapitel 2.1.6.1). Zum Schutz der VIP wird eine beidseitige vollflächige 2 mm-dicke PE-Schaumkaschierung vorgesehen. Die VQP weisen Laschen an den Rändern mit einer Breite von 40 mm und einer Dicke von ca. 4 mm auf, bestehend aus der Folienumhüllung der VIPs und der PE-Schaumkaschierung. In den Bereichen direkt an der Außenwand des Prototyp-Speichers, an welchen aufgrund der hydraulischen Anschlüsse keine VQP angebracht werden können, wird PFV-LD eingesetzt. Die Biegsamkeit der GEPS-Drittelschalen wird durch Rillen im GEPS gewährleistet, wie Abbildung 2-47 zeigt.

Die Dicke des PFV an der Mantelfläche beträgt 20 mm. Es wird davon ausgegangen, dass sich dieses aber bei der Montage auf ca. 10 mm komprimieren wird. Die Dicke der GEPS-Schicht beträgt 125 mm, womit die Gesamtdicke der Manteldämmung 169 mm beträgt und demnach die geforderte maximale Dämmdicke von 170 mm unterschreitet. Die Gesamthöhe der Manteldämmung der Wärmedämmung 1 ist mit 2315 mm ebenfalls unter der maximalen Höhe von 2400 mm aus dem Anforderungskatalog. Das Verbinden der Drittelschalen untereinander erfolgt durch Klemmleisten. An den Stirnflächen der Drittelschalen wird PFV-LD angebracht, welches die Dichtigkeit an den Verbindungsstellen gewährleistet. Die Montage der Wärmedämmung 1 wird im Folgenden mithilfe von Abbildung 2-48 beschrieben.

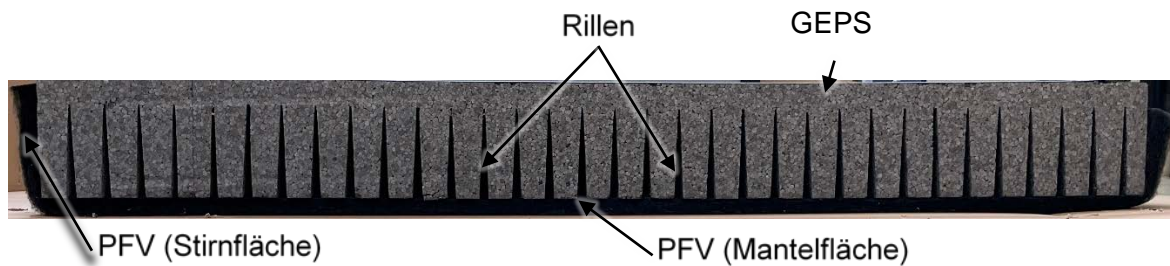


Abbildung 2-47: Manteldämmungselement aus GEPS und PFV für Wärmedämmung 1

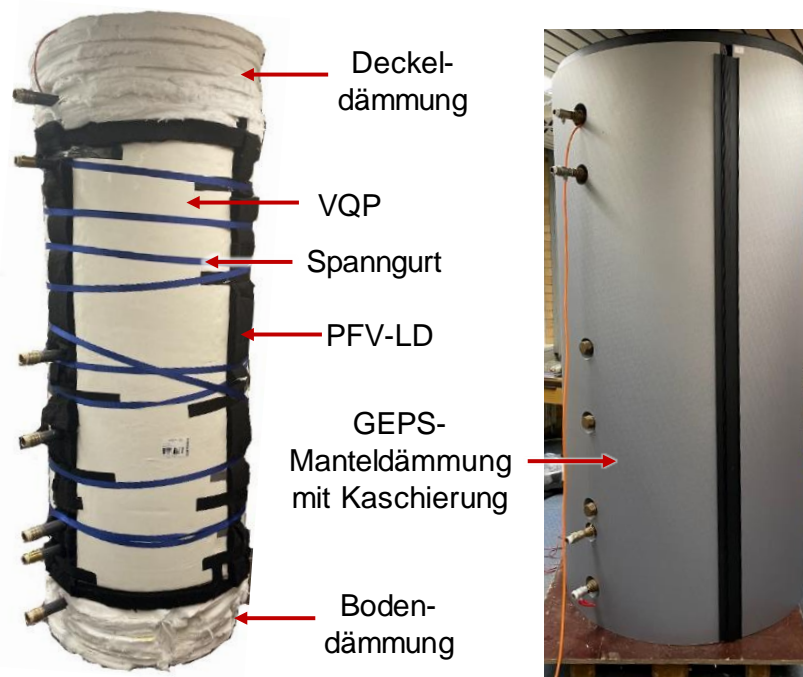


Abbildung 2-48: Aufbau der Wärmedämmung 1 am Prototyp-Speicher

Zunächst wurden die VQP an den Mantel des Prototyp-Speichers geklebt. An den Bereichen des Speicher-Mantels ohne VIP innerhalb der VQP wurde PFV-LD angebracht. Für eine vereinfachte Montage wäre ein Anbringen dieser PFV-LD-Elemente an den Innenflächen der GEPS-Manteldämmungssegmente möglich. Aufgrund der mit 30 mm vergleichsweise hohen Dicke, wiesen die VIP in den VQP eine vergleichsweise hohe Biegesteifigkeit auf. Zudem war ggf. die nötige Vorbiegung der VQP vor der Montage nicht ausreichend. Daher lösten sich die VQP an den Rändern nach dem Aufkleben ab und sie mussten unplanmäßig über Spanngurte fixiert werden.

Anschließend wurden die Boden- und Deckeldämmung aus PFV-HD montiert und danach die Drittschalen aus GEPS und PFV, welche ebenso wie die VQP vorgebogen werden mussten, montiert. Die Hohlräume zwischen den Bohrungen für die Anschlüsse und den Anschlüssen wurden daraufhin mit PFV-LD gefüllt.

Sowohl das Anbringen der VQP als auch der GEPS-Segmente war vergleichsweise kraft- und zeitaufwendig

2.3.2.3 Ergebnisse der Speicherprüfung und Abgleich mit Simulationsergebnissen

Die Speicherprüfungen zur Bewertung der Wärmedämmung 1 wurden gemäß DIN EN 12897:2020 mit Hilfe des Prototyp-Speichers durchgeführt. Dabei wurde ein zusätzlicher Dämmring aus PFV-HD auf die Stirnseite der Manteldämmung gelegt, um Kamineffekte durch die verbleibenden Hohlräume der Rillen im GEPS-Mantel zu verringern, siehe Abbildung 2-49.



Abbildung 2-49: Abdeckung der Hohlräume in der GEPS-Manteldämmung

Zusätzlich wurde die Option des Einlegens eines VIPs in die Deckeldämmung geprüft, entsprechend Deckeldämmungsvariante 4, siehe Abbildung 2-34 und Abbildung 2-50.

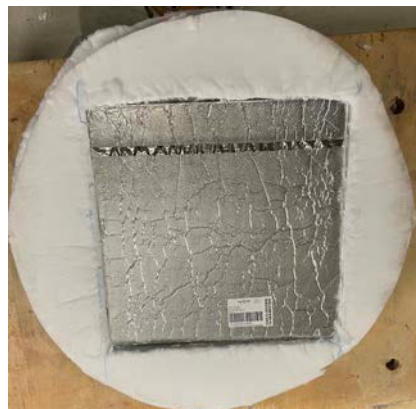


Abbildung 2-50: Deckeldämmung 4: VIP in eine Schicht von PFV-LD integriert

Das Ergebnis dieser Speicherprüfung sowie der Simulation mit analogem Aufbau zur Speicherprüfung ist in Tabelle 2-15 aufgeführt.

Tabelle 2-15: Ergebnisse der gemessenen und simulierten Warmhalteverluste des Prototyp-Speichers mit Wärmedämmung 1, bei Verwendung von Deckeldämmung 4 und Bodendämmung 1

	Speicherprüfung	Simulation
Warmhalteverluste S_A	66,20 W	65,44 W

Die Abweichung der Warmhalteverluste beträgt 0,76 W und damit nur 1,15 % bezogen auf das Ergebnis der Speicherprüfung. Eine mögliche Erklärung für die höheren Warmhalteverluste bei der Speicherprüfung gegenüber dem Simulationsergebnis sind weiterhin verbliebene Kamineffekte in den Hohlräumen in der GEPS-Manteldämmung. Zudem verblieben auch nach dem Anbringen der Spanngurte noch Hohlräume geringer Ausdehnung zwischen der Speicherwand und den VQP, besonders im Bereich der Laschen der VQP. Dort können ebenfalls Kamineffekte auftreten.

Um das Ergebnis der Speicherprüfung auf eine Nutzungsdauer von 25 Jahren, mit entsprechender Alterung der Wärmedämmstoffe, zu extrapolieren, wurden auf das Ergebnis der Simulation 0,76 W addiert, um den Unterschied zwischen der Simulation und der Speicherprüfung zu berücksichtigen. Die Simulation mit 25 a gealterten Wärmedämmstoffen für die Wärmedämmung 1 ergab danach Warmhalteverluste von 72,34 W. Demnach wird zwar $S_{A,Sich}$ von 72,26 W für EEK A um 0,08 W leicht überschritten, jedoch können die maximal zulässigen Wärmeverluste S_A für EEK A von 74,49 W um 2,15 W und damit 2,9 % unterschritten werden.

2.3.3 Wärmedämmung 2

Für die Wärmedämmung 2 werden im Wesentlichen PUR, VIP, PFV und Bahnen aus dem Kunststoff Polypropylen (PP) verwendet. Der Aufbau aus Mantel- und Deckeldämmung ist in Abbildung 2-51 abgebildet.

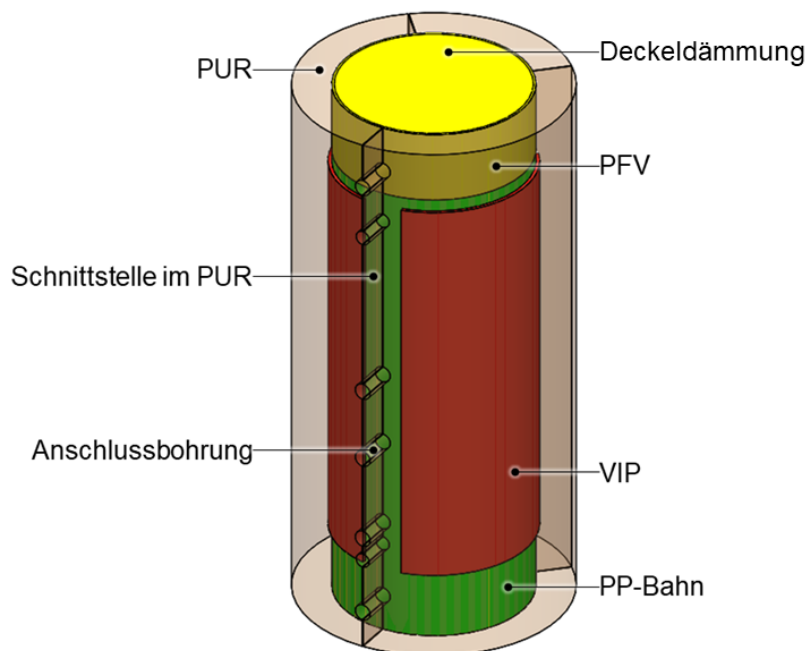


Abbildung 2-51: Aufbau der Wärmedämmung 2

PUR (beige, halbtransparent) ist der Hauptbestandteil des Volumens der Manteldämmung, welche eine Gesamthöhe von 2,3 m besitzt. Die drei VIP (rot) sind in das PUR eingebettet und die PP-Bahnen (grün) dienen zum Schutz der VIPs und liegen innen am PUR an. An die Innenseite der Manteldämmung sowie an den Schnittstellen wird PFV-LD-San vorgesehen. Für

die Boden- und Deckeldämmung (gelb) wird ebenfalls PFV-LD-San vorgesehen. Dieses besitzt eine annähernd gleich niedrige eff. ELF wie das bei der Wärmedämmung 1 verwendete PFV-HD, lässt sich allerdings aufgrund der größeren Flexibilität und Komprimierbarkeit einfacher im Bodenbereich zwischen den Standfüßen anbringen. Für den Deckel wird alternativ eine Wärmedämmung aus PUR hergestellt. Um eine abnehmbare Wärmedämmung realisieren zu können, wird der PUR-Mantel durch Schnitte in drei Segmente (Schalen) aufgeteilt. Einer dieser Schnitte verläuft durch die Bohrungen, welche für die Anschlüsse gesetzt werden müssen (Anschlussbohrungen), der zweite durch die Bohrung für die Muffe (in Abbildung verdeckt). Der dritte Schnitt wird so gesetzt, dass für zwei der Manteldämmungssegmente VIPs mit der gleichen Breite verwendet werden können.

Die Darstellung in Abbildung 2-52 zeigt die Draufsicht der Mantelwärmedämmung in Schnittdarstellung zur Verdeutlichung der Komponentenanzordnung. Der innenliegende Prototyp-Speicher (grau) ist hier vereinfacht als Vollkörper dargestellt. Das PFV (gelb) umgibt den gesamten WWS-Umfang, worauf die PP-Bahnen (aufgrund geringer Dicke nicht dargestellt) und darauf wiederum die drei VIP (rot) mit innenliegender Schaumkaschierung anliegen. Alle Komponenten werden von PUR (beige) umschlossen, welches in drei Schalen aufgeteilt ist.

Im Folgenden wird die Wärmedämmung 2 aufgeteilt nach Wärmedämmstoffen beschrieben.

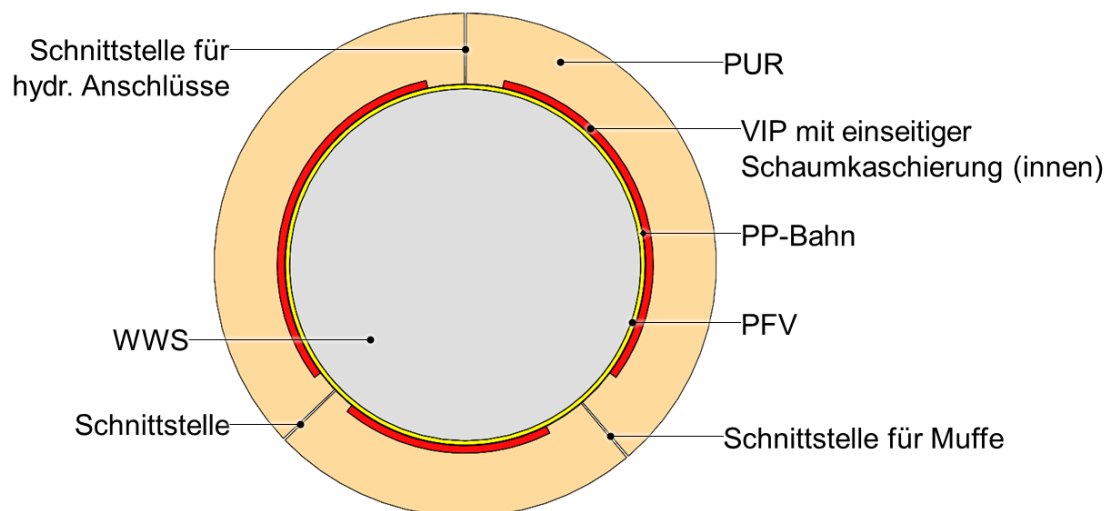


Abbildung 2-52: Draufsicht der Wärmedämmung 2 in Schnittdarstellung

2.3.3.1 Polyurethan-Hartschaum (PUR)

Die Einschäumung der Formen für Mantel- und Deckeldämmung mit PUR mit pentanbasiertem Treibmittel soll durch die Fa. BASF erfolgen, siehe Kapitel 2.3.3.5. Als Dichte des Schaums wird 40 kg/m^3 angestrebt.

Die Höhe der PUR-Manteldämmung erstreckt sich über 2,3 m. Innen- und Außendurchmesser ergeben sich zu 810 mm und 1130 mm, siehe Abbildung 2-53. An den Stellen der PP-Bahnen und der VIPs erhöht sich der Innendurchmesser entsprechend der PP- und VIP-Dicke und somit wird dort die PUR-Dicke reduziert. Die Aussparungen der VIP sind in Abbildung 2-53 erkennbar und bzgl. des Abstands der Unterkanten zum Boden und der Höhe bemaßt.

Für alle Anschlüsse des Prototyp-Speichers werden Durchgangsbohrungen im PUR hergestellt, die trotz unterschiedlicher Anschlussdurchmesser einen einheitlichen Durchmesser von 83 mm aufweisen. Dadurch werden Aufwand sowie Fehleranfälligkeit bei der Herstellung reduziert.

Um eine abnehmbare Wärmedämmung realisieren zu können, wird der PUR-Mantel durch drei Schnitte in drei Schalen aufgeteilt. Die Schnittstellen der Mantelwärmedämmung richten sich nach den hydraulischen Anschlüssen und der Muffe des Prototyp-Speichers, welche um 140° versetzt zu den Anschlüssen liegt. Ein weiterer Schnitt befindet sich um $133,9^\circ$ versetzt zur hydraulischen Anschlussseite in der entgegengesetzten Umfangsrichtung, siehe Abbildung 2-54.

Zudem wird eine Deckelwärmedämmung aus PUR hergestellt, welche an der Unterseite die Kontur des Speicherdeckels besitzt und oben mit der Manteldämmung abschließen soll. Diese wird ebenfalls in Kapitel 2.3.3.5 beschrieben.

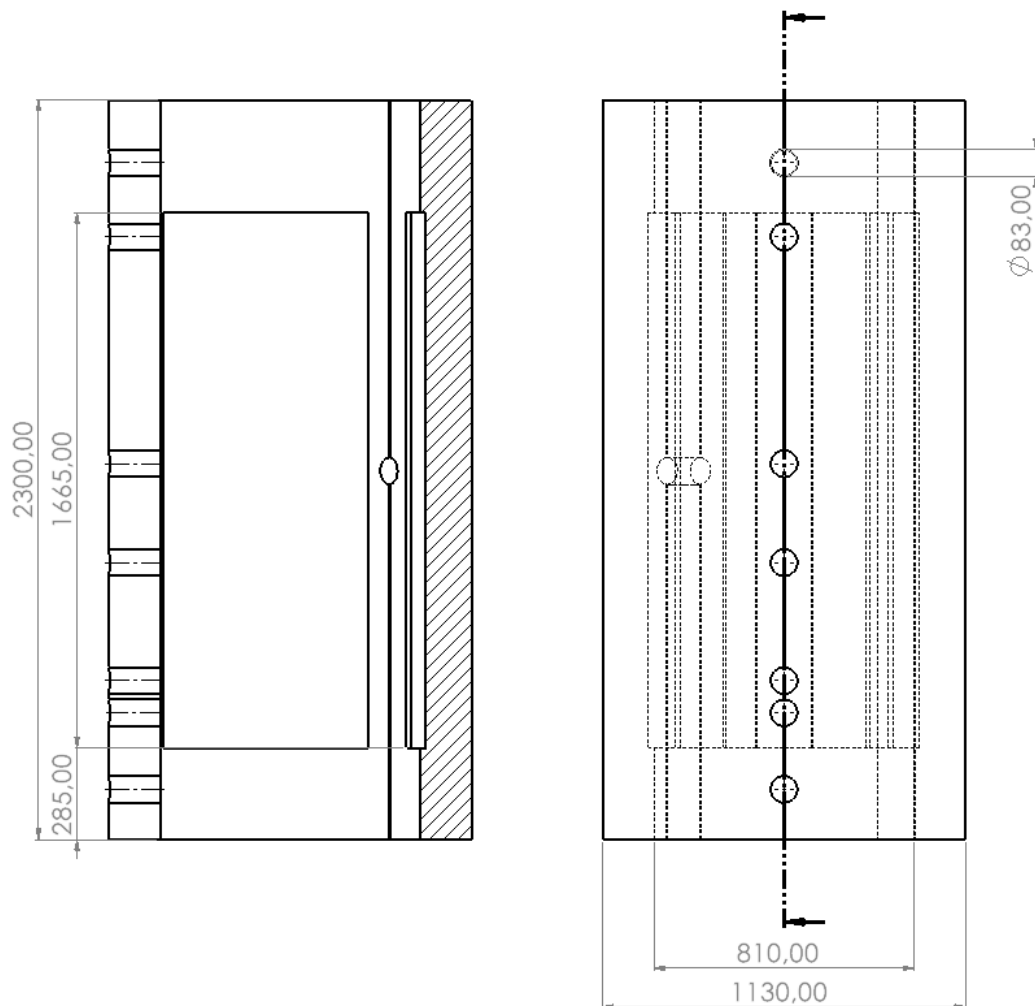


Abbildung 2-53: Maße des PUR-Anteils der Manteldämmung. Links: Schnittansicht; rechts: Vorderansicht mit Darstellung der verdeckten Kanten

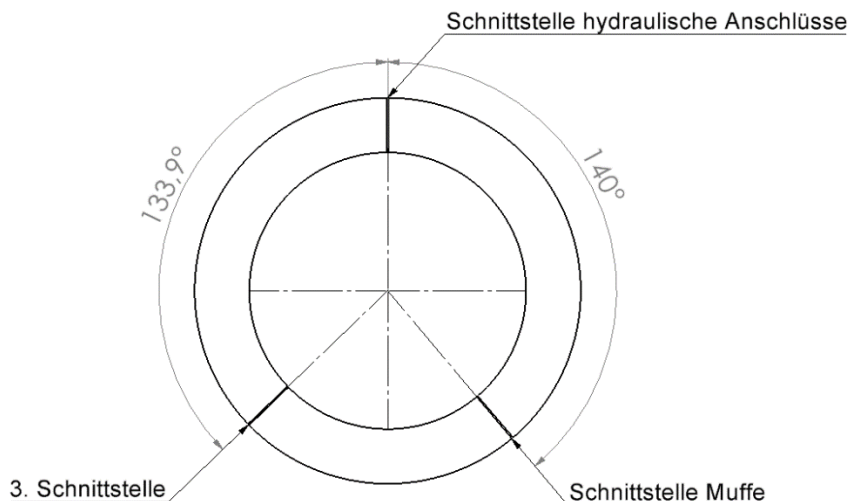


Abbildung 2-54: Position der Schnittstellen zur Unterteilung der Manteldämmung

2.3.3.2 Vakuumisolationspaneele (VIPs)

Für die Wärmedämmung 2 sollen drei selbstklebende, biegbare VIPs der Fa. Neveon eingesetzt werden, welche preisgünstiger in der Beschaffung sind als die va-Q-patches der Fa. va-Q-tec.

Die Höhe der drei VIPs ist in Abbildung 2-53 dargestellt und beträgt 1.665 mm. Sie erstreckt sich über die gesamte Mantelhöhe des Prototyp-Speichers. Damit werden die Paneele an der Stelle eingesetzt, wo ihre Dämmwirkung am effektivsten ist und durch ein verringertes Volumen werden zugleich Kosten eingespart.

Ebenfalls zur Kosteneinsparung und um die Dämmanforderungen der gefragten Effizienzklasse über 25 Jahre einhalten zu können, wurde die VIP-Dicke auf Basis der Simulationsstudien (siehe Kapitel 2.1.6.2) auf 15 mm festgelegt. Hinzu kommt eine PE-Schaumkaschierung von 2 mm, die sich an der Innenseite, d. h. in Richtung des Prototyp-Speichers, befindet. Diese enthält die Klebefläche und dient der besseren Klebbarkeit an unebenen Oberflächen sowie dem Schutz der VIP vor mechanischer Beschädigung beim Ankleben.

Die Breitenmaße der einzelnen VIPs richten sich primär nach den Anschlüssen des Prototyp-Speichers und den dazu vorzunehmenden Bohrungen im PUR. Das Breitenmaß für das erste VIP ergibt sich aus der hydraulischen Anschlussseite und der Schnittstelle für die Muffe. U. a. um die Fehleranfälligkeit bei der Positionierung der VIPs zu reduzieren, wird für das zweite VIP die gleiche Breite gewählt. Das Breitenmaß des dritten VIP wird an die übrige Umfangslänge angepasst. So ergeben sich die folgenden Maße (Höhe x Breite x Dicke):

- 1665 x 830 x 15 mm (2x)
- 1665 x 475 x 15 mm (1x)

Dabei wird außerdem berücksichtigt, dass der PUR nach der Aufschäumung per Hand geschnitten wird. Um einer Beschädigung der eingebetteten VIP durch evtl. auftretende Fertigungsfehler und eventuelle Ungenauigkeiten im Schnitt entgegenzuwirken, werden Sicherheitsabstände zwischen Bohrung und VIP eingeplant, welche min. 50 mm betragen sollen. Die entsprechenden Abstände zwischen den VIPs können Abbildung 2-55 entnommen werden.

Die verschweißten Laschen der VIP werden vom Hersteller in Richtung der Schaumkaschierung umgeklappt. Dies ist eine Vorsichtsmaßnahme, um einer Beschädigung durch die hohen auftretenden Temperaturen beim Aufschäumen entgegenzuwirken.

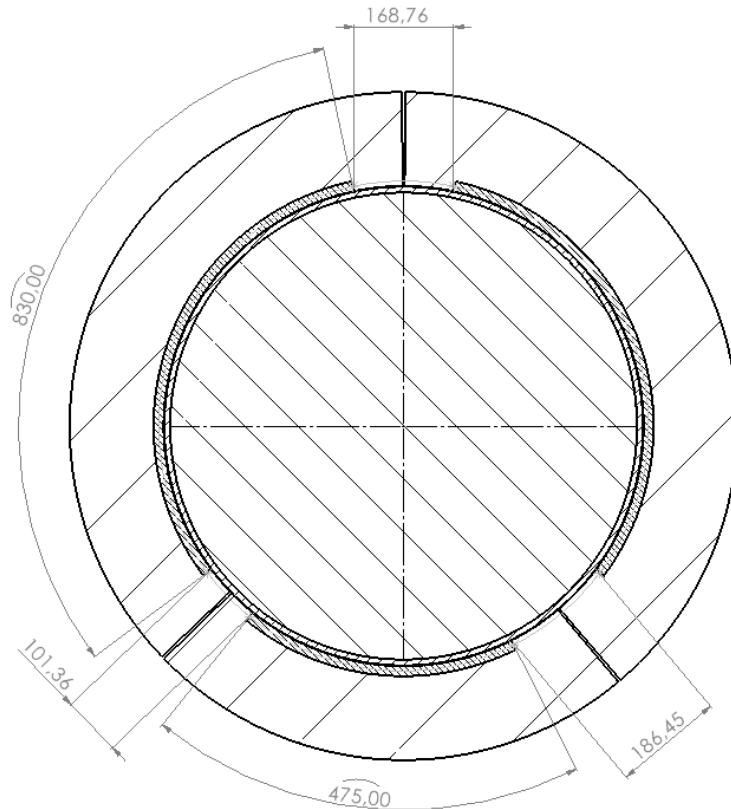


Abbildung 2-55: Breite und Abstände zwischen den VIPs

2.3.3.3 Polypropylen-Bahnen

Die PP-Bahnen dienen dem mechanischen Schutz der VIP vor spitzen Gegenständen. Für sie wird eine Dicke von 1 mm festgelegt. Bei der Wärmedämmung 2 werden drei PP-Bahnen in ihrer gelieferten Höhe von 2 m belassen und, wie in Abbildung 2-56 zu sehen, so angebracht, dass ihre Unterkante mit der Unterkante der Manteldämmung abschließt.

Die Breitenmaße, abgebildet in Abbildung 2-57, ergeben sich aus dem Abstand zwischen den PP-Bahnen, der jeweils 10 mm betragen soll. So wird sichergestellt, dass die PP-Bahnen in jedem Fall ausreichend über die Randgebiete der VIP herausragen. Außerdem wird durch diesen Spalt ausreichend Platz für den vertikalen Schnitt durch den PUR gegeben.

Da die PP-Bahnen Teil der Manteldämmung bleiben sollen und zur Aufschäumung der Prototyp-Wärmedämmung direkt am Innenzylinder des Formwerkzeugs anliegen (siehe Kapitel 2.3.3.5), muss sichergestellt werden, dass sie nach Aushärtung des PUR wieder ablösbar sind. Sie werden somit nicht vollflächig aufgeklebt, sondern an den Randgebieten mit Klebeband am Innenzylinder befestigt.

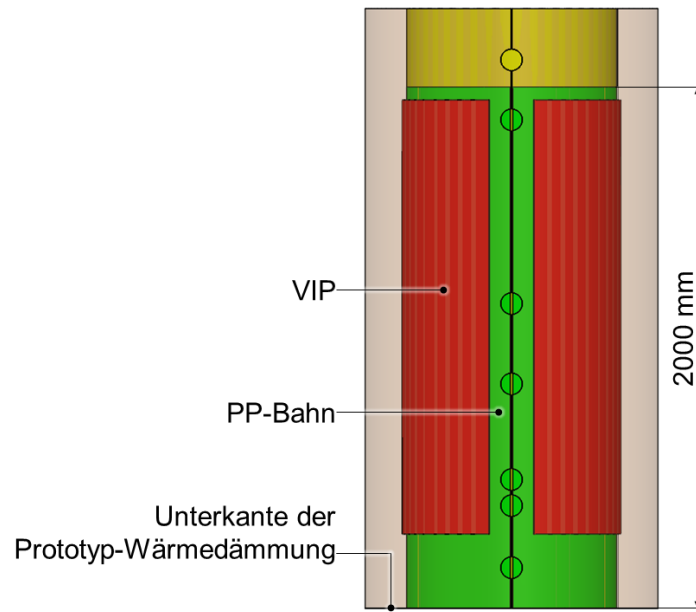


Abbildung 2-56: Anordnung und Höhe der PP-Bahnen (Vorderansicht)

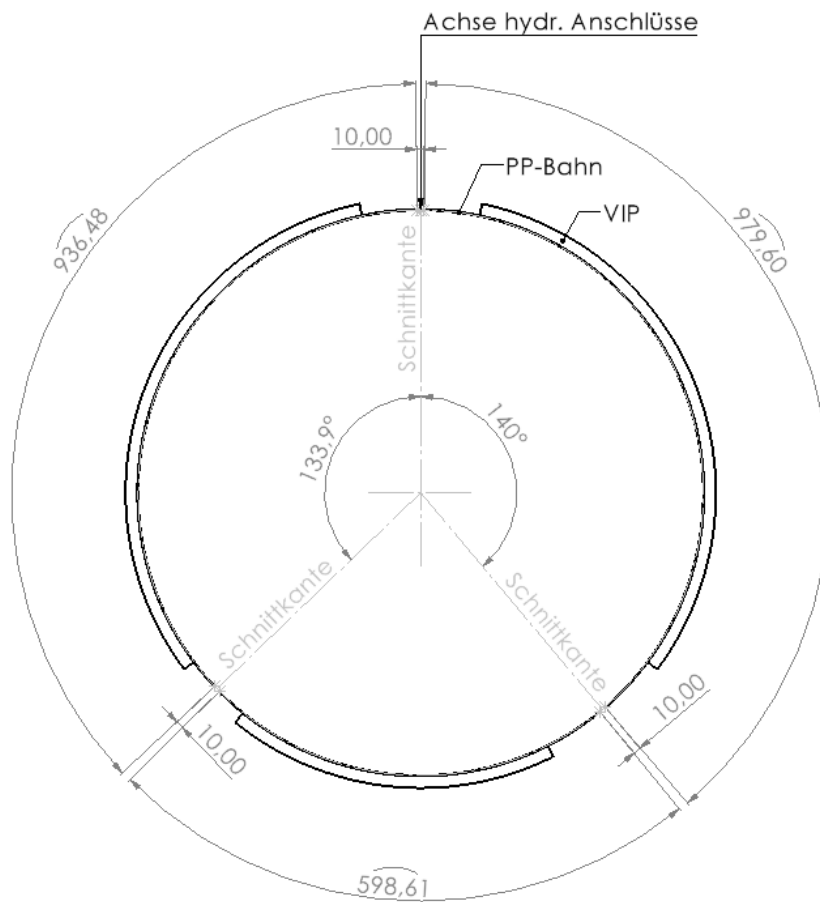


Abbildung 2-57: Anordnung der PP-Bahnen mit Breiten- und Spaltmaßen in mm (Schnittdarstellung der Draufsicht)

2.3.3.4 Polyesterfaservlies (PFV)

In Wärmedämmung 2 wird sowohl für die Manteldämmung als auch für Boden- und Deckeldämmung PFV-LD-San eingesetzt. Dieses verfügt über eine vergleichsweise geringe eff. WLF bei gleichzeitig hoher Flexibilität und Komprimierbarkeit. An der der Manteldämmung dient das PFV der Vermeidung von Hohlräumen und damit von Kamineffekten. Die Position des PFV an der Manteldämmung wird in Abbildung 2-58 an einem Mantelsegment gezeigt. Die rechte Schnittkante bleibt ohne PFV, da dieses bereits an der Schnittkante des anliegenden Segments vorgesehen ist. An der Innenseite der Manteldämmung (1) wird eine PFV-Dicke von 20 mm vorgesehen und an den Schnittkanten (2) von 10 mm. die Bohrungen für die Anschlüsse (3) sollen erst nach der Anbringung der Wärmedämmung mit PFV gefüllt werden.

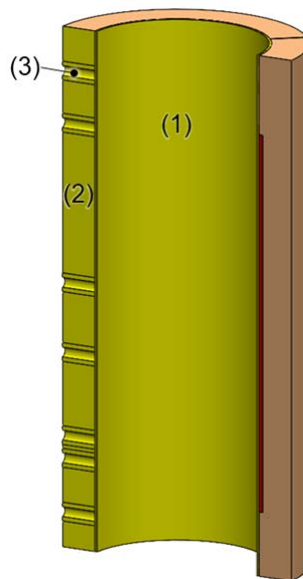


Abbildung 2-58: PFV (gelb) an der Manteldämmung von Wärmedämmung 2

Für die Deckel- und Bodendämmung werden mehrere 30 mm Schichten in Form von Kreisscheiben und Ringen miteinander verklebt, um jeweils eine zusammenhängende Dämmkomponente zu erhalten, siehe Abbildung 2-69 in Kapitel 2.3.3.5.

2.3.3.5 Herstellung der Prototyp-Wärmedämmung 2

Formwerkzeug

Die Herstellung der Prototyp-Mantelwärmedämmung findet mithilfe eines Formwerkzeuges, dargestellt in Abbildung 2-59, statt. Dieses dient der Aufschäumung des PUR in der gewünschten Geometrie. Durch zwei Anschlüsse können die hierbei verwendeten Chemikalien und das Treibmittel im flüssigen Zustand dem Formwerkzeug zugeführt werden. Im Inneren findet schließlich die Aufschäumung und die Aushärtung durch Polyaddition der Ausgangsstoffe statt. Dabei breitet sich der Schaum ausgehend vom Boden der Höhe nach aus, während die enthaltene Luft durch Entlüftungsbohrungen im Deckel entweicht. Durch die chemische Reaktion entstehen üblicherweise Temperaturen von 100 – 180 °C, welche im Kern des aufgeschäumten PUR entstehen [47]. Bei einer Probeschäumung bei BASF mit der gleichen PUR-Dicke an einem VIP wurde eine maximale Temperatur von 118 °C gemessen, was nur 2 K unter der maximalen Kurzzeittemperaturbeständigkeit der VIPs von 120 °C liegt.

Das Formwerkzeug für die Mantelwärmedämmung besteht aus fünf wesentlichen Bauteilen. Innen- und Außenzylinder geben die Dicke der zu schäumenden Mantelwärmedämmung vor. Der Außendurchmesser des Innenzylinders entspricht dem des WWS-Prototyps zuzüglich einer 10 mm dicken Schicht aus Polyesterfaservlies (PFV) und ergibt sich damit zu 810 mm. Der Außenzylinder wird aus zwei Halbschalen zusammengesetzt und ermöglicht so das Öffnen und Schließen des Formwerkzeugs. Mit einem Innendurchmesser des Außenzylinders von 1130 mm ergibt sich somit die Dicke der PUR-VIP-Mantelwärmedämmung von 160 mm zzgl. der 10 mm durch das PFV, welches im Nachhinein aufgeklebt wird. Um eine geschlossene Form für den Aufschäumprozess zu erhalten, werden Innen- und Außenzylinder durch eine obere Kreisringplatte und eine untere Kreisplatte abgeschlossen. Mit Ausnahme der Schweißverbindung von Innenzylinder und unterer Kreisplatte, werden alle Bauteile durch Schraubverbindungen verschlossen. Dazu sind die jeweiligen Bauteilkanten mit angeschweißten Laschen und Bohrungen versehen.

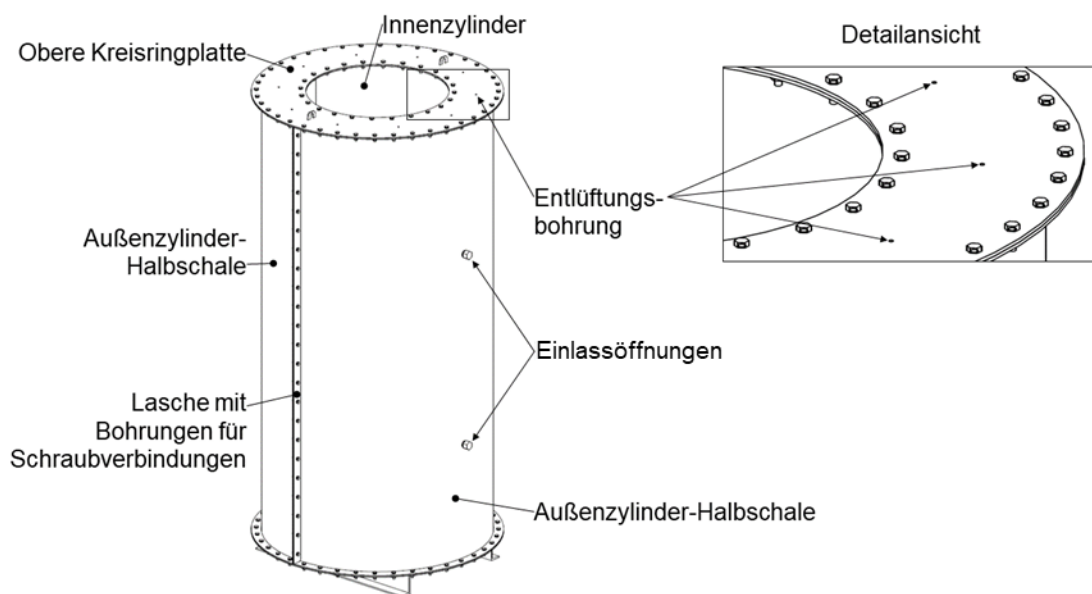


Abbildung 2-59: 3D-Ansicht des geschlossenen Formwerkzeugs für die Mantelwärmedämmung

Zusätzlich zur Mantelwärmedämmung wird eine Deckelwärmedämmung aus PUR hergestellt. Für diese wird ein separates Formwerkzeug verwendet, welches an die Geometrie des Deckels angepasst ist, siehe Abbildung 2-60.

Die Formwerkzeuge für Mantel- und Deckelwärmedämmung wurden jeweils dreifach gefertigt, um drei redundante Prototyp-Wärmedämmungen zu erhalten. Da die Herstellung größtenteils durch Handarbeit erfolgt und Unsicherheiten u. a. beim Aufschäumvorgang bzgl. der auftretenden Temperaturen bestehen, soll dadurch eine Sicherheit gegenüber ggf. auftretenden Beschädigungen gegeben werden.

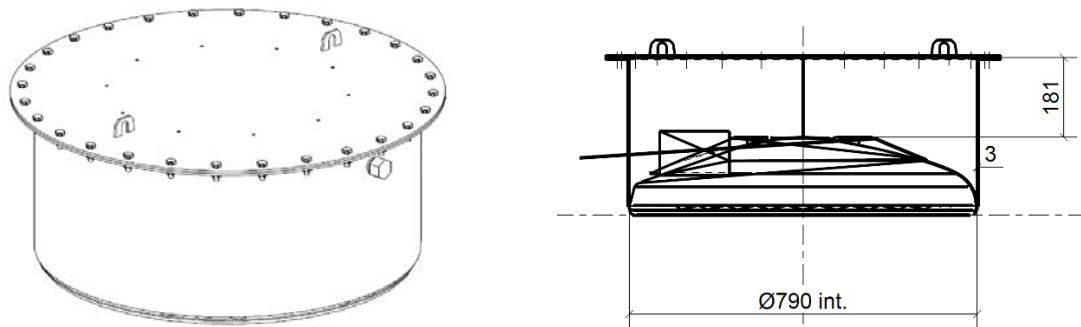


Abbildung 2-60: Geschlossenes Formwerkzeug für die Deckelwärmedämmung, alle Maße in mm.
Links: 3D-Ansicht; rechts: Schnittansicht

Um die Prototyp-Wärmedämmung 2 herzustellen, werden mehrere aufeinanderfolgende Schritte durchgeführt. Zuerst wird das Formwerkzeug für den Aufschäumprozess vorbereitet. Dabei werden die PP-Bahnen und die VIP aufgeklebt und in einem Formwerkzeug Platzhalter aus EPDM für die nachträgliche Einbringung von VIPs und PP-Bahnen. Nach der anschließenden Aufschäumung und Aushärtung des PUR findet im Zuge der Nachbearbeitung die Herstellung der Anschlussbohrungen und Schnitten statt, bevor die Prototyp-Wärmedämmung vom Formwerkzeug gelöst wird. Danach wird das PFV an die Mantelelemente angeklebt.

Anbringung der PP-Bahnen und der VIPs

Um das Formwerkzeug für den Aufschäumprozess des PUR vorzubereiten, wird dieses zunächst durch Lösung der Schraubverbindungen und Entfernung der oberen Kreisringplatte und des Außenzylinders, geöffnet. Am Innenzylinder, gezeigt in Abbildung 2-61, werden anschließend die einzuschäumenden Komponenten angebracht. Dabei handelt es sich in der Variante 1 um PP-Bahnen und VIPs. In einer Variante 2 wurden Platzhalter aus EPDM-Matten anstelle der Wärmedämmkomponenten verwendet. Damit wurde ein Formwerkzeug ausgestattet, für den Fall, dass die VIP bei den anderen zwei Formwerkzeugen aufgrund der bei der Schäumung auftretenden Temperatur beschädigt werden. In Variante 2 würden die VIP und die PP-Bahnen erst nach der Schäumung und Lösung der PUR-Schalen vom Innenzylinder des Formwerkzeugs in die entstandenen Hohlräume eingeklebt werden.

Die Anbringung der PP-Bahnen und der VIPs an den Innenzylinder einer der Formwerkzeuge ist in Abbildung 2-62 dargestellt. Das Klebeband soll neben der Befestigung der PP-Bahnen an das Formwerkzeug auch ein Eindringen der noch flüssigen Mischung des PUR zwischen PP-Bahnen und Innenzylinder verhindern.



Abbildung 2-61: Innenzylinder des Formwerkzeugs für die Manteldämmung der Wärmedämmung 2

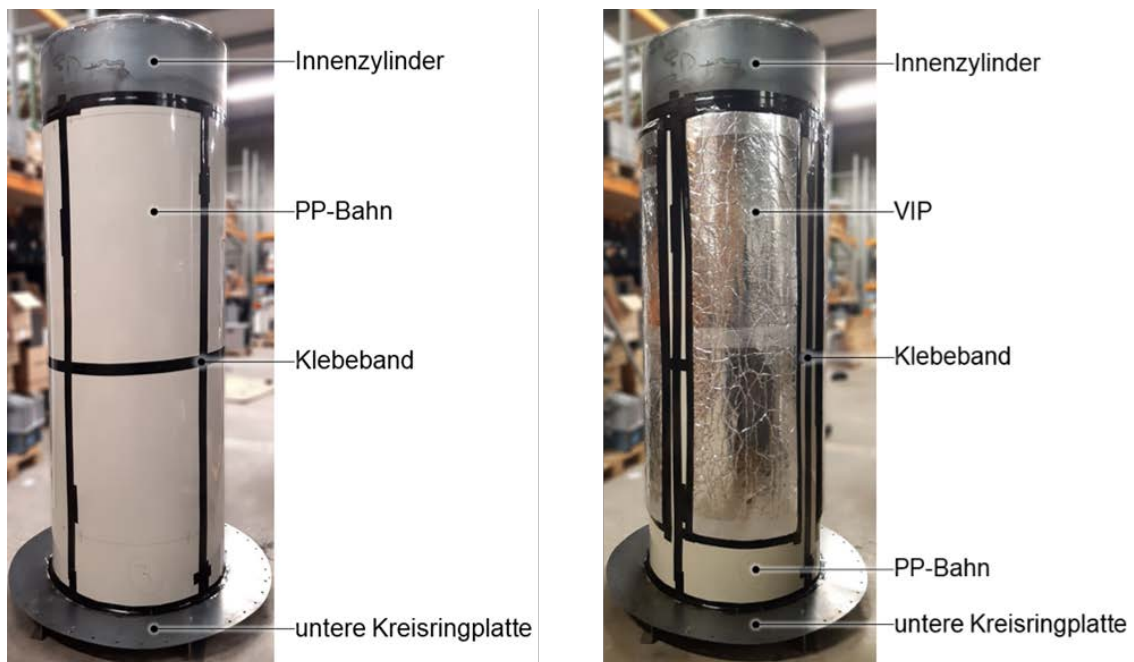


Abbildung 2-62: Innenzylinder des Formwerkzeugs für die Manteldämmung der Wärmedämmung 2 mit PP-Bahnen (links) und VIP aufgeklebt auf die PP-Bahnen (rechts)

Das dritte Formwerkzeug wird wie oben beschrieben entsprechend Variante 2 anstatt der PP-Bahnen und VIPs mit Platzhaltern aus EPDM-Matten beklebt. Die Dicke der zu erstellenden Aussparungen ergibt sich aus der Dicke der VIP mit Schaumkaschierung und der PP-Bahn zu mindestens 18 mm. Da eine EPDM-Matte dieser Dicke zu starr ist, um sie gebogen an den Innenzylinder kleben zu können, werden die Platzhalter jeweils aus zwei Matten von 10 mm und 8 mm Dicke zusammengesetzt. Dazu werden diese nacheinander auf den Innenzylinder

geklebt. In Abbildung 2-63 sind die EPDM-Matten angeklebt am Innenzylinder des Formwerkzeugs abgebildet. Während der Aushärtezeit des Klebstoffs und des Transports zum Ort des Aufschäumens wurden die EPDM-Matten mit Hilfe von Aluminium-Leisten und Spanngurten am Innenzylinder befestigt. Unmittelbar vor dem Aufschäumen wurden diese wieder gelöst.

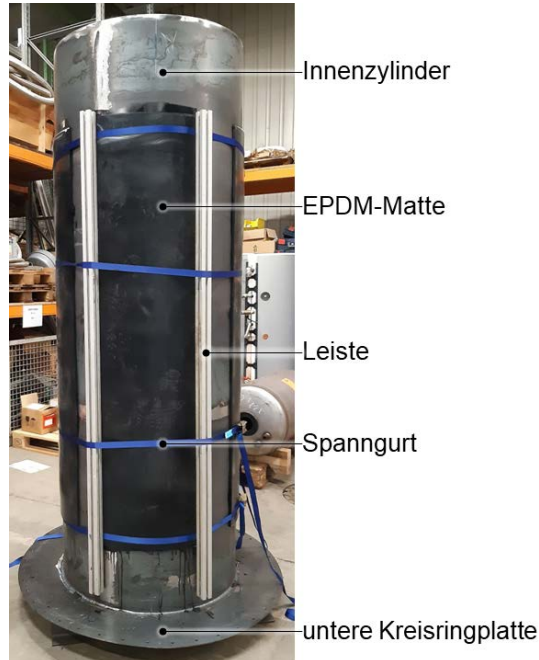


Abbildung 2-63: Innenzylinder des Formwerkzeugs mit festgeklebten EPDM-Matten unter dem Einsatz von Spanngurten und Leisten

Um die späteren Schnittstellen des PUR bei der Nachbereitung wiederzufinden, werden nach Anbringung der Komponenten am Formwerkzeug, wie in Abbildung 2-64 abgebildet, Markierungen mit einer Feile vorgenommen.

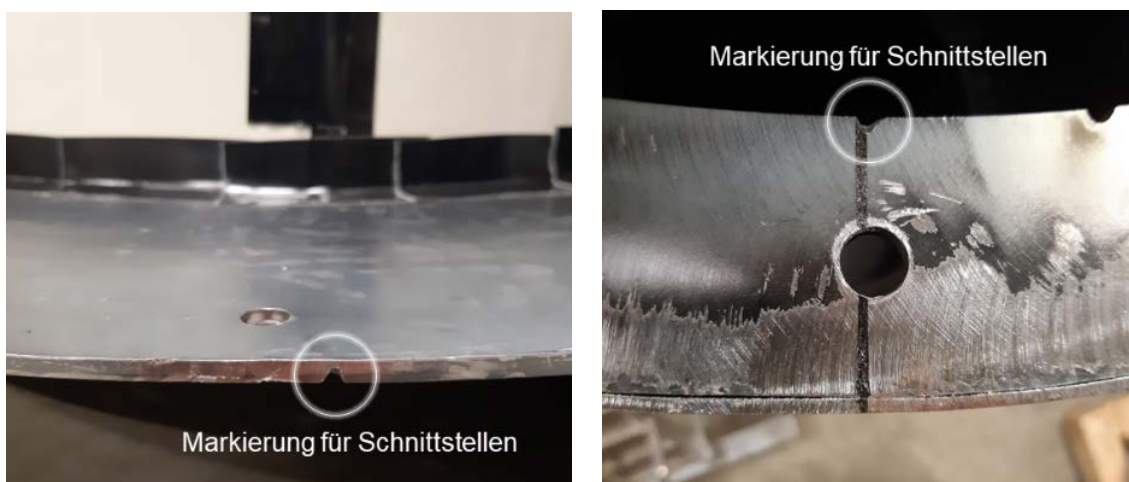


Abbildung 2-64: Schnittstellenmarkierung am Formwerkzeug. Links: untere Kreisplatte; rechts: angeschweißte Lasche am Innenzylinder oben

Nach Fertigstellung der Vorbereitungen werden alle Formwerkzeuge für die Durchführung des Aufschäumvorgangs zur Fa. BASF versandt. Dazu werden die Formwerkzeuge mit den Halbschalen der Außenzylinder sowie der oberen Kreisringplatte wieder komplett verschlossen.

Aufschäumen der Formwerkzeuge

Vor der Aufschäumung bei BASF wurden alle Formwerkzeuge erneut geöffnet, um ein Trennmittel auf die entsprechenden Oberflächen aufzutragen, welches die Ablösung des PUR nach der Aushärtung ermöglicht.

Beim Formwerkzeuge für die Deckeldämmungen sowie das Formwerkzeug für die Manteldämmung mit den EPDM-Platzhaltern wurden alle Oberflächen, welche mit PUR in Kontakt kommen mit dem Trennmittel bestrichen. Beim Formwerkzeug für die Manteldämmung mit VIPs und PP-Bahnen werden die beiden letztgenannten Komponenten nicht mit Trennmittel bestrichen, da diese von dem PUR eingeschäumt werden und Teil der Wärmedämmung bleiben sollen.

Vor dem Einbringen der PUR-Komponenten in die Formwerkzeuge wurden diese wieder verschlossen. Während des Aufschäumvorgangs wurde die Temperatur an einem der VIPs gemessen und wie auch bei der Probeschäumung (s. o.) wurden hierbei maximal 118 °C gemessen. Die Temperaturen können allerdings lokal unterschiedlich sein, so dass eine lokale Temperatur oberhalb der Kurzzeittemperaturbeständigkeit der VIP von 120 °C und somit auch eine Beschädigung der VIPs beim Schäumen nicht ausgeschlossen werden konnte.

Nachbearbeitung der Manteldämmung der Prototyp-Wärmedämmung 2

Es wurde zunächst eine der Formwerkzeuge mit VIP und PP-Bahnen geöffnet, siehe Abbildung 2-65. Dabei zeigte sich, dass der Schäumprozess erfolgreich war und die Form vollständig gefüllt werden konnte.

Daraufhin wurden zunächst die Bohrungen für die Anschlüsse und die Muffe mit einer Lochsäge mit einem Durchmesser von 83 mm gesetzt. Daraufhin wurden die drei Schnitte zur Unterteilung der Manteldämmung in drei Segmente mit Hilfe einer japanischen Zugsäge gesetzt und die Manteldämmungssegmente vom Innenzylinder des Formwerkzeugs gelöst. Das Resultat dieser Vorgänge ist in Abbildung 2-66 dargestellt, wobei die Bohrungen an einigen Stellen noch nicht vervollständigt sind.

Die Manteldämmungssegmente wurden anschließend mit PFV-LD-San beklebt. Die Funktionsmuster-Manteldämmung sollte für die Speicherprüfung über vier Spanngurte am Prototyp-Speicher befestigt werden. Um dabei das PUR nicht zu beschädigen, wurden an jedes Segment jeweils vier Streifen der PP-Bahn an die Außenseite angeklebt. In Abbildung 2-67 sind zwei der drei Segmente mit PFV-LD und den PP-Streifen abgebildet.



Abbildung 2-65: Manteldämmung der Wärmedämmung 2 am Innenzylinder des geöffneten Formwerkzeugs. Links: Vorderansicht; rechts: Ansicht von schräg oben



Abbildung 2-66: Manteldämmungssegmente von Wärmedämmung 2 nach der Ablösung vom Innenzylinder des Formwerkzeugs.



Abbildung 2-67: Manteldämmungssegmente der Wärmedämmung 2 mit PFV-LD-San und Streifen aus PP

Herstellung der Boden- und Deckeldämmungen

Die Deckeldämmungen aus PUR konnten nicht vollständig aufgeschäumt werden und enthielten jeweils noch einen Hohlraum mittig oben, siehe Abbildung 2-68, links. Nachdem einer der Deckeldämmungen entfernt werden konnte, wurde dieser Hohlraum mit einem Bauschaum gefüllt, siehe Abbildung 2-68, rechts. Das Entfernen der PUR-Deckeldämmung aus der Form gestaltete sich aufgrund der Haftungs- und Reibungskräfte als sehr aufwendig und es verblieben einzelne Bereiche des unteren Rands der Deckeldämmung im Formwerkzeug zurück.



Abbildung 2-68: Deckeldämmung aus PUR für Wärmedämmung 2. Links: Hohlraum; rechts: fehlende Teile in Unterkante der Deckeldämmung

Eine weitere Deckeldämmung sowie die Bodendämmung wurden aus zuvor zugeschnittenen Segmenten aus PFV-LD-San über Klebeverbindungen aufgebaut, siehe Abbildung 2-69. Zudem mussten Schnitte für die Aussparungen für die Standfüße, Anschlüsse und Ösen am Prototyp-Speicher gesetzt werden.



Abbildung 2-69: Deckeldämmung (links) und Bodendämmung (rechts) aus PFV-LD-San. Zur Ergänzung der Deckeldämmung werden noch weitere lose Kreissegmente aus PFV-LD-San aufgelegt. Die Bodendämmung wurde unten noch um ein Element aus PFV-LD-Nev ergänzt, um Hohlräume zuverlässig zu vermeiden

2.3.3.6 Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit des PUR der Wärmedämmung 2

Um das Simulationsmodell mit den Messungen der Warmhalteverluste abzugleichen und um darauf basierend eine Extrapolation der Warmhalteverluste für 25 a gealtertes PUR zu simulieren, wurde die eff. WLF des ungealterten PUR der Mantel- und Deckeldämmung am IGTE gemessen. Dafür wurden von BASF Prüfkörper mit der gleichen PUR-Zusammensetzung und -Dichte hergestellt. Die Messergebnisse sind Abbildung 2-70 zu entnehmen und in Gleichung (2-11) ist die Ausgleichsgerade der Messpunkte aufgeführt, welche im Simulationsmodell implementiert wurde.

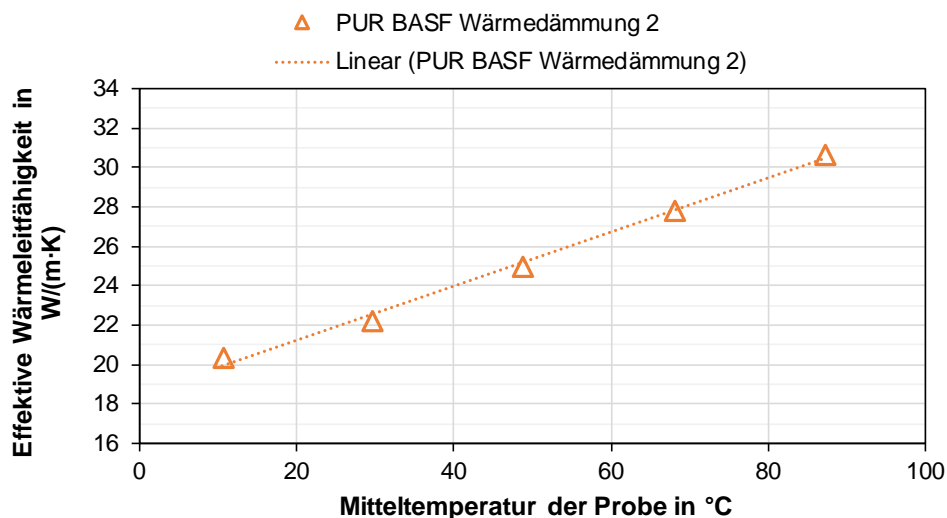


Abbildung 2-70: Gemessene effektive Wärmeleitfähigkeit vom PUR der Wärmedämmung 2 über der Probenmitteltemperatur

$$\lambda_{PUR,WD2,0a}(\vartheta) = 18,49 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}} + 0,137 \frac{\text{mW}}{\text{m} \cdot \text{K}^2} \cdot \vartheta \quad (2-11)$$

2.3.3.7 Ergebnisse der Speicherprüfung und Abgleich mit Simulationsergebnissen

Die Anbringung der Wärmedämmung 2 war deutlich weniger kraft- und zeitaufwendig als bei Wärmedämmung 1. Die am Prototyp-Speicher angebrachte Wärmedämmung im Speicherprüflabor zur Messung der Warmhalteverluste ist in Abbildung 2-71 zu sehen.



Abbildung 2-71: Wärmedämmung 2 mit Deckeldämmung aus PFV-LD-San am Prototyp-Speicher während der Messung der Warmhalteverluste nach DIN EN 12897:2020. Links: Vorderansicht; rechts: Ansicht Deckeldämmung

Das Ergebnis dieser Speicherprüfung sowie der Simulation mit analogem Aufbau zur Speicherprüfung ist in Tabelle 2-16 aufgeführt.

Tabelle 2-16: Ergebnisse der gemessenen und simulierten Warmhalteverluste des Prototyp-Speichers mit Wärmedämmung 2 und Deckeldämmung aus PFV-LD-San

	Speicherprüfung	Simulation
Warmhalteverluste S_A mit Deckeldämmung aus PFV-LD-San	56,3 W	60,9 W
Warmhalteverluste S_A mit Deckeldämmung aus PUR	55,8 W	59,2 W

Die gemessenen Warmhalteverluste lagen bei Einsatz der Deckeldämmung aus PFV-LD-San um 4,6 W und damit um 7,6 % niedriger als die simulierten Warmhalteverluste und bei Einsatz der Deckeldämmung aus PUR um 3,4 W und damit 5,7 %. Nach diesem Ergebnis kann davon

ausgegangen werden, dass keines der VIPs während des Aufschäumprozesses beschädigt wurde. Die höheren simulierten Warmhalteverluste lassen sich u. a. auf Unsicherheiten bzgl. des modellierten Hohlraums zwischen Speicherauflagefläche und Unterseite der Bodendämmung zurückführen.

Wird Beim Modell mit PFV-LD-San-Deckeldämmung die WLF dieses Hohlraums von 1000 W/(m·K) auf 1,685 W/(m·K) reduziert, ergeben sich in der Simulation die gemessenen Warmhalteverluste von 56,3 W. Beim Modell mit PUR-Deckeldämmung muss die WLF des Hohlraums auf 3,14 W/(m·K) reduziert werden um in der Simulation die gemessenen Warmhalteverluste von 55,8 W zu erreichen.

Wird ausgehend von diesen angepassten Simulationsmodellen die WLF der 25 a gealterten VIPs und des 25 a gealterten PUR eingesetzt, ergeben sich die in Tabelle 2-17 dargestellten Ergebnisse der Warmhalteverluste.

Tabelle 2-17: Simulierte Warmhalteverluste des Prototyp-Speichers mit Wärmedämmung 2 mit ungealterten und mit 25 a gealterten Wärmedämmstoffen nach unterschiedlichen Annahmen

Deckeldämmung	PFV-LD-San	PUR
Warmhalteverluste nach 0 a Alterung $S_{A,0a}$	56,3 W	55,8 W
Warmhalteverluste nach 25 a Alterung $S_{A,25a,Norm}$	62,69	62,65
$S_{A,25a,Norm} - S_{A,Sich}$	-9,57	-9,61
Warmhalteverluste nach 25 a Alterung $S_{A,25a,kons}$	70,88	71,71
$S_{A,25a,kons} - S_{A,Sich}$	-1,38	-0,55

Es zeigt sich, dass auch unter der sehr konservativen Annahme bzgl. der Steigerung der eff. WLF des PUR während einer 25-jährigen Alterung mit der Wärmedämmung 2 die EEK A mit hoher Sicherheit erreicht werden kann. Der um 3% reduzierte obere Grenzwert zur Erreichung der EEK $S_{A,Sich}$ wird um mindestens 0,55 W unterschritten. Im weniger konservativen aber als realistischer eingeschätzten Fall der Alterung des PUR nach Norm beträgt die Unterschreitung sogar um bis zu 9,61 W. Entsprechend würde auch ein geringerer Anteil an VIP ausreichen, wobei entsprechend Dämmstoffkosten eingespart werden können. Ohne Berücksichtigung der alterungsbedingten Zunahme der eff. WLF der Wärmedämmstoffe kann davon ausgegangen werden, dass auf VIP verzichtet werden kann, um EEK A zu erreichen bei gleichzeitiger Einhaltung einer Maximaldicke der Manteldämmung von 17 cm.

Während der Messung der Warmhalteverluste wurden auch Thermografie-Aufnahmen an der Wärmedämmung 2 durchgeführt, um mögliche Wärmebrücken zu identifizieren. Diese Thermografie-Aufnahmen sind in Abbildung 2-72, Abbildung 2-73 und Abbildung 2-74 dargestellt.

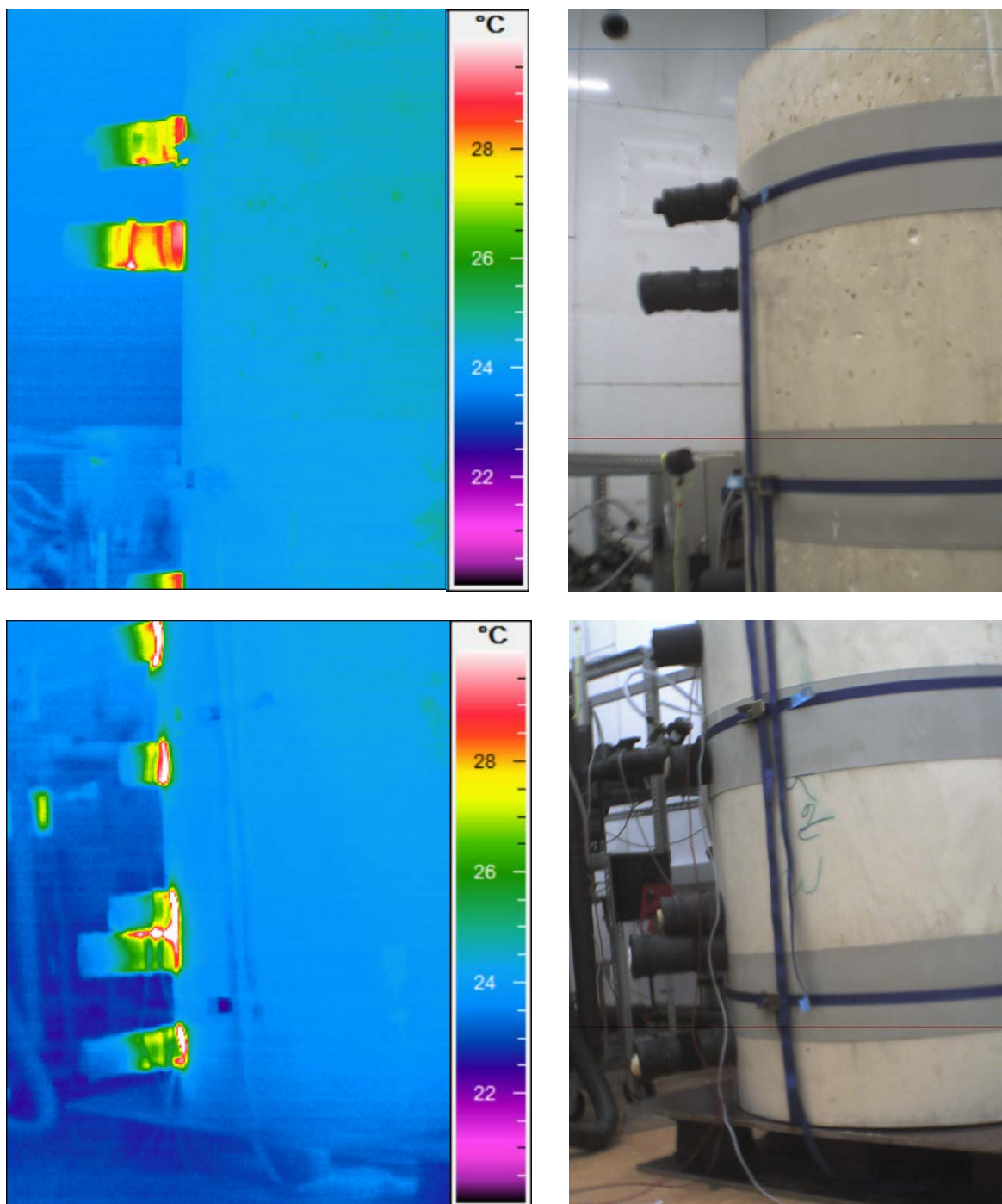


Abbildung 2-72: Thermografie-Aufnahmen an Manteldämmung und hydraulischen Anschlüssen von Wärmedämmung 2. Links: Thermografie-Aufnahme; rechts: Fotografie-Aufnahme.

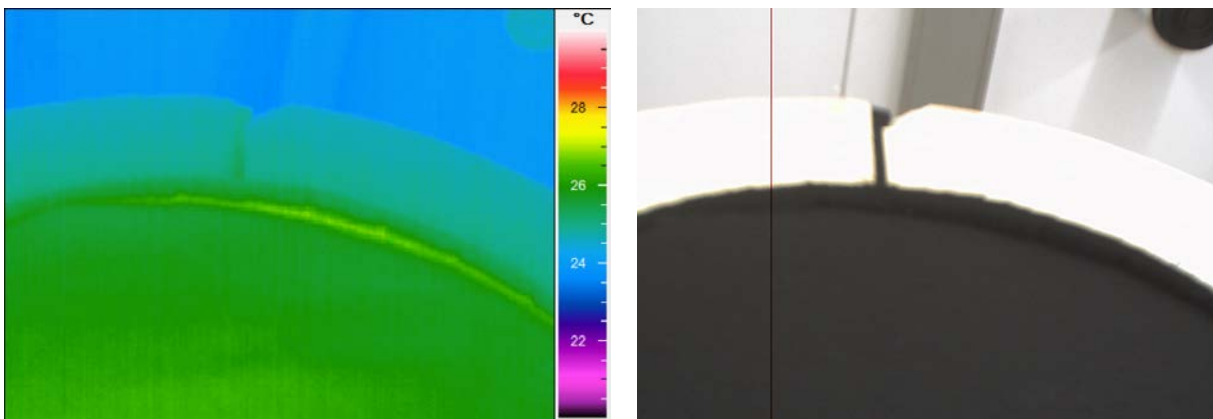


Abbildung 2-73: Thermografie-Aufnahmen an der Deckeldämmung aus PFV-LD-San von Wärmedämmung 2. Links: Thermografie-Aufnahme; rechts: Fotografie-Aufnahme.

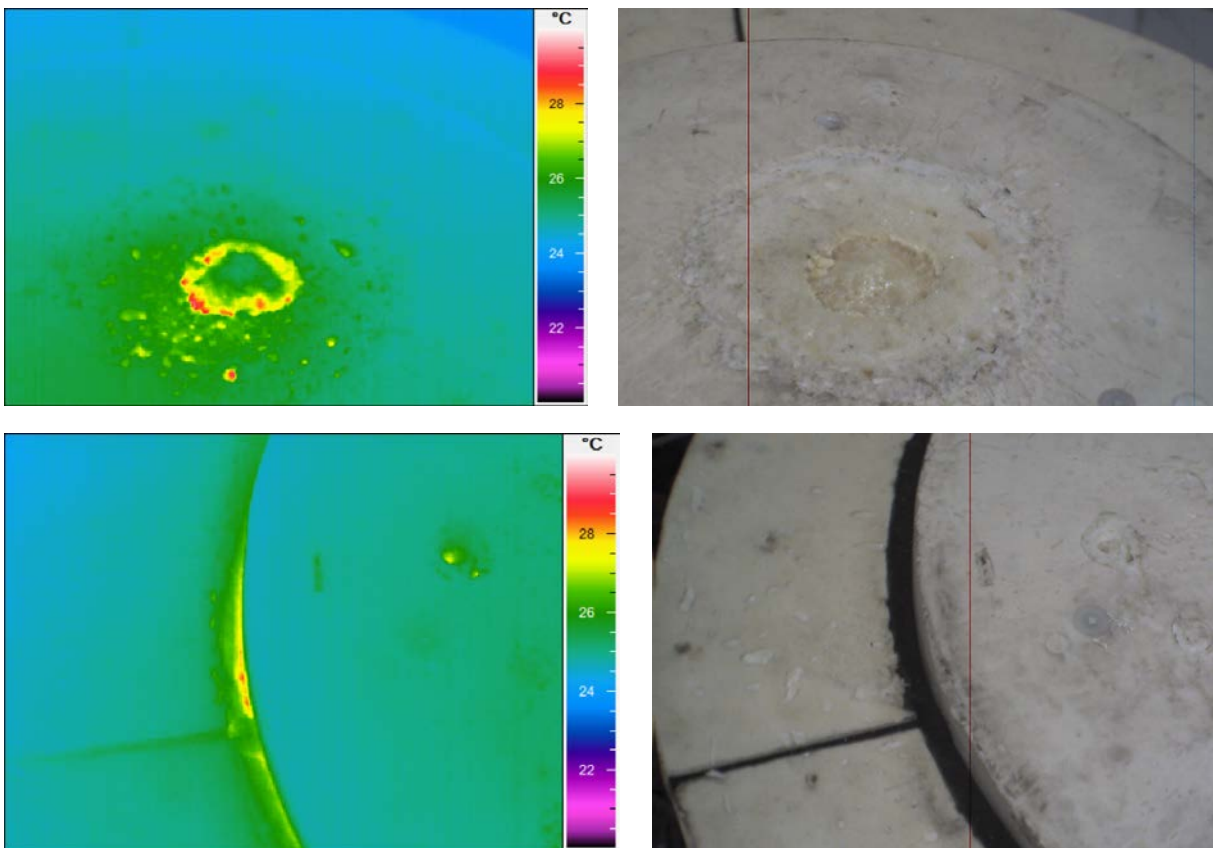


Abbildung 2-74: Thermografie-Aufnahmen an der Deckeldämmung aus PUR von Wärmedämmung 2. Links: Thermografie-Aufnahme; rechts: Fotografie-Aufnahme.

Die Thermografie-Aufnahmen zeigen höhere Temperaturen an einigen der Schnittstellen der Wärmedämmung. Diese Temperaturerhöhungen sind allerdings vergleichsweise gering und treten weitgehend lediglich an den erwartbaren Bereichen auf. Es zeigen sich somit keine signifikanten Schwachstellen an der Wärmedämmung anhand dieser Aufnahmen.

Die Bereiche höherer Temperaturen an der PUR-Deckeldämmung sind zum einen auf den unplanmäßigen Hohlraum zurückzuführen, der in Abbildung 2-68 links gezeigt wurde, und zum

anderen auf Bohrungen mit Dämmstoffdübeln, mit deren Hilfe die Wärmedämmung aus der Form entfernt wurde.

Die Anschlussdämmungen, an welchen ebenfalls erhöhte Temperaturen sichtbar sind, sind nicht Teil der Wärmedämmung 2, sondern werden nur für die Speicherprüfung angebracht. Die Höhe der Temperaturerhöhung an diesen Stellen ist gemäß den Erfahrungen des IGTE bei Speicherprüfungen allerdings auch im üblichen Bereich und hat keine signifikanten Einflüsse auf die Ergebnisse.

2.3.4 Vergleich der Wärmedämmungen und Fazit

In diesem Kapitel wird zunächst die Recyclingfähigkeit der Komponenten der Wärmedämmungen betrachtet. Danach wird der Nutzen und Aufwand der entwickelten Wärmedämmungen diskutiert und zum Schluss folgen Fazit und Ausblick.

2.3.4.1 Recyclingfähigkeit der Dämmkomponenten

Im Folgenden wird ein Vergleich der Recyclingfähigkeit der Komponenten der Wärmedämmungen 1 und 2 aufgestellt. Dazu werden zunächst die aktuell vorhandenen Möglichkeiten zum Recycling der einzelnen Komponenten beschrieben.

Polyurethan-Hartschaum (PUR)

Zu den relevanten Recyclingverfahren für PUR-Abfälle gehören sowohl werkstoffliche als auch rohstoffliche Methoden der Wiederverwertung. Letztere erlauben auch die Verarbeitung von verschmutzten sowie nicht sortenreinen Abfällen, sind jedoch mit einem hohen Energieaufwand verbunden. [48]

Für das werkstoffliche Recycling werden die PUR-Abfälle zunächst zu Flocken, Granulat oder Pulver zerkleinert [48]. Anschließend wird der zerkleinerte Abfall dem Herstellungsprozess neuer Produkte beigemischt [49, 48]. Beispielsweise wird das Mahlgut zusammen mit einem Bindemittel mittels des Klebpressverfahrens zu Produkten wie Fußbodenbeläge sowie Anwendungen für Vibrations- und Schalldämpfungen weiterverarbeitet [50, 51]. Auch die Herstellung von neuen Wärmedämmstoffen ist durch dieses Verfahren unter Temperatureinfluss möglich. [52]

Durch die Mischung fein gemahlener Pulvers mit Polyolen können zudem neue Polyurethane, je nach Verfahren auch Hartschaum, produziert werden [51]. Jedoch liefert die Herstellung neuer Polyurethane aus Rezyklaten eine geringe Produktqualität und ist derzeit nicht marktfähig. [48]

Die genannten Verfahren werden aktuell zur Verarbeitung von Industrieabfällen verwendet, da diese im Gegensatz zu Abfällen aus privaten Haushalten eher die Voraussetzungen der Reinheit in Bezug auf Materialsorten sowie Verunreinigungen erfüllen. [48]

Neben einigen rohstofflichen Verfahren, wie beispielsweise der Hydrolyse und Pyrolyse, die sich bislang im Forschungsstadium befinden und nicht marktfähig sind, konnten die Prozesse der Glykolyse sowie die Gasifizierung bereits im großen Maßstab wirtschaftlich umgesetzt werden. [48]

Insbesondere die Glykolyse kommt aktuell für das Recycling von PUR-Abfällen zum Einsatz und stellt innerhalb des rohstofflichen Recyclings das vielversprechendste Verfahren dar [47] [48]. Durch die chemische Reaktion der Umesterung werden die im PUR enthaltenen Polyole zurückgewonnen. Deren Eigenschaften werden prozessintern an die des Eingangsmaterials angenähert und ermöglichen somit den Einsatz für die Produktion neuer PUR [48]. Dabei können bis zu 50 % der konventionell aus fossilen Rohstoffen hergestellten Polyole mit dem Rezyklat substituiert werden [47]. Allerdings wird das Verfahren vorzugsweise für Produktionsabfälle verwendet, da Verunreinigungen des Eingangsmaterials die Leistungsfähigkeit des Prozesses signifikant verringern [48].

Die Gasifizierung ist eine exotherme Reaktion, welche die beiden Hauptprodukte Synthesegas und Asche durch die partielle Oxidation von Carbonaten hervorbringt. Beim Synthesegas handelt es sich um eine Mischung aus Kohlenmonoxid und Wasserstoff. Es kann als Rohstoffquelle zur Herstellung verschiedener Basischemikalien, wie z. B. Methanol und Ammoniak dienen oder als Energiequelle im Sinne der energetischen Verwertung [53]. Die Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens richtet sich stark nach dem Einsatzgebiet des gewonnenen Synthesegases. [48]

Vakuumisolationspaneele (VIP) mit PE-Schaumkaschierung

Für den Fall, dass beim Rückbau der VIP keine Verunreinigungen auftreten, sind diese nahezu vollständig recycelbar. Dazu wird zunächst die Umhüllung vom Stützkern getrennt. Das sich dazwischen befindliche Gewebe wird üblicherweise der energetischen Verwertung zugeführt, welche nach dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG, Stand 29. Oktober 2020) nicht unter den Begriff „Recycling“ fällt. Die Umhüllung und der Stützkern aus pyrogener Kieselsäure hingegen werden der werkstofflichen Verwertung zugeführt. Letzterer wird gemahlen und steht anschließend zur Herstellung neuer VIP bereit. [54]

Da an die Oberfläche der verwendeten VIP eine PE-Schaumkaschierung angebracht ist, ist im vorliegenden Fall zusätzlich eine rückstandslose Entfernung dieser von der Umhüllung notwendig, um die beschriebene werkstoffliche Verwertung durchzuführen. Es ist unklar wie leicht sich diese PE-Schaumkaschierung von der VIP-Oberfläche lösen lässt und wie viele Rückstände in diesem Fall an der Umhüllung haften bleiben, welche mit entsprechenden Lösemitteln zu bearbeiten sind. Falls eine Entfernung nicht gelingt, so kann lediglich der Stützkern recycelt werden.

Polypropylen (PP)

Der thermoplastische Kunststoff PP kann sowohl der werkstofflichen als auch der rohstofflichen Verwertung zugeführt werden. Für das werkstoffliche Recycling wird das Material zunächst regranuliert und anschließend beim sogenannten „Compoundieren“, gemeinsam mit Additiven, der Neuware beigemischt. Die Voraussetzung hierfür ist das Vorliegen eines sortenreinen, unverschmutzten Materials [50]. Das Rezyklat kann mit einem Anteil von 40 bis 70 % als Copolymer verwendet werden, aber auch die Herstellung eines Sekundärmaterials aus 100 % PP-Rezyklat ist möglich [55]. Die erreichbare Qualität kann dabei der gleichen Stufe

wie der von PP-Neuware entsprechen [56]. Sie sinkt jedoch mit steigender Heterogenität, Verschmutzung sowie Alterung des Eingangsmaterials [55].

Das rohstoffliche Recycling findet anhand der Pyrolyse unter hohem Temperatureinfluss statt. Mithilfe von Katalysatoren werden aus dem PP-Abfall flüssige Kohlenwasserstoffe gewonnen. [55]

Polyesterfaservlies

Vliesstoffe aus synthetischen, thermoplastischen Fasern wie Polyester sind für das werkstoffliche Recycling geeignet. Sie werden dabei regranuliert und anschließend zu neuen Polyesterfasern gesponnen. Diese werden in einem losen Verbund angeordnet und schließlich thermisch vernetzt, woraus erneut ein Vliesstoff entsteht. Die gewonnenen Fasern liegen meistens in verminderter Qualität vor. Auch hier ist die Rahmenbedingung das Vorliegen eines reinen und polymergleichen Eingangsmaterials. Aus diesem Grund wird das Verfahren meist für die Verarbeitung von Produktionsabfällen verwendet. [57]

PFV werden bei der Herstellung weder Brandschutz- noch Bindemittel oder weitere Zusatzstoffe hinzugefügt [58]. Allerdings werden die Komponenten bei der Wärmedämmung 2 miteinander verklebt und es ist davon auszugehen, dass der Klebstoff sich – auch mit dem Einsatz entsprechender Lösemittel – nur schwer rückstandslos vom PFV entfernen lässt. Damit handelt es sich teilweise um einen verschmutzten Abfall, welcher für die werkstoffliche Verwertung ungeeignet ist.

Dementsprechend ist davon auszugehen, dass der mit Klebstoff versehene Anteil der energetischen Verwertung zugeführt wird, welche nicht dem Recycling entspricht. Durch den hohen Heizwert von PFV, der dem von Steinkohle ähnelt, eignet sich das Material gut als Sekundärbrennstoff für die Verbrennung [58]. Nach der zuvor beschriebenen Abfallhierarchie ist dies dennoch eine vergleichsweise minderwertige Verwertungsoption.

Grafithaltiges expandiertes Polystyrol (GEPS)

Die relevanten Recyclingverfahren für GEPS entsprechen denen des EPS und umfassen werkstoffliche Prozesse [59]. Der EPS-Abfall wird bei der Sammlung nach Farbe und Anwendungstyp getrennt. Er soll bei der Abgabe trocken und sortenrein sein sowie keine Fremdstoffe und Verunreinigungen enthalten. [60]

Der Kunststoffabfall wird aufgeschmolzen und in kompaktes Polystyrol (PS) umgewandelt. Anschließend wird dieses zu Granulat verarbeitet und das Rezyklat dem Herstellungsprozess der Neuware beigemischt. Auch ist die weitere Verarbeitung zu Spritzgussteilen aus PS möglich. [49, 56]

Außerdem ist die Herstellung von Formteilplatten aus zuvor zerkleinertem EPS-Abfall möglich, welche wieder als Wärmedämmstoff eingesetzt werden. Weiterhin kann das resultierende Granulat ebenfalls als Leichtzuschlag in Ziegelsteinen, Beton, Putz oder Mörtel sowie für die Bodenauflockerung und als Bodenhilfsstoff, z. B. als Drainage oder Pflanzensubstrat, verwendet werden. [59, 58, 49]

Eine rohstoffliche Verwertung zur Rückgewinnung der enthaltenen Grundstoffe ist nur unter einem hohen Aufwand von Energie und den damit verbundenen hohen Kosten möglich. Für die energetische Verwertung stellt das Material einen hohen Heizwert von 39,3 MJ/kg bereit. [59]

Vergleich der Wärmedämmungen

Die Wärmedämmung 1 beinhaltet im Wesentlichen die Komponenten GEPS, VIP, PFV und einen thermoplastischen Kunststoff wie beispielsweise PP oder Polystyrol (PS) zur Verklebung. In der Wärmedämmung 2 werden im Wesentlichen die Komponenten PUR, VIP, PFV und PP eingesetzt.

Die Komponenten VIP, PFV und ein thermoplastischer Kunststoff wie PP werden in beiden Wärmedämmungen angewendet und nehmen einen ähnlich hohen prozentualen Anteil des Gesamtvolumens ein. Sie sind daher nicht ausschlaggebend für einen direkten Vergleich der Konzepte und werden im Folgenden nicht weiter berücksichtigt.

Die beiden wichtigsten Komponenten für den Vergleich der Recyclingfähigkeit sind die Materialien PUR und GEPS. Hier lässt sich der wesentliche Unterschied feststellen, dass PUR im Gegensatz zu GEPS nicht nur werkstofflich, sondern auch rohstofflich verwertbar ist.

Zwar sind die Kosten für eine Verwertung mittels Glykolyse höher als für die werkstofflichen Verfahren, doch können prinzipiell auch verunreinigte und nicht sortenreine Abfälle als Eingangsmaterial in den Prozess aufgenommen werden. Diese Option erweist sich als Vorteil, da somit die Dringlichkeit der rückstandslosen Reinigung sowie der Sortenreinheit entfällt. Dennoch wirken sich diese Faktoren auf das Verfahren aus, indem sie dessen Leistungsfähigkeit beeinträchtigen. Mithilfe der Glykolyse ist die Produktion neuer PUR und somit eine Erhaltung der Qualitätsstufe möglich. Alternativ besteht die Möglichkeit der Gasifizierung des PUR-Abfalls, wodurch Rohstoffe zur Herstellung von Basischemikalien bereitgestellt werden. Die Wirtschaftlichkeit variiert hierbei stark nach dem Anwendungsgebiet.

Anhand der werkstofflichen Verwertung von PUR-Abfällen findet zwingend eine Herabstufung der erreichbaren Produktqualität statt. Das Rezyklat kann nur unter nicht wirtschaftlichen Umständen wieder zu Polyurethan verarbeitet werden.

Aus dem GEPS-Abfall kann mittels werkstofflicher Verwertung neues PS hergestellt werden. Somit ist auch hier eine Erhaltung der Qualitätsstufe möglich, allerdings ohne die zusätzlichen Kosten durch den erhöhten energetischen Aufwand einer rohstofflichen Verwertung. Zusätzlich wird das aus dem GEPS-Abfall hergestellte Granulat für viele weitere Anwendungen eingesetzt, die mit einer Qualitätsminderung einhergehen.

Abschließend lässt sich keine eindeutige Aussage darüber treffen, welches Material in Bezug auf die Recyclingfähigkeit besser abschneidet, da eine Vielzahl von Möglichkeiten besteht. Da jedoch der GEPS-Abfall prinzipiell durch eine werkstoffliche Verwertung auf der vorausgehenden Qualitätsstufe gehalten werden kann, ist die Wärmedämmung 1 in dieser Hinsicht zu bevorzugen. Wie die Abfälle letztendlich verwertet werden, hängt allerdings von vielen Faktoren ab. Um den bestmöglichen Verwertungsweg und damit eine Erhaltung der Qualitätsstufe anzustreben, ist eine möglichst rückstandslose Reinigung der Komponenten unerlässlich. Um

dem Anspruch der Reinheit gerecht zu werden, ist darauf zu achten, dass nach der Separation aller Komponenten voneinander auch die Klebstoffrückstände durch geeignete Lösemittel entfernt werden.

Grundsätzlich ist darauf hinzuweisen, dass die Betrachtung der Recyclingfähigkeit einzelner Materialien nicht zwingend eine Aussage über deren Nachhaltigkeit oder die des jeweiligen Verwertungsverfahrens zulässt. Für eine ökologisch sowie ökonomisch sinnvolle und vollständige Betrachtung ist die alleinige Bewertung der jeweiligen Recyclingfähigkeit unzulänglich, wenn auch eine grobe Einordnung der bestehenden Optionen einen hilfreichen Vergleich darstellen kann. Um die Nachhaltigkeit jedoch ganzheitlich bewerten zu können, ist die Berücksichtigung des gesamten Produktlebenszyklus, also von der Herstellung der Rohmaterialien bis zu dessen Umgang nach der Nutzungsphase, notwendig [61].

Zudem ist die Verbindung der einzelnen Komponenten anhand des Einsatzes verschiedener Klebstoffe unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit zu prüfen, da diese möglicherweise eine Hürde für die werkstoffliche Verwertung darstellen und deren rückstandslose Entfernung mit hohem Aufwand sowie weiteren Hilfsmitteln verbunden ist. Auch die Herstellung und der Einsatz von Klebstoffen sowie Lösemitteln ist durch den energetischen und rohstofflichen Aufwand mit Umweltauswirkungen verbunden und sollte unter diesem Aspekt berücksichtigt werden. Es sind weitere Überlegungen anzustellen, um bei einer möglichen Serienfertigung die bessere Trennbarkeit der Materialien gewährleisten zu können.

2.3.4.2 Nutzen und Aufwand

Der Nutzen der entwickelten Wärmedämmungen wurde vorab festgelegt und ist für alle entwickelten Wärmedämmungen gleich. Dieser ist die Erreichung der EEK A gemäß EU-Verordnung Nr. 812/2013 auch noch nach 25-jähriger Alterung der Wärmedämmung.

Der Aufwand wird hier unterteilt in den Materialkostenaufwand, den Herstellungsaufwand, den Transportaufwand, den Aufwand der Anbringung der Wärmedämmung sowie den Recyclingaufwand.

Materialkostenaufwand

Der Dämmstoffkostenaufwand ist bei Wärmedämmung 1 höher als bei Wärmedämmung 2. Dies ist auf das höhere notwendige VIP-Volumen bei Wärmedämmung 1 zurückzuführen. Dieses höhere VIP-Volumen ist nötig, da die eff. WLF von PUR geringer ist als die von GEPS.

Herstellungsaufwand

Der Herstellungsaufwand wird für die Wärmedämmung 1 als geringer eingeschätzt als für die Wärmedämmung 2. Bei der Wärmedämmung 2 müssen die VIPs in die zylindrischen Schalen der Manteldämmung eingeschäumt werden. Dafür werden spezielle Formen nötig werden und auch der Vor- und nachbereitungsaufwand wird als hoch eingeschätzt. Bei der Wärmedämmung 1 bestehen die Manteldämmungselemente u. a. aus GEPS-Platten, bei welchen Nuten eingefräst werden um diese anschließend kurz vor der Anbringung an den Speicher in Form biegen zu können. Die VIPs können separat beigelegt werden und werden nicht in die GEPS-Elemente eingebettet.

Transportaufwand

Der Transportaufwand wird für die Wärmedämmung 1 ebenfalls als geringer eingeschätzt als für die Wärmedämmung 2. Dies ist auf die geringere Dichte und die ebene Plattenform des GEPS zurückzuführen, wohingegen die PUR-Manteldämmungselemente in zylindrischer Schalenform vorliegen.

Aufwand bei Anbringung der Wärmedämmung

Der Aufwand bei der Anbringung ist bei der Wärmedämmung 1 höher als bei der Wärmedämmung 2, da sowohl die VIPs als auch die GEPS-Elemente der Manteldämmung vor und während der Anbringung durch Biegen an die Form des Speichers angepasst werden müssen. Auch die Fehleranfälligkeit steigt durch diesen höheren Anbringungsaufwand.

Recyclingaufwand

Der Recyclingaufwand kann für die Wärmedämmung 1 als geringer eingeschätzt werden als für die Wärmedämmung 2, da dies für das GEPS geringfügig einfacher möglich ist als für PUR. Zudem müssen bei der Wärmedämmung 2 die VIPs vom PUR getrennt werden, wohingegen die VIPs bei der Wärmedämmung 1 nur vom Speichermantel getrennt werden müssen, was als einfacher eingeschätzt wird.

2.3.4.3 Fazit und Ausblick

Für die Wärmedämmung 1 wird ein geringer Aufwand bzgl. der Herstellung, des Transports und des Recyclings erwartet, während bei Wärmedämmung 2 der Aufwand hinsichtlich der Materialkosten und der Anbringung der Wärmedämmung durch Installateure geringer ist. Da die Wärmedämmungen für den gleichen Nutzen hinsichtlich der Wärmedämmwirkung ausgelegt wurden, unterscheidet sich dieser nicht.

Insbesondere für die Wärmedämmung 2 gilt es für eine Serienfertigung noch möglichst einfache und kostengünstige Herstellungsmethoden zu entwickeln. Zudem können für alle entwickelten Wärmedämmungen noch Dimensionierungen hinsichtlich anderer Zielsetzungen anhand des erstellten Simulationsmodells durchgeführt werden. Dies können beispielsweise die Erreichung der EEK A ohne Alterung oder die Erreichung der EEK A+ nach der derzeit gültigen EU-Verordnung Nr. 812/2013 oder der EEK A nach der in den kommenden Jahren zu erwartenden Neuerung der Verordnung, mit absehbar strengeren Grenzwerten, sein.

2.4 Kompakter Sorptionswärmespeicher

Dieser Arbeitspunkt wird ausschließlich von den österreichischen Projektpartnern bearbeitet.

2.5 Bauteilaktivierung und elektrische Speicher

Dieser Arbeitspunkt wird ausschließlich von den österreichischen Projektpartnern bearbeitet.

2.6 Latentspeicher für Anergienetze

Das Ziel dieses Subarbeitspakets ist die Entwicklung eines Konzepts zur Realisierung standardisierter Latentspeicher mit Volumina zwischen 100 und 2000 m³ für den Einsatz in Anergienetzen bzw. sogenannten kalten Nahwärmenetzen. Primär ist die Nutzung von Wasser als Speichermedium vorgesehen. Ergänzend wurden auch andere Phasenwechselmaterialien mit Schmelztemperaturen zwischen +3°C und +15 °C untersucht.

Folgende Ziele sollen durch die Entwicklungsarbeiten erreicht werden:

- Entwicklung von Betriebs- und/oder Messverfahren, die eine Zerstörung des Speichers verhindern, d. h. ein vollständiges Durchgefrieren vermeiden
- Erreichung einer maximalen Anlageneffizienz
- Entwicklung einer relativ einfachen bzw. kostengünstigen Sensorik zur Messung des Beladungszustands für prognosebasierte Systemregelungsverfahren

Hinweis zum Bezug auf Versuchsanlagen: Im Rahmen des Vorhabens wurden drei Versuchsanlagen identifiziert und vermessen. Die Auswertungen und Darstellung der Anlagen im Abschlussbericht muss von den Eigentümern der Anlagen zur Veröffentlichung freigegeben werden. Sollte die Freigabe nicht erfolgen, müssen die Darstellungen im öffentlichen Bericht anonymisiert werden. Über die Versuchsanlagen des Vorhabens hinaus wurden Daten aus weiteren Feldanlagen der Fa. VCS im Bericht verwendet. Diese werden anonymisiert im öffentlichen Bericht dargestellt, da der Bezug zu einer konkreten Anlage keinen Mehrwert für die Bewertung der Daten ergibt. Vom zusätzlichen Aufwand einer vertraglichen Zustimmung der Anlagenbesitzer zur Nennung der Anlage kann so abgesehen werden.

2.6.1 Latentspeicher für Anergienetze (VCS)

2.6.1.1 Beladungszustand von Latentspeichern

Für die Quantifizierung des Beladungszustands eines Latentspeichers muss sein Beladungszustand bekannt sein. Abbildung 2-75 links stellt den theoretischen Zusammenhang zwischen dem Beladungszustand S_{oC} (State of Charge) bzw. dem Vereisungszustand S_{oI} (State of Icing) in Abhängigkeit von der Speichertemperatur ϑ_{Latent} und der Massenkonzentration x_{liquid} von flüssigem Wasser im Eisspeicher dar. Bei einer homogenen Speichertemperatur $\vartheta_{Latent} > 0$ °C weist der Eisspeicher einen Beladungszustand von $S_{oC} \geq 1$ auf. Dabei befindet sich das Speichermedium in einem vollständig flüssigen Aggregatzustand, der Vereisungszustand des Latentspeichers nimmt daher einen Wert von $S_{oI} = 0$ an. Die Massenkonzentration an flüssigem Wasser im Speicher ist hier maximal ($x_{liquid} = 1$). Wird dem Speicher eine ausreichend große Menge Wärme entzogen findet ein Phasenwechsel von dem flüssigen Wasser im Speicher zu festem Eis statt. Bei dem Phasenwechsel bleibt die Temperatur im Latentspeicher konstant bei $\vartheta_{Latent} = 0$ °C. Dabei ändert sich der Beladungszustand von $S_{oC} = 1$ auf $S_{oC} = 0$. Analog ändert sich der Vereisungszustand von $S_{oI} = 0$ bei vollständig

flüssigem Aggregatzustand des Wassers im Speicher zu $S_{OI} = 1$ bei vollständig festem Aggregatzustand. Während dieser Entzugsphase nimmt die Massenkonzentration von flüssigem Wasser direktproportional mit dem Vereisungszustand S_{OI} von $x_{liquid} = 1$ auf $x_{liquid} = 0$ ab. Bei einem Beladungszustand von $S_{OC} = 0$ ist das flüssige Wasser im Speicher vollständig zu Eis umgewandelt. An diesem Punkt ist die latente Wärme vollständig aus dem Latentspeicher entzogen. Wird dem Latentspeicher weiter Wärme entzogen, unterkühlt das Eis und im Speicher wird eine Temperatur von $\vartheta_{Latent} < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ erreicht. Der Beladungszustand nimmt dann einen Wert von $S_{OC} < 0$ an, der Vereisungszustand verharrt bei einem Wert von $S_{OI} = 1$.

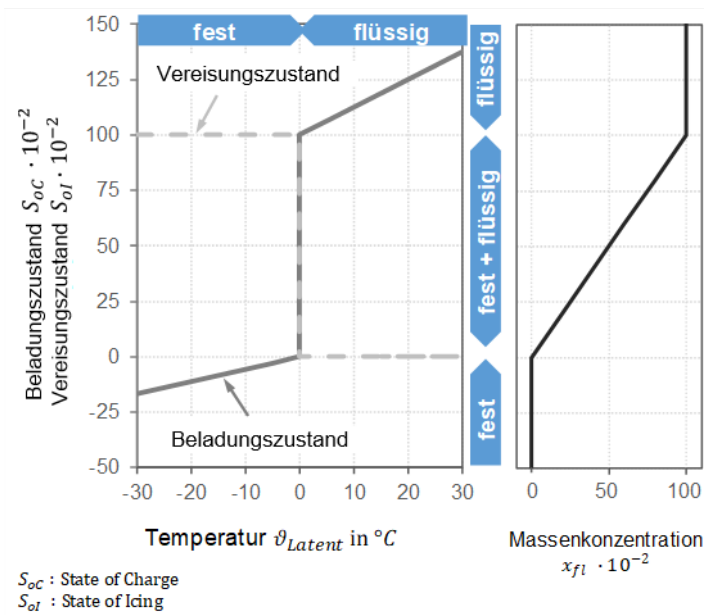


Abbildung 2-75: Beladungszustand bzw. Vereisungszustand in Abhängigkeit von der mittleren Speichertemperatur (links) und der Massenkonzentration von flüssigem Wasser (rechts)

2.6.1.2 Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustandes

Für die Regelung eines Gesamtsystems zur Wärme- und Kälteversorgung ist die Quantifizierung des Beladungszustandes des Latentspeichers von großer Bedeutung. Um das Gesamtsystem so zu betreiben, dass zum einen die Zerstörung des Speichers verhindert wird und zum anderen die Effizienz des Gesamtsystems maximiert wird, muss die Messgenauigkeit der Sensoren zur Ermittlung des Beladungszustandes bestimmte Anforderungen erfüllen. Ebenso muss gewährleistet sein, dass die Messgenauigkeit über die Dauer der Betriebszeit bestehen bleibt. Die Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustandes wird nach Gleichung (2-12) berechnet.

$$G(S_{OC}) = U(m_{Eis}) \cdot m_{Nenn}^{-1} \tag{2-12}$$

mit:

$G(S_{oc})$	Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustandes (S_{oc} : State of Charge)	[%]
$U(m_{Eis})$	Erweitere Messunsicherheit des Beladungssensors zur Bestimmung der Eismasse m_{Eis} im Latentspeicher (vgl. Gl. 1.2.6.8)	[kg]
m_{Nenn}	Nennmasse von (flüssigem) Wasser im Latentspeicher (für Speicher vom Typ SE12 $m_{Nenn} = 10.000 \text{ kg}$)	[kg]

Der angestrebte Bereich der Genauigkeit ist nebenstehend dargestellt. Eine Genauigkeit von $G(S_{oc}) \leq \pm 2 \%$ wird primär angestrebt, eine Genauigkeit von $\pm 2 \% < G(S_{oc}) \leq \pm 5 \%$ ist gerade noch akzeptabel und eine Genauigkeit von $G(S_{oc}) \geq \pm 10 \%$ wird als ungenügend betrachtet.

$$G(S_{oc}) \leq \pm 2 \%$$

$$\pm 2 \% < G(S_{oc}) \leq \pm 5 \%$$

$$G(S_{oc}) \geq \pm 10 \%$$



2.6.1.3 Bestimmung des wahren Beladungszustandes von Eisspeichern

Für die Untersuchungen und die Entwicklung von Beladungssensoren muss der wahre Wert des Beladungszustandes bzw. des Vereisungszustandes bekannt sein. Die Bestimmung des wahren Wertes des Vereisungszustandes erfolgt durch Wiegen des am Wärmeübertrager anhaftenden Eises. Bei der Bestimmung des wahren Wertes des Beladungszustandes wird davon ausgegangen, dass der Beladungszustand im Bereich $0 \leq S_{oc} \leq 1$ dem reziproken Vereisungszustand entspricht (vgl. Abbildung 2-76). Anhand der Modellierung der Vereisungsvorgänge im Versuchseisspeicher (vgl. Abschnitt 2.6.2.3) kann der zeitliche Verlauf des Beladungszustandes S_{oc} für die Anteile der fühlbaren und der latenten Wärme für eine $7 \frac{1}{2}$ tägige Entzugsphase und eine anschließende siebentägige Stillstandsphase berechnet werden (Abbildung 2-76). Daraus ist erkennbar, dass der Anteil der fühlbaren Wärme im flüssigen Wasser und im festen Eis gegenüber der latenten Wärme auf Grund des Phasenwechsels relativ gering ist. Der Anteil der fühlbaren Wärme im festen Eis nimmt erst bei einem Beladungszustand von $S_{oc} = 0,2$ merklich zu, bleibt aber deutlich unter $S_{oc} < 0,05$. Mit dem Ergebnis aus der Modellierung der Vereisungsvorgänge im Eisspeicher können die Energieanteile der Beladung durch die fühlbare Wärme des Wassers und des Eises vernachlässigt werden. Somit kann der Beladungszustand anhand des Anteils an flüssigem Wasser nach Gleichung (2-13) bestimmt werden. Der Massenanteil an flüssigem Wasser im Latentspeicher lässt sich durch den Anteil an festem Eis, zur Gesamtmasse von flüssigem Wasser nach Gleichung (2-14) bestimmen. Somit lässt sich der Beladungszustand von Latentspeichern durch die Messung der Eismasse nach Gleichung (2-15) bestimmen:

$$S_{oC} = 1 - S_{oI} = x_{liquid} \quad \text{für: } 0 \leq S_{oC} \leq 1 \quad (2-13)$$

$$x_{liquid} = 1 - m_{Eis} \cdot m_{Gesamt}^{-1} \quad (2-14)$$

$$S_{oC} = 1 - m_{Eis} \cdot m_{Gesamt}^{-1} \quad \text{für: } 0 \leq S_{oC} \leq 1 \quad (2-15)$$

mit:

S_{oC}	Beladungszustand (S_{oC} : State of Charge)	[-]
S_{oI}	Vereisungszustand (S_{oI} : State of Icing)	[-]
x_{liquid}	Massenkonzentration von flüssigem Wasser im Latentspeicher	[-]
m_{Eis}	Masse von Eis im Latentspeicher	[kg]
m_{Gesamt}	Gesamtmasse von Wasser im Latentspeicher	[kg]

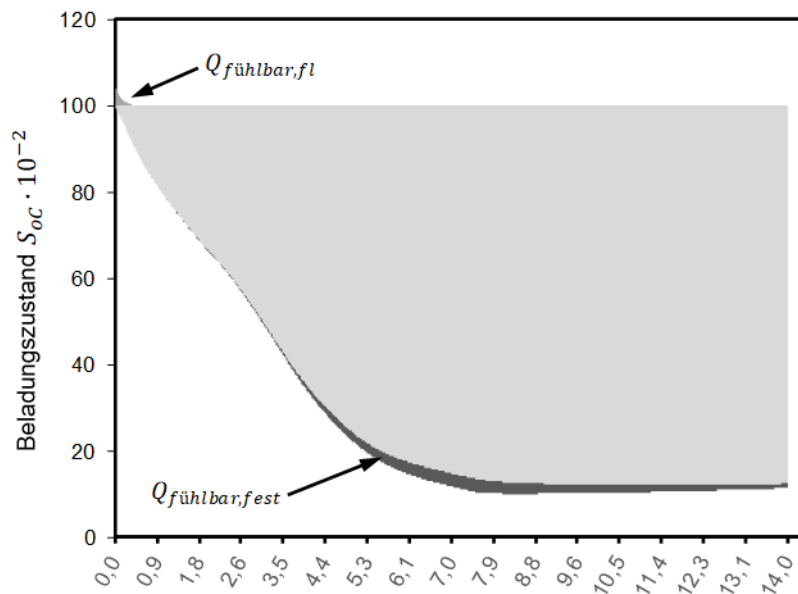


Abbildung 2-76: Zeitlicher Verlauf des Beladungszustandes für die Anteile der fühlbaren und latenten Wärme für eine 7 ½ tägige Entzugsphase mit einer anschließenden siebentägigen Stillstandsphase, berechnet mittels CFD-Simulation

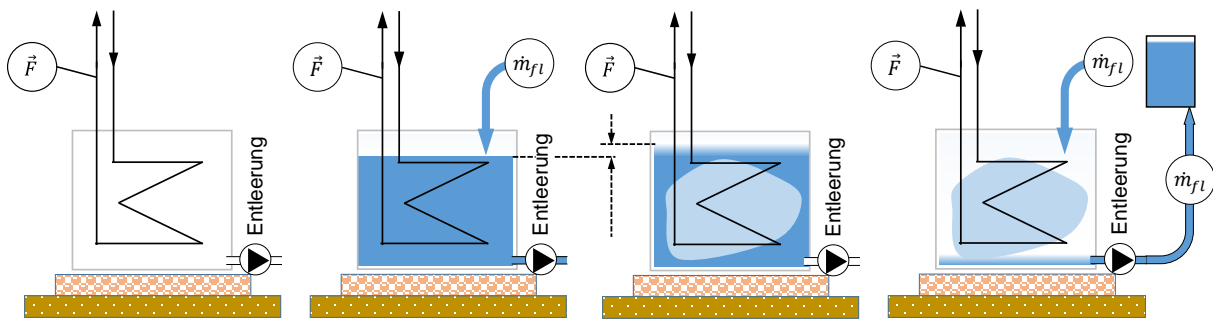


Abbildung 2-77: Methode zur kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse $m_{WT,SoI}$ und zur direkten Bestimmung der wahren Eismasse durch Wiegen der am Wärmeübertrager anhaftenden Eismasse $m_{WT,fest}$ am Ende der Entzugsphase

Wie bereits oben erwähnt, wird die wahre Eismasse durch das Wiegen des am Wärmeübertrager anhaftenden Eises nach Gleichung (2-16) bestimmt. Zu Beginn des Versuches wird die Masse des Wärmeübertragers m_{WT} bestimmt. Anschließend erfolgt die Befüllung des Eisspeichers mit Leitungswasser. Wurde der Eisspeicher mit einer entsprechenden Menge an Wasser befüllt, kann die Masse des Wärmeübertragers $m_{WT,fl}$ im Wasser erfolgen. Während des Entzugs bildet sich Eis um die Wärmeübertragerrohre und auf Grund der geringen Dichte von Eis erfährt der Wärmeübertrager mit anhaftendem Eis eine Auftriebskraft. Diese Bestimmung der wahren Eismasse stellt somit das Referenzmessverfahren für die Bestimmung des Beladungszustandes dar.

$$m_{fest,Ref} = m_{WT,fest} - m_{WT} \quad (2-16)$$

mit:

$m_{fest,Ref}$	Masse von Eis im Latentspeicher (Referenzmessverfahren)	[kg]
$m_{WT,fest}$	Masse des Wärmeübertragers mit anhaftendem Eis	[kg]
m_{WT}	Masse des Wärmeübertragers	[kg]

2.6.1.4 Angewandte Methode zur Bewertung der Messgenauigkeit von Beladungssensoren

Die Bestimmung der Messgenauigkeit von Sensoren zur Ermittlung des Beladungszustandes erfolgt mit den Methoden zur Ermittlung der Standardunsicherheit nach DIN EN ISO 20988 [62]. Dabei wird die Standardunsicherheit anhand von Vergleichsmessungen ermittelt. Bei der direkten Bewertungsmethode wird die Eismasse, die mit einem Beladungssensor ermittelt wurde, mit der Eismasse, die mit dem Referenzmessverfahren ermittelt wurde, verglichen. Die Berechnung der Messunsicherheit erfolgt nach Gleichung (2-17):

$$u_{SVS}(m_{Eis}) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (m_{i,S} - m_{i,Ref})^2 - [u_{Ref}(m_{Eis})]^2} \quad (2-17)$$

mit:

$u_{SVS}(m_{Eis})$	Standardunsicherheit des zu prüfenden Beladungssensors, ermittelt anhand von Vergleichsmessungen	[kg]
$u_{Ref}(m_{Eis})$	Messunsicherheit des Referenzmessverfahrens	[kg]
$m_{i,S}$	i-ter Messwert des zu prüfenden Beladungssensors	[kg]
$m_{i,Ref}$	i-ter Messwert des Referenzmessverfahrens (wahrer Messwert)	[kg]
n	Anzahl Messungen	[-]

Gleichung (2-17) zur Berechnung von $u_{SVS}(m_{Eis})$ ist nur anwendbar, wenn die Beziehung $u_{DR}(m_{Eis}) \leq 0,3 \cdot u_{DS}(m_{Eis})$ erfüllt ist. Hierbei steht der Index „DR“ für die Doppelbestimmung mit dem Referenzmessverfahren und der Index „DS“ für die Doppelbestimmung mit dem zu prüfenden Sensor. Bei einer Doppelbestimmung erfolgt die Bestimmung der Standardunsicherheit eines Verfahrens auf der Basis der Ergebnisse von zwei identischen, jedoch unabhängigen Messeinrichtungen. Zur Bestimmung der Standardunsicherheit werden als Eingangsdaten die Messergebnisse von Doppelbestimmungen verwendet. Die Messungen der beiden Messeinrichtungen sollten möglichst zeit- und ortsgleich erfolgen. Die Standardunsicherheit berechnet sich nach Gleichung (2-18).

$$u_D(m_{Eis}) = \sqrt{\frac{1}{2 \cdot n} \cdot \sum_{i=1}^n (m_{i,1} - m_{i,2})^2} \quad (2-18)$$

mit:

$u_D(m_{Eis})$	Standardunsicherheit ermittelt nach der Durchführung von Doppelbestimmungen	[kg]
$m_{i,1}$	i-ter Messwert von Messeinrichtung 1	[kg]
$m_{i,2}$	i-ter Messwert von Messeinrichtung 2	[kg]
n	Anzahl Messungen	[-]

Ist die Beziehung nicht erfüllt, so ist der Wert $u_{Ref}(m_{Eis})$ auf null zu setzen. Bei signalproportionalen Standardunsicherheiten ($u_{SVS}(m_{Eis}) \cdot m^{-1} = \text{konstant}$) wird die relative Standardunsicherheit $w_{SVS}(m_{Eis})$ nach Gleichung (2-19) berechnet:

$$w_{SVS}(m_{Eis,S}) = \sqrt{\frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{m_{i,S}}{m_{i,R}} - 1 \right)^2 - \left(\frac{m_{Ref}(m_{Eis})}{m_{Eis,Ref}} \right)^2} \quad (2-19)$$

mit:

$w_{SVS}(m_{Eis,S})$	relative Standardunsicherheit des zu prüfenden Beladungssensors ermittelt anhand von Vergleichsmessungen	[%]
$u_{Ref}(m_{Eis})$	Messunsicherheit Referenzmessverfahren	[kg]
$m_{i,Eis,S}$	i-ter Messwert des zu prüfenden Beladungssensors	[kg]
$m_{i,Eis,Ref}$	i-ter Messwert des Referenzmessverfahrens (wahrer Messwert)	[kg]
$m_{Eis,Ref}$	anerkannter Messwert des Referenzmessverfahrens (wahrer Messwert)	[kg]
n	Anzahl Messungen	[–]

Um den Vertrauensbereich der Messunsicherheit $u_{SVS}(m_{Eis})$ von 68,3 % auf 95,5 % zu erweitern, wird die erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis})$ bzw. die relative erweiterte Messunsicherheit $W_{SVS}(m_{Eis})$ durch die Multiplikation der Messunsicherheit $u_{SVS}(m_{Eis})$ mit einem Erweiterungsfaktor k nach Gleichung (2-20) bzw. Gleichung (2-21) berechnet. Der Erweiterungsfaktor k ergibt sich aus der Studentischen t-Verteilung und hängt von der Anzahl der Freiheitsgrade N mit einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % ($\alpha = 0,05$), d. h mit einer statistischen Sicherheit von 95 % ($1 - \alpha = 0,95$) ab.

Tabelle 2-18 zeigt den Erweiterungsfaktor k in Abhängigkeit von der Anzahl der Freiheitsgrade N . Die Anzahl der Freiheitsgrade N wird mit der Anzahl der Messung n mit der Beziehung $N = n - 1$ berechnet.

$$U_{SVS}(m_{Eis,S}) = k \cdot u_{SVS}(m_{Eis,S}) \quad (2-20)$$

$$W_{SVS}(m_{Eis,S}) = k \cdot w_{SVS}(m_{Eis,S}) \quad (2-21)$$

Tabelle 2-18: Erweiterungsfaktor k zur Berechnung der erweiterten Messunsicherheit (Auszug).

N	$k_{N,1-\frac{\alpha}{2}}$
1	12,706
2	4,303
10	2,228
15	2,131
20	2,086
60	2,000
∞	1,960

Eine Systematische Abweichung wird auch als Bias a_{sys} bezeichnet und nach Gleichung (2-22) berechnet. Eine systematische Abweichung kann als signifikant bezeichnet werden, wenn Gleichung (2-23) zutrifft.

$$a_{sys}(x) = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (x_{i,1} - x_{i,2}) \quad (2-22)$$

$$a_{sys}^2(x) \geq 0,5 \cdot u_{SVS}^2(x) \quad (2-23)$$

mit:

$a_{sys}(x)$	systematische Abweichung der Messgröße x z. B. der Bestimmung der Eismasse	[kg]
$u_{SVS}(x)$	Standardunsicherheit der Messgröße x des zu prüfenden Beladungssensors, ermittelt anhand von Vergleichsmessungen	[kg]
$x_{i,1}$	i-ter Messwert des zu prüfenden Beladungssensors bzw. i-ter Messwert der Messeinrichtung 1 bei Doppeltbestimmungen	[kg]
$x_{i,2}$	i-ter Messwert des Referenzmessverfahrens (wahrer Messwert) bzw. i-ter Messwert der Messeinrichtung 1 bei Doppeltbestimmungen	[kg]
n	Anzahl Messungen	[-]

2.6.2 Entwicklung einer Sensorik zur Beladungszustandserkennung

Ein wesentlicher Vorteil von Latentspeichern ist es, dass diese eine Nutzung der für den Phasenwechsel erforderlichen Energie ermöglichen. Allerdings stellt dies auch eine gewisse Herausforderung dar, da der Beladungszustand bei Latentspeichern, im Vergleich zu Wärmespeichern ohne Phasenwechsel, extrem schwierig zu ermitteln ist. Dies trifft insbesondere auf Latentspeicher mit dem Phasenwechsel fest-flüssig, also beispielsweise auf Eisspeicher zu, da die hier auftretende Volumenänderung zu einer Zerstörung des Speicherbehälters sowie der darin befindlichen Wärmeübertrager führen kann. Der Beladungszustand der von der Fa. VCS eingesetzten Eisspeicher wird derzeit über die Änderung der Höhe des Wasserstands im Speicher ermittelt. Aufgrund des Dichteunterschiedes zwischen Wasser mit $\rho_W = 999,84 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ bei $\vartheta_W = 0 \text{ }^\circ\text{C}$ und Eis mit $\rho_{Eis} = 916,67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ bei $\vartheta_{Eis} = 0 \text{ }^\circ\text{C}$, ändert sich der Wasserstand im Speicherbehälter in Abhängigkeit der Eismenge im Speicher. Die Wasserstandshöhe im Speicher wird üblicherweise mit Hilfe von Radar- oder Ultraschallsensoren erfasst. Die Erfassung der Wasserstandshöhe basiert sowohl beim Radar- als auch beim Ultraschallsensor auf der gemessenen Laufzeit der ausgesendeten und auf der Wasseroberfläche reflektierten Wellen. Der Einsatz von Radarsensoren ist für große Distanzen im Meterbereich (0,3 m bis 10 m) geeignet. Für geringe Distanzen bis 1 m sind Ultraschallsensoren geeigneter, da diese eine Auflösung $< 1 \text{ mm}$ haben.

Für die Entwicklung eines Beladungszustandssensors wurden insgesamt 12 Lösungsansätze erarbeitet und in Anlehnung an VDI 2222 Blatt 1 [63] mit Hilfe einer Matrix bewertet, um die optimale Lösungsvariante zu identifizieren. Für die Bewertung werden diverse Anforderungen an den Sensor definiert und mit einem Gewichtungsfaktor versehen. Der Grad der Annäherung an die Ideallösung wird in Form eines Punktesystems bewertet. Die erreichte Punktezahl der Sensoren wird mit der Ideallösung ins Verhältnis gesetzt und mit einem technischen Wert X ausgedrückt. Abbildung 2-78 zeigt graphisch das Ergebnis der Bewertung. Die aussichtsreichsten Lösungsvarianten wurden mit einem technischen Wert von $79 \leq X \leq 81$ bestimmt und sollen auf ihre Eignung zur Beladungszustandserkennung weiter untersucht werden. Zusätzlich sollen die Lösungsvarianten "Bilanz" und "Auftriebskraftsensor", sowie den derzeit eingesetzten Sensor "Radar/U-Schall vertikal" mit einbezogen werden. Die Lösungsvariante „Bilanz“ ist durch ihre Einfachheit, Verfügbarkeit und der Möglichkeit als Nachrüstlösung an Bestandsanlagen sehr interessant. Vorversuche haben gezeigt, dass die Messung der Auftriebskraft des Eises eine direkte Bestimmung der Eismasse und damit des Beladungszustandes zulässt.

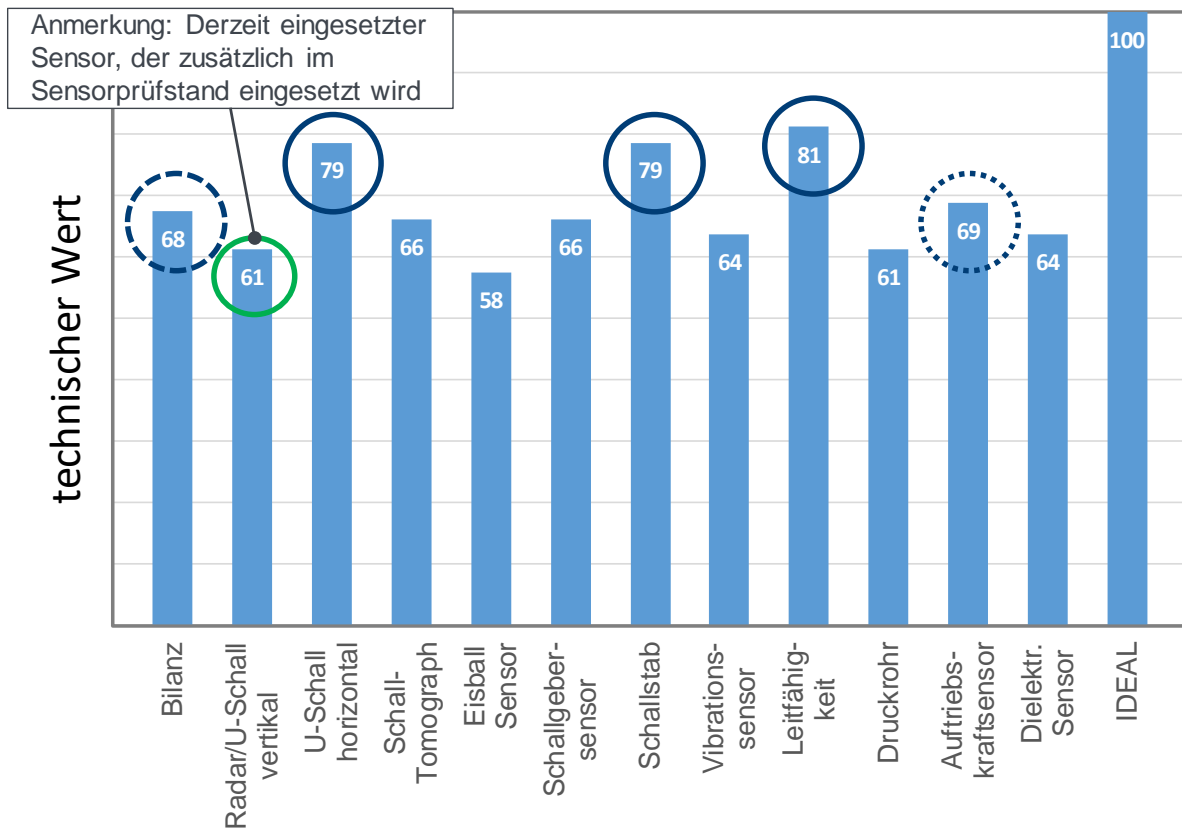
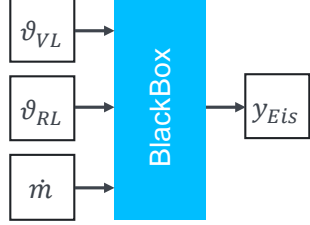
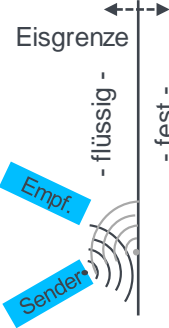
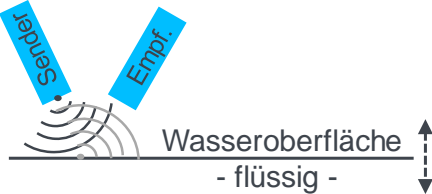

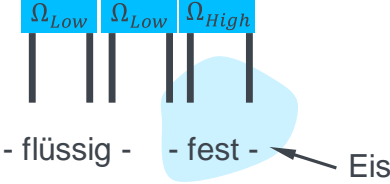
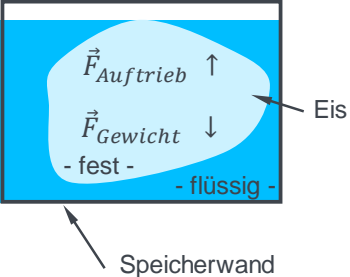


Abbildung 2-78: Graphische Darstellung der Ergebnisse der vorgenommenen Bewertung von Lösungsvarianten zur Bestimmung des Beladungszustandes von Latentspeicher.

Die als am geeignetsten identifizierten Sensoren zur Beladungszustandserkennung sind nachfolgend in Tabelle 2-19 aufgeführt und mittels einer Prinzipskizze erläutert.

Tabelle 2-19: Graphische Darstellung der Ergebnisse der vorgenommenen Bewertung von Lösungsvarianten zur Bestimmung des Beladungszustandes von Latentspeichern.

Sensor	Prinzipskizze
Bilanz	
Ultraschall horizontal	
Radar/Ultraschall vertikal	
Schallstab	
Leitfähigkeit	
Auftriebskraft	

2.6.2.1 Voruntersuchungen im Modellspeicher

Für die Laboruntersuchung der Sensoren zur Beladungszustandserkennung wurde im Rahmen des Projektes ein Modellspeicher aufgebaut. Dieser Modellspeicher dient zur generellen Überprüfung der Eignung von Sensoren und zur Bestimmung der Messunsicherheit. Die Abbildung 2-79 zeigt den Modellspeicher. Der Modellspeicher besteht aus einem Glasgefäß mit einem Fassungsvermögen von ca. 140 l. In dem Glasgefäß befindet sich ein mäanderförmiger Wärmeübertrager aus einem PTFE-Schlauch mit einem Außendurchmesser von $D_a = 6 \text{ mm}$ und einem Innendurchmesser von $D_i = 4 \text{ mm}$. Dieser Wärmeübertrager ist an einer Präzisionswaage aufgehängt, welche kontinuierlich die Masse des Wärmeübertragers bestimmt. Wird das Glasgefäß mit einem Latentspeichermaterial wie z. B. Wasser gefüllt, erfährt der Wärmeübertrager eine Auftriebskraft und die nach unten gerichtete Gewichtskraft wird geringer. Bildet sich Eis um den Wärmeübertragerschlauch, so erfährt der Wärmeübertrager ebenfalls eine Auftriebskraft in Abhängigkeit von der Menge an Eis. Dadurch kann die Eismenge im Modellspeicher erfasst werden und dient als Referenzmessung bei der Überprüfung von Sensoren zur Beladungszustandserkennung.

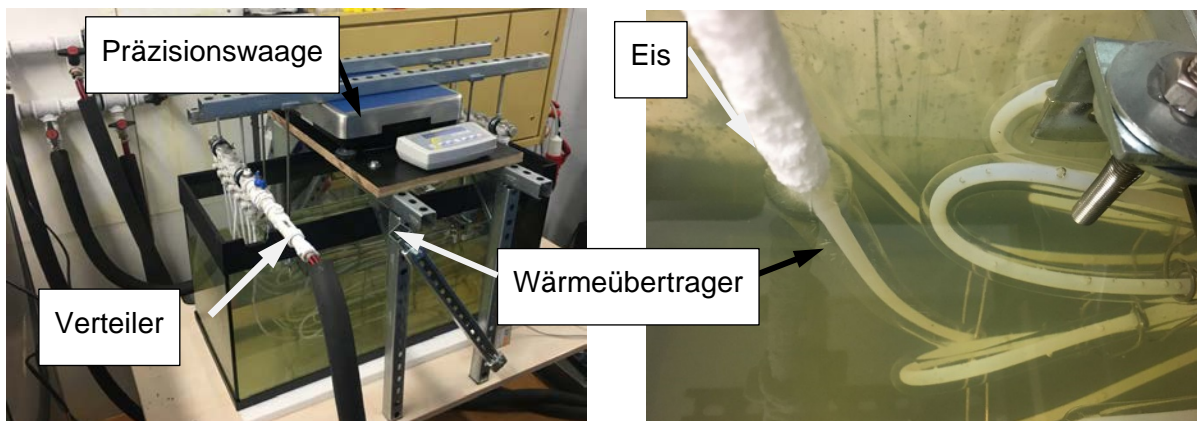


Abbildung 2-79: Modellspeicher zur Untersuchung von Sensoren zur Beladungszustandserkennung

Das Wärmeträgerfluid wird mit Hilfe eines Thermostates auf die gewünschte Temperatur eingestellt. Der Volumenstrom von ca. 6 l/min wird über den Verteiler auf insgesamt 6 Wärmeübertragerschläuche verteilt und in einem Sammler wieder vereint. Aufgrund der Dichteunterschiede in Abhängigkeit von der Temperatur des Wärmeträgerfluids, welches über den Verteiler und den Sammler durch den Wärmeübertrager strömt, ändert sich die Masse des Fluids.

Für die Untersuchungen und die Entwicklung von Beladungssensoren muss der wahre Wert des Beladungszustandes bzw. des Vereisungszustandes bekannt sein. Die Bestimmung des wahren Wertes des Vereisungszustandes soll durch Wiegen des am Wärmeübertrager anhaftenden Eises direkt bestimmt werden. Die Methode zur Bestimmung des wahren Wertes des Beladungs- bzw. des Vereisungszustandes durch Wiegen der Eismasse wird mit Hilfe des Modellspeichers im Labor überprüft und dabei Herausforderungen der Messmethodik identifiziert und diese optimiert. Bei der Bestimmung des wahren Wertes des Beladungszustandes wird davon ausgegangen, dass der Beladungszustand dem Vereisungszustand entspricht. Die

Anteile der Beladung durch fühlbare Wärme des Wassers und des Eises werden dabei vernachlässigt. Dies wird dadurch erreicht, dass der Modelleisspeicher vor und nach der Eisbildung konditioniert wird. Vor der Messung wird über mehrere Stunden der Thermostat und damit das Wärmeträgerfluid auf $\vartheta_{fluid} = 0\text{ °C}$ eingestellt. Nach Abschluss der Entladung des Modelleisspeichers wird das Wärmeträgerfluid auf $\vartheta_{fluid} = -4\text{ °C}$ eingestellt. Bei dieser Temperatur konnte festgestellt werden, dass sich sowohl kein neues Eis bildet als auch kein Eis geschmolzen wurde.

In einem ersten Schritt wird die Messunsicherheit der Präzisionswaage bestimmt. Die Bestimmung der Messunsicherheit der Präzisionswaage wurde hierfür bis zu einem Gewicht von 50 kg bestimmt. Dabei hängt der Wärmeübertrager (WÜT) ohne Wasser im Speicher frei auf der Präzisionswaage. Anschließend wird im Temperaturbereich von $-15\text{ °C} \leq \vartheta_{in} \leq 15\text{ °C}$ das Gewicht des WÜT bestimmt. Abbildung 2-80 zeigt die Dichte des Wärmeträgerfluids in Abhängigkeit der Fluidtemperatur. Da der Sammler und Verteiler sowie die Wärmeübertragerschläuche ein konstantes Volumen besitzen, ändert sich die Gesamtgewichtskraft des Wärmeübertragers auch in Abhängigkeit von der mittleren Fluidtemperatur (vgl. Abbildung 2-81 links).

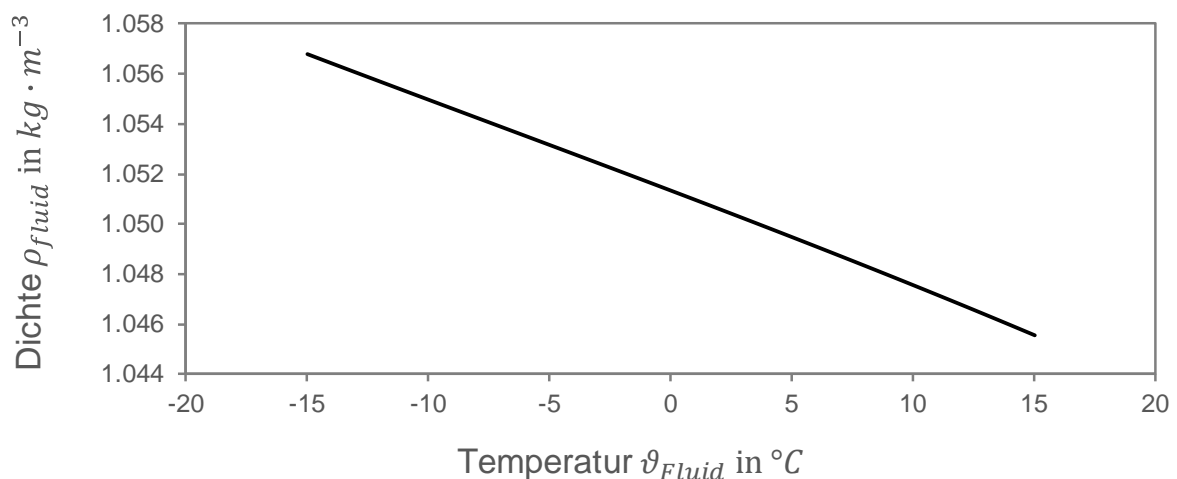


Abbildung 2-80: Änderung der Dichte in Abhängigkeit von der Fluidtemperatur des verwendeten Frostschutzmittels Tyfocor 30 %. [64]

Für die Änderung der Gewichtskraft des Wärmeübertragers in Abhängigkeit von der mittleren Fluidtemperatur ergibt sich eine Messunsicherheit in Anlehnung an VDI 4201 Blatt 1 [65] von $u(m_{WUT}) = \pm 8,015\text{ g}$ und eine erweiterte Messunsicherheit von $U(m_{WUT}) = \pm 13,18\text{ g}$ (vgl. Abbildung 2-81 rechts - erweiterte Messunsicherheit mit einem zweiseitigen Studentfaktor für eine Anzahl der Freiheitsgrade von N und einer statistischen Sicherheit von 95%).

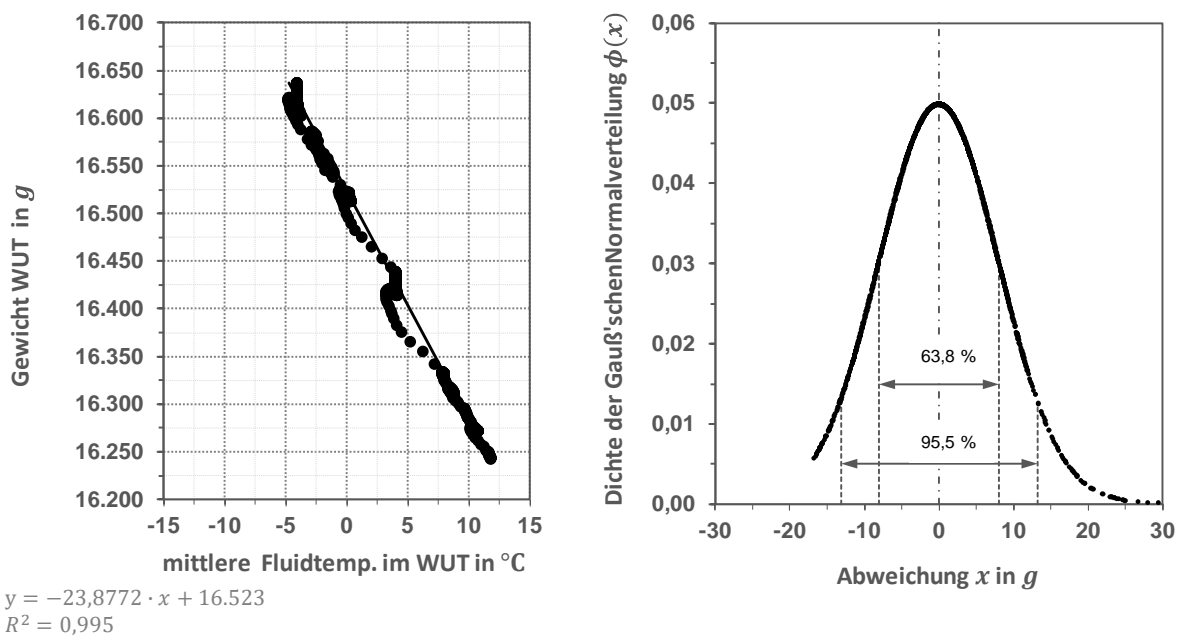


Abbildung 2-81: Änderung der Gewichtskraft des Wärmeübertragers in Abhängigkeit von der mittleren Fluidtemperatur im Wärmeübertrager (links) und Dichte der Gauß'schen Normalverteilung (rechts).

Bisher sind der Verteiler und der Sammler an der Aufhängung des Wärmeübertragers montiert und die Gewichtskraft wird über die Präzisionswaage miterfasst. Gegenüber den Wärmeübertragerschläuchen weist der Verteiler und der Sammler ein relativ großes Volumen auf. Daher soll der Verteiler und der Sammler bezüglich der Aufhängung neu positioniert und von der Gewichtsmessung des Wärmeübertragers entkoppelt werden. Dadurch ist zu erwarten, dass die Messunsicherheit bei der Bestimmung der Gesamtgewichtskraft in Abhängigkeit von der mittleren Fluidtemperatur im Wärmeübertrager deutlich verringert wird. Durch den vorher beschriebenen Umbau der Aufhängung des Verteilers und des Sammlers, sowie durch weitere Messungen wurde eine Verringerung der Messunsicherheit zur Bestimmung der Eismasse im Modellspeicher erreicht. Abbildung 2-82 links zeigt die Ergebnisse der Versuchsreihe zur Bestimmung der Messunsicherheit der Präzisionswaage mit umgebauter Aufhängung des Verteilers und des Sammlers. In Abbildung 2-82 links ist an den schwarzen Punkten erkennbar, dass bei abnehmender Temperatur auch die Gewichtskraft des Wärmeübertragers abnimmt. Nach Abbildung 2-80 müsste eigentlich eine Gewichtszunahme bei kleineren Temperaturen auf Grund einer höheren Dichte erfolgen. Das beobachtete Verhalten ist vermutlich auf eine Längenänderung der Wärmeübertragerschläuche, einhergehend mit einer Volumenverringern und auf die Änderung der Flexibilität der Wärmeübertragerschläuche zurückzuführen. Für die Präzisionswaage wurde eine Messunsicherheit von $u(m) = \pm 3,3 \text{ g}$ und einer erweiterte Messunsicherheit von $U(m) = \pm 6,6 \text{ g}$ (Vertrauensbereich 95 %) ermittelt. Bezogen auf eine typische Eismasse von bis zu 50 kg entspricht dies einer relativen Messunsicherheit von 0,013 % (vgl. Abbildung 2-82 rechts).

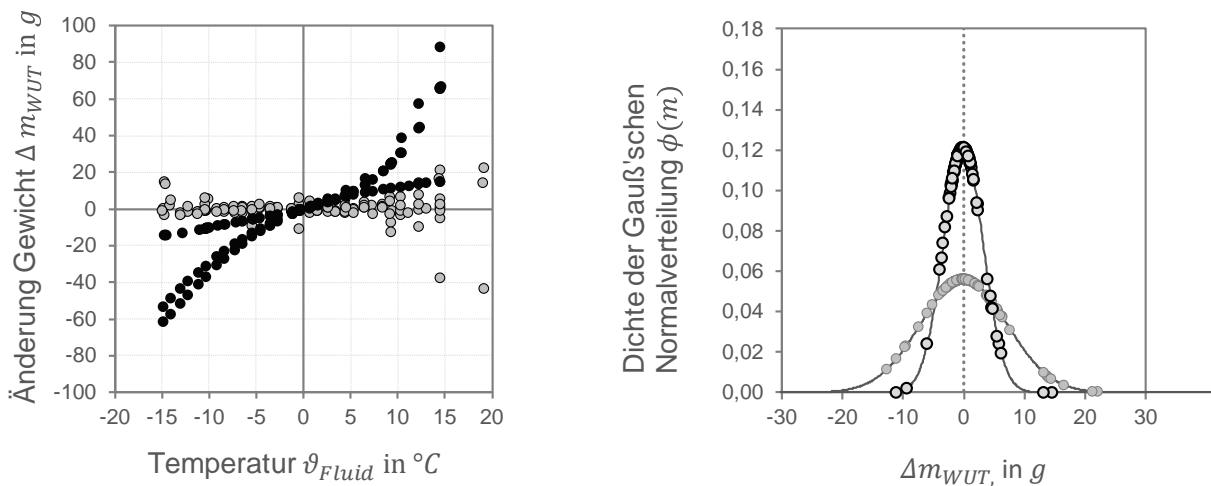


Abbildung 2-82: Änderung der Gewichtskraft des Wärmeübertragers im Modellspeicher in Abhängigkeit von der Temperatur des durchströmenden Fluids (Abb. links, schwarze Punkte) und korrigierte Gewichtskraft (Abb. links, graue Punkte). Rechts: Dichte der Gauß'schen Normalverteilung der korrigierten Gewichtskraft (grau: für einen Temperaturbereich von $-15^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_{in} \leq 15^{\circ}$, schwarz für einen Temperaturbereich von $-15^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_{in} \leq 5^{\circ}$).

Die Überprüfung der Linearität wurde mit Vereisungsversuchen durchgeführt. Dabei wurde Energie über die Wärmeübertrager aus dem Modellspeicher entzogen und es fand ein Phasenwechsel von flüssig nach fest an den Wärmeübertragerschläuchen statt. Da die Eisschicht an den Wärmeübertragerschläuchen anhaftet, erfährt der Wärmeübertrager eine Auftriebskraft, die über die Präzisionswaage bestimmt wird. Die Auftriebskraft des Wärmeübertragers mit anhaftendem Eis ergibt sich auf Grund des verdrängten Volumens an Wasser. Das verdrängte Volumen ist abhängig von der Dichte des Eises und des Wassers. Dadurch ergibt sich eine Abhängigkeit des Auftriebs von der mittleren Temperatur des Wassers im Modellspeicher.

2.6.2.2 Indirekte Bestimmung der Eismasse mittels Auftriebskraft im Modellspeicher

Die Bestimmung des tatsächlichen Gewichts des anhaftenden Eises erfolgt dadurch, dass das noch flüssige Wasser aus dem Modellspeicher gepumpt und die Gesamtmasse des Wärmeübertragers mit anhaftendem Eis bestimmt wird. Die Berechnung zur kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse $m_{Eis,S}$ erfolgt mit Hilfe eines Beladungssensors zur Detektion der Auftriebskraft nach Gleichung (2-24) und Gleichung (2-25).

$$m_{Eis,S} = r_{\rho} \cdot (m_{WTA} - m_{WTW}) \quad \text{und} \tag{2-24}$$

$$r_{\rho} = \rho_{Eis} \cdot (\rho_{liquid} - \rho_{Eis})^{-1} \tag{2-25}$$

mit:

$m_{Eis,S}$ Masse von Eis im Latentspeicher ermittelt mit einem Beladungssensor [kg]

m_{WT} Masse des Wärmeübertragers (vgl. Abb. 5) [kg]

m_{WTW}	Masse des Wärmeübertragers im flüssigen Wasser	[kg]
m_{WTA}	Masse des Wärmeübertragers mit anhaftendem Eis im flüssigen Wasser	[kg]
m_{WTE}	Masse des Wärmeübertragers mit anhaftender Eismasse am Ende der Entzugsphase (vgl. Abb. 5)	[kg]
ρ_{Eis}	Dichte von Eis bei $\vartheta_{Eis} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	[kg · m ⁻³]
ρ_{liquid}	Dichte von Wasser bei $\vartheta_{liquid} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$	[kg · m ⁻³]
τ_{ρ}	Faktor des Dichteverhältnisses zwischen flüssigem Wasser und Eis	[-]

Abbildung 2-83 links zeigt die Ergebnisse der Bestimmung der Eismasse mittels der Auftriebskraft $m_{Eis,S}$ (indirekte Eismassenbestimmung) und der direkten Messung der Eismasse $m_{Eis,R}$ im Modellspeicher. Auf Grund von stark vereisten WÜT-Rohren oberhalb der Wasseroberfläche im Luftraum oder bei der Bildung von Wasser- bzw. Luftblasen im Eis (vgl. Abbildung 2-84), wurde bei einigen Messungen bei der direkten Bestimmung der Eismasse eine höhere Eismasse bestimmt. Diese Messungen wurden als Fehlmessungen deklariert und für die Bestimmung der Messunsicherheit nicht mitbetrachtet. Für die Bestimmung der Messunsicherheit konnten 11 Versuche für die Auswertung genutzt werden. Abbildung 2-83 rechts zeigt die Dichte der Gauß'schen Normalverteilung. Bei der Eismassenbestimmung im Modellspeicher mittels Auftriebskraft ergibt sich eine Messunsicherheit von $u(m) = \pm 314\text{ g}$ und einer erweiterten Messunsicherheit von $U(m) = \pm 699\text{ g}$. bzw. eine relative erweiterte Messunsicherheit von $W_{SVS}(m_{Eis}) = \pm 35\%$. Mit der kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse auf Basis der Auftriebskraft konnte bei einer Nennmasse des Wassers von $m_{Nenn} = 145\text{ kg}$ im Modelleisspeicher der Beladungszustand mit einer Genauigkeit von $G(S_{oC}) \pm 0,44\%$ bestimmt werden.

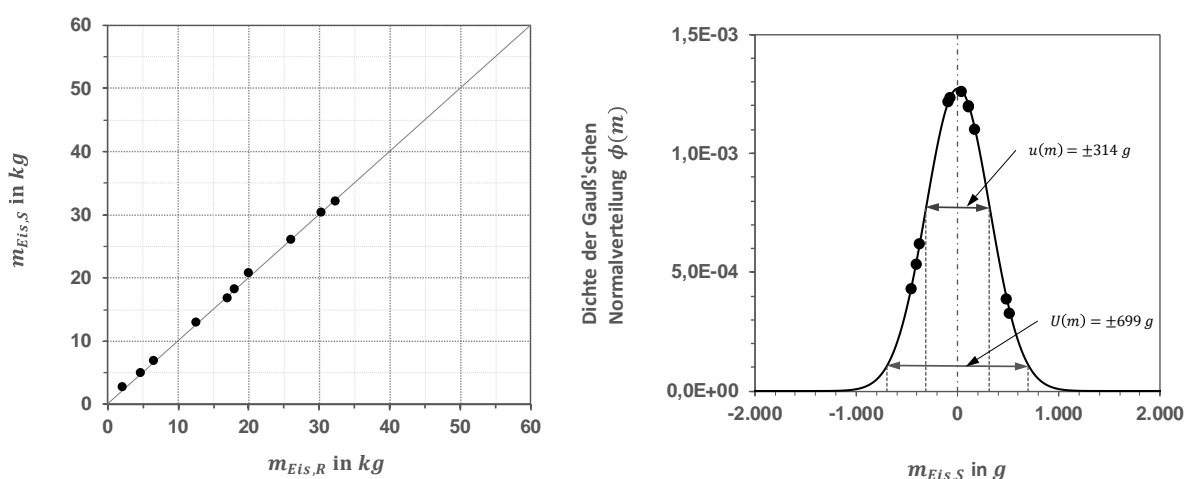


Abbildung 2-83: Vergleich der Ergebnisse der indirekten Bestimmung der Eismasse auf Grund der Auftriebskraft $m_{Eis,S}$ und der direkten Messung der Eismasse $m_{Eis,R}$ im Modelleisspeicher

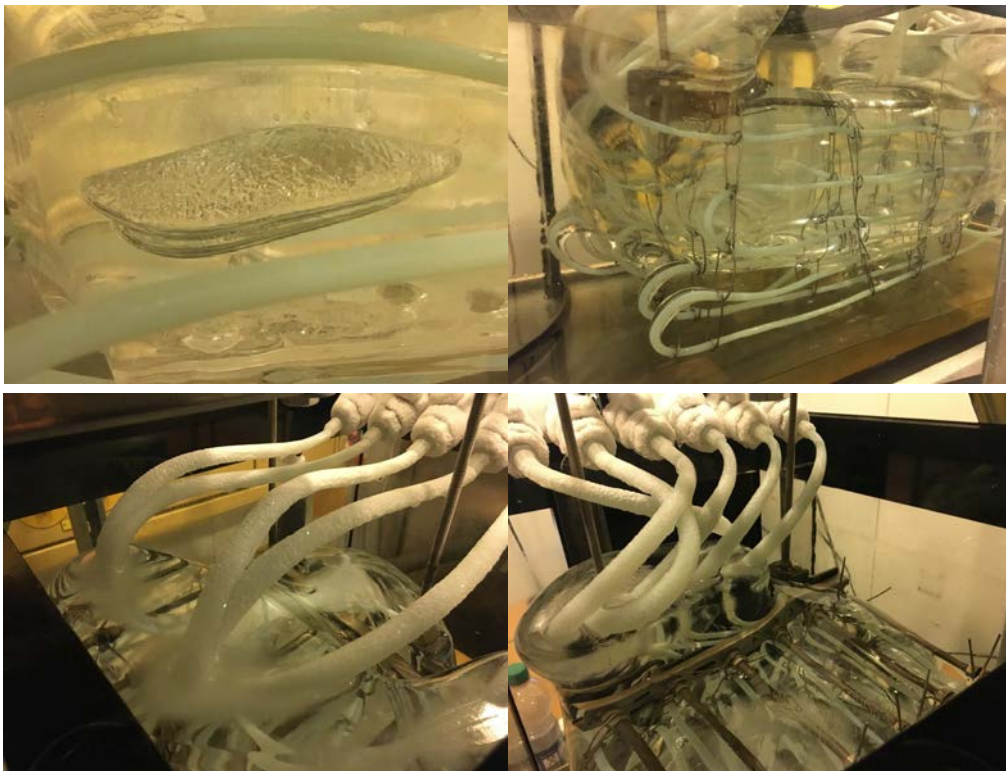


Abbildung 2-84: Ausformung des Eises, Vereisung der WÜT Rohre im Luftbereich und Wasser- bzw. Lufteingänge im Eis (rechts) bei der direkten Bestimmung der Eismasse im Modellspeicher.

2.6.2.3 Indirekte Bestimmung der Eismasse mittels Änderung des Pegelstandes im Modelleisspeicher

Für die indirekte Bestimmung des Beladungszustandes von Eisspeichern werden derzeit Abstandssensoren zur Bestimmung der Änderung des Wasserstands eingesetzt. Hierbei wird der Abstand zwischen der Wasseroberfläche und dem Sensorkopf durch die Laufzeit von z. B. Ultraschallwellen (U-Schall) oder von Radarschallwellen bestimmt. Bei der Entladung von Eisspeichern steigt der Wasserspiegel auf Grund der Dichteunterschiede zwischen flüssigem Wasser und Eis. Die Eismasse kann mit diesem Beladungssensor nach Gleichung (2-24) indirekt bestimmt werden. Bei dem Versuchseisspeicher vom Typ SE12, mit einer Grundfläche von $A_0 = 4,91 \text{ m}^2$ und einem Nenngewicht des Wassers von $m_{\text{Nenn}} = 10.000 \text{ kg}$, führt eine Erhöhung des Wasserstandes von $\Delta l_{\text{mess}} = 1 \text{ mm}$ zu einer Änderung des Beladungszustandes von $\Delta S_{oc} = 0,6 \text{ \%}$. Die Eismasse kann nach Gleichung (2-26) indirekt bestimmt werden.

$$m_{\text{Eis}} = \rho_{\text{Eis}} \cdot A_0 \cdot \left(l_{\text{mess}} - \frac{m_{\text{Wasser}}}{\rho_{\text{Wasser}} \cdot A_0} \right) \quad (2-26)$$

mit:

m_{Eis}	Masse von Eis	[kg]
m_{Wasser}	Masse von Wasser	[kg]
ρ_{Eis}	Dichte von Eis	[kg · m ⁻³]
ρ_{Wasser}	Dichte von Wasser	[kg · m ⁻³]

A_0	Grundfläche Speicher	$[m^2]$
l_{mess}	Wasserstandshöhe kontinuierlich gemessen	$[m]$



Abbildung 2-85: Bestimmung der Wasserstandshöhe im Modelleisspeicher mittels Metallmeterstab.

Abbildung 2-86 zeigt alle Ergebnisse der Bestimmung der Eismasse $m_{Eis,S}$ (indirekte Eismassenbestimmung auf Basis einer Wasserstandsänderung) und die der direkten Messung der wahren Eismasse $m_{Eis,R}$ im Modelleisspeicher. Der Wasserstand im Modelleisspeicher wurde dabei nicht mit einem Sensor bestimmt, sondern mit einem Metallmeterstab mit einer Ablesegenauigkeit von 0,5 mm. Auf Grund der geringen Änderung des Wasserstandes bei der Vereisung kann die Eismasse mit dieser Methode im Modelleisspeicher nicht zuverlässig bestimmt werden. Bei dieser Art der Eismassenbestimmung ergibt sich eine erweiterte Messunsicherheit von $U_{SVS}(m) = \pm 16.191 \text{ g}$. bzw. eine relative erweiterte Messunsicherheit von $W_{SVS}(m) = \pm 51 \%$. Mit der kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse auf Grund der Änderung des Wasserstandes konnte bei einer Nennmasse des Wassers von $m_{Nenn} = 145 \text{ kg}$ im Modelleisspeicher der Beladungszustand mit einer Genauigkeit von $G(S_{OC}) \pm 11 \%$ bestimmt werden.

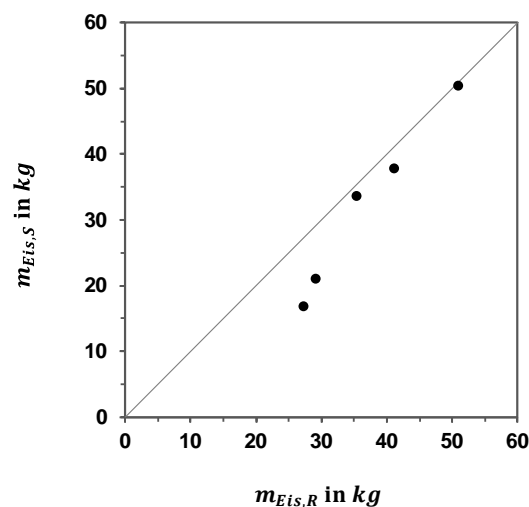


Abbildung 2-86: Vergleich der Ergebnisse der indirekten Bestimmung der Eismasse auf Grund der Änderung des Wasserstandes $m_{Eis,S}$ und der direkten Messung der Eismasse $m_{Eis,R}$ im Modellspeicher.

2.6.2.4 Versuche zur Bestimmung der Wasserstandshöhe bzw. der Eismasse mittels elektrischer Kapazität

Für weitere messtechnische Untersuchungen am Modelleisspeicher wurden an der Seitenwand Aluminiumplatten montiert, die als Elektroden für einen elektrischen Kondensator dienen. Zwischen den Aluminiumplatten befindet sich je nach Beladungszustand Luft, Wasser, Eis oder ein Gemisch aus den drei Materialien (Dielektrikum). Jedes Material besitzt eine andere relative Permittivität bzw. Dielektrizitätszahl. Die Berechnung der elektrischen Kapazität eines Plattenkondensators erfolgt entsprechend Gleichung (2-27). Tabelle 2-20 gibt die Dielektrizitätszahl der Materialien an, die als Dielektrikum im Modelleisspeicher wirken.

$$C = \epsilon_0 \cdot \epsilon_R \cdot \frac{A}{s} \quad (2-27)$$

mit:

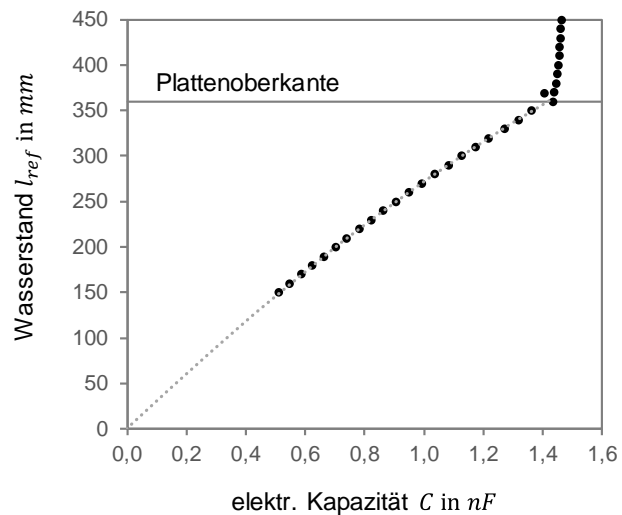
C	elektrische Kapazität	$[F]$
ϵ_0	elektr. Feldkonstante des Vakuums	$\left[\frac{A \cdot s}{V \cdot m}\right]$
ϵ_R	Dielektrizitätszahl des Dielektrikums	$[F \cdot m^{-1}]$
A	Fläche (des Wassers)	$[m^2]$
s	Plattenabstand	$[m]$

Tabelle 2-20: Dielektrizitätszahl der Materialien im Modelleisspeicher

	Dielektrizitätszahl in $[F \cdot m^{-1}]$
Luft	1,00059
Wasser 40 °C	73,3
Wasser 18 °C	81,1
Wasser 0 °C	88,0
Eis -20 °C	16,0

Abbildung 2-87 links zeigt den Versuchsaufbau zur Messung der elektrischen Kapazität am Modelleisspeicher. Bei der Befüllung des Modelleisspeichers ändert sich die elektr. Kapazität mit der Höhe des Wasserstands. Überschreitet die Wasserstandslinie die Kondensatorplatten (Höhe 360 mm) ist nur noch eine geringe Änderung der elektr. Kapazität festzustellen. Wird dieser Modellaufbau für eine Messung der Wasserstandshöhe genutzt, so kann die Messung der Wasserstandshöhe mit einer erweiterten Messunsicherheit von $U(l_{mess}) = \pm 3,4 \text{ mm}$ bestimmt werden. Wird hingegen der Modellspeicher bis über die Höhe der Kondensatorplatten

gefüllt, so ist eine Änderung der elektrischen Kapazität auf Grund der verschiedenen Dielektrizitätszahlen von Wasser und Eis zu erwarten. Allerdings ändert sich die Dielektrizitätszahl nach Tabelle 2-20 von Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur.



$$l_{mess} = -41,2005 \cdot C^2 + 312,688 \cdot C$$

$$R^2 = 0,999256$$

$$U(l_{mess}) = \pm 3,4 \text{ mm}$$

Abbildung 2-87 : links: Versuchsaufbau zur Messung der elektrischen Kapazität am Modelleisspeicher; rechts: Bestimmung der Wasserstandshöhe in Abhängigkeit von der elektrischen Kapazität

Abbildung 2-88 zeigt den Zusammenhang zwischen der Wassertemperatur und der elektrischen Kapazität. Angangs fällt die mittlere Temperatur vom flüssigen Wasser von ca. $\bar{\vartheta}_{Wasser} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ auf ca. $\bar{\vartheta}_{Wasser} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ nahezu linear ab. Bis zu einer mittleren Temperatur von ca. $\bar{\vartheta}_{Wasser} = 6 \text{ }^\circ\text{C}$ nimmt die elektrische Kapazität überproportional ab. Ab einer elektrischen Kapazität von $C = 1,37 \text{ nF}$ ist kein Zusammenhang mehr zwischen Wassertemperatur und elektrischer Kapazität zu erkennen. Eis hat sich hier noch nicht gebildet. Die Verringerung der elektr. Kapazität bei gleichbleibender mittlerer Wassertemperatur von ca. $\bar{\vartheta}_{Wasser} = 4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ könnte auf eine Sättigung der elektr. Kapazität hindeuten.

Für den Fall, dass dem Modelleisspeicher mehr Wärme entzogen wird, sodass eine Eisbildung im Bereich des Wärmeübertrager einsetzt, sind die entsprechenden Zusammenhänge in Abbildung 2-89 dargestellt. Anfangs ist ein steiler Abfall der mittleren Temperatur des flüssigen Wassers von ca. $\bar{\vartheta}_{Wasser} = 4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ auf ca. $\bar{\vartheta}_{Wasser} = 1,2 \text{ }^\circ\text{C}$ erkennbar. Bei einer elektr. Kapazität von ca. $C = 1,30 \text{ nF}$ setzt die Eisbildung ein (schwarze Linie in Abbildung 2-89). Zwischen einer elektrischen Kapazität von ca. $C = 1,30 \text{ nF}$ und ca. $C = 1,26 \text{ nF}$ ist ein linearer Zusammenhang zwischen elektrischer Kapazität und Eismasse erkennbar. Anschließend folgt ein horizontaler Verlauf der Eismasse über der elektrischen Kapazität. Ab einer elektrischen Kapazität von ca. $C = 1,22 \text{ nF}$ ist wieder ein linearer Zusammenhang zur Eismasse erkennbar. Unterhalb einer elektrischen Kapazität von ca. $C = 1,1 \text{ nF}$ flacht die Zunahme der Eismasse in

Abhängigkeit von der elektrischen Kapazität deutlich ab. Dieser Effekt könnte jedoch auch mit dem Messbereich bzw. der Sensitivität des verwendeten Multimeters zusammenhängen, da bei derartig geringen elektrischen Kapazitäten das untere Ende des Messbereichs erreicht wird.

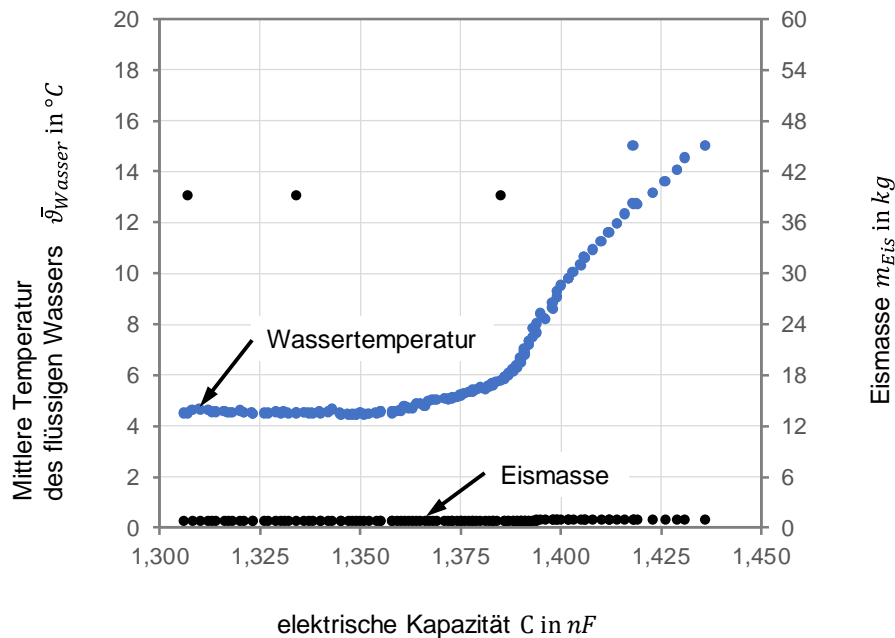


Abbildung 2-88: Mittlere Temperatur des flüssigen Wassers (blaue Linie) in Abhängigkeit von der elektrischen Kapazität des Modellspeichers **ohne** Eisbildung (schwarze Linie)

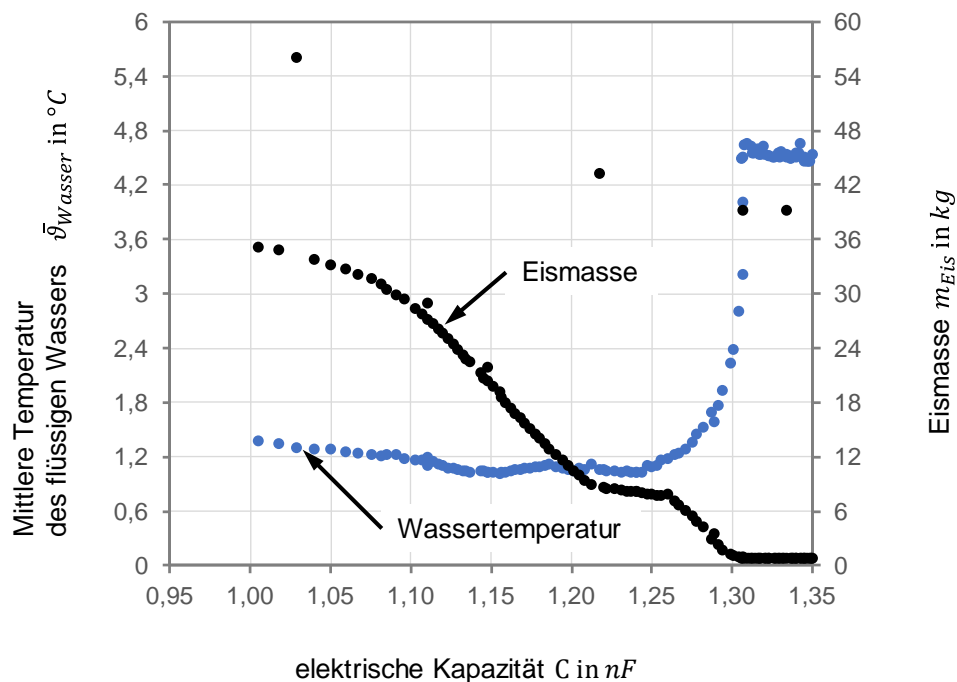


Abbildung 2-89: Mittlere Temperatur des flüssigen Wassers (blaue Linie) in Abhängigkeit von der elektrischen Kapazität des Modellspeichers **mit** Eisbildung (schwarze Linie)

Für die Messung der elektrischen Kapazität wurde nur eine Versuchsreihe durchgeführt, da die Werte der elektrischen Kapazität manuell aufgezeichnet werden mussten. Die Ergebnisse dieses ersten Versuchs zur Bestimmung des Beladungszustands durch Messen der elektrischen Kapazität sehen vielversprechend aus. Diese Art der Bestimmung des Beladungszustands von Eisspeichern mit rechteckigem Behälter könnte in einem nachfolgenden Forschungsvorhaben dezidiert untersucht werden. Für einen Einsatz im Versuchseisspeicher am Außenprüfstand ist bei einem runden Behälter die Einbringung von Kondensatorplatten nicht ohne Umbaumaßnahmen des Wärmeübertragergestells möglich. Für reale, große Eisspeicher ist die Methode als integrale Messung wegen der benötigten Dimensionen der Kondensatorplatten wenig geeignet. Für eine lokale Messung bleibt die Unsicherheit der Abhängigkeit der Dielektrizitätszahl von der Wasserqualität. Entmineralisiertes Wasser (Regenwasser) und Eis ähneln deutlich mehr als Leitungswasser und Eis. Daher wird diese Methode der indirekten Bestimmung der Eismasse in diesem Vorhaben nicht weiter untersucht.

2.6.2.5 Fazit Vorversuche mittels Modelleisspeicher

In den vorherigen Abschnitten wurden Voruntersuchungen von diversen Sensoren zur Bestimmung der Eismasse mittels Modelleisspeicher auf ihre generelle Eignung hin untersucht. Bei der Bestimmung der Eismasse mittels Auftriebskraft mit Modelleisspeicher konnten zufriedenstellende Ergebnisse erstellt werden. Diese Methode zur Bestimmung der Eismasse in Eisspeichern eignet sich generell gut und es wird eine rel. Messunsicherheit bzw. eine hohe Genauigkeit zur Bestimmung des Beladungszustands von Eisspeichern erwartet. Die indirekte Bestimmung der Eismasse wird stark beeinträchtigt, wenn sich Luft einschließen im Eis bilden. Bei der Bestimmung der Referenzeismasse (richtiger Wert der Eismasse) kam es zu Einschlüssen von flüssigem Wasser, was diese Referenzmessung der Eismasse beeinträchtigt hat. Die Umstände der Luft- und Wassereinschlüssen muss bei der Untersuchung von Beladungssensoren im Labormuster für Latentspeicher (Versuchseisspeicher) beachtet werden.

Die Bestimmung der Eismasse mittels Änderung des Pegelstands im Modelleisspeicher war nicht zufriedenstellend. Dies lag an der rel. geringen Änderung des Pegelstandes bei der Entstehung des Eises und konnte mittels Metallmaßstab nicht in der nötigen Genauigkeit erfasst werden. Die Messunsicherheit und die Eignung der Abstandsmessung mittels Abstandssensoren soll daher in einem Pegelprüfstand weitergehend untersucht werden.

Die Bestimmung der Wasserstandshöhe bzw. der Eismasse mittels elektrischer Kapazität sahen im Modelleisspeicher vielversprechend aus. Für einen Einsatz im Versuchseisspeicher am Außenprüfstand ist bei einem runden Behälter die Einbringung von Kondensatorplatten nicht ohne Umbaumaßnahmen des Wärmeübertragergestells möglich. Daher wird diese Methode der indirekten Bestimmung der Eismasse in diesem Vorhaben nicht weiter untersucht. Diese Art der Bestimmung des Beladungszustands von Eisspeichern mit rechteckigem Behälter sollte in einem nachfolgenden Forschungsvorhaben dezidiert untersucht werden.

2.6.2.6 Bestimmung der Messunsicherheit von Sensoren zur Abstandsmessung mit einem Pegelprüfstand

Die Angaben zu den Herstellern der untersuchten Sensoren werden aus dem öffentlichen Bericht herausgenommen. Aus wettbewerbsrechtlichen Gründen ist ein Vergleich verschiedener Hersteller nicht so einfach darstellbar. Es werden, unabhängig vom Hersteller, die unterschiedlichen Messprinzipien gegenübergestellt und ihre Eignung für die Anwendung diskutiert.

Für die Messung der Pegelstandshöhe in Eisspeicher kommen grundsätzlich Sensoren in Betracht, die die Lauflänge von Ultraschallwellen und Radarwellen messen und auswerten. Tabelle 2-21 listet Sensoren auf, die in für die Pegelstandsmessung in Frage kommen. Untersucht werden soll der verwendete Ultraschallsensor C und der ebenfalls in der Praxis verwendete Radarsensor D. Es ist jedoch kein ausreichender Kenntnisstand über ihre Messgenauigkeit, Langzeitstabilität und sonstige Fehleranfälligkeit vorhanden. Die Sensoren E und G konnten auf Grund von Lieferzeiten und Kommunikationsschwierigkeiten erst im Versuchseisspeicher verwendet werden.

Tabelle 2-21: Ausgewählte Sensoren mit Herstellerdaten. Werden mehrere Sensoren eines Typs untersucht, so wird die Typen-Nr. mit einer Zahl ergänzt (Bsp. C1)

Nr.	Messprinzip	Herstellerangabe zur Genauigkeit	Ausgang	Messbereich
C1 C2	Ultraschall	Wiederholgenauigkeit: < 0,5 mm	Analog: 4 – 20 mA	70 – 1000 mm
D	Radar	Messabweichung: ≤ 2 mm	Analog: 0 – 10 V	bis 15 m
E	Geführte Radarwelle	Wiederholgenauigkeit: ± 5 mm	Digital	100 – 1600 mm
G	Ultraschall	Wiederholgenauigkeit: < 0,7 %	Digital	60 – 800 mm

Um die Fehlerquellen und Einflussfaktoren möglichst unabhängig von anderen Einflussfaktoren untersuchen zu können, wurden diese an unterschiedlichen Messeinrichtungen, wie Laboraufbauten und Prüfständen, untersucht. In Tabelle 2-22 ist ein Überblick über die Messeinrichtungen und die daran untersuchten Einflussfaktoren gegeben.

Labortisch

Bevor die Ultraschall-Abstandssensoren C1 - C3 im Pegelprüfstand untersucht werden, ist eine Kalibrierung des analogen Ausgangssignals in Abhängigkeit des entsprechenden Abstands vorzunehmen. Die Sensoren D, E und G verfügen über eine digitale Schnittstelle und

geben den Messwert in Millimeter aus. Die Kalibrierung von zwei baugleichen Ultraschallsensoren erfolgte auf einem Labortisch. Bei dieser Vorversuchsreihe wird zusätzlich die Messunsicherheit für Flächen mit verschiedenem Reflexionsvermögen bestimmt und die Auswirkungen bei einer Winkelabweichung untersucht.

Abbildung 2-90 zeigt den Versuchsaufbau und die verwendeten Oberflächen. In Tabelle 2-23 ist die Messunsicherheit der verwendeten Ultraschallsensoren C1 und C2 für unterschiedliche Oberflächen aufgelistet. Als Referenzlänge dient ein Metallmaßband. Bei diesen Vorversuchen hat der Ultraschallsensor die kleinste Messunsicherheit, wenn als reflektierende Oberfläche die Tischplatte oder das Wasser dient. Bei der Untersuchung von Wasser als reflektierende Oberfläche wurden zusätzlich Wellen in der Wasserschale erzeugt, die im realen Speicher z. B. durch abtropfendes Kondenswasser verursacht werden können. Da bei diesem Versuch nur jeweils ein Versuch bei unterschiedlichen Wellen untersucht wurde, zeigt Tabelle 2-24 die Messunsicherheit bei einem Vertrauensbereich von 68%. Der Versuch zeigt, dass die Intensität der Wellenbewegung einen großen Einfluss auf die Messunsicherheit der verwendeten Ultraschall C1 und C2 Abstandssensoren haben.

Tabelle 2-25 zeigt die Messunsicherheit der verwendeten Ultraschallsensoren bei einer Winkelabweichung zur Normalen, für die Verwendung einer Tischplatte als reflektierende Oberfläche. Ab einer Winkelabweichung von größer 5° ist ein überproportionaler Anstieg der Messunsicherheit erkennbar.

Tabelle 2-22: Überblick der Messeinrichtungen und untersuchten Einflussfaktoren.

Messeinrichtung	Einflussfaktor	Sensoren Nr.
Messtisch	Kalibrierung	C1, C2
	Winkeländerung	C1
	Oberflächeneinfluss	C2
	Wellen	C2
Laborprüfstand	Sensorhalterungen	C1, C2, D
	Oberflächeneinfluss	C1, C2, D
	Messunsicherheit und Distanz	C1, C2, D
	Luftblasen	C1, D
	Nebel	C1, C2, D
	Kondensatbildung	C1, C2, D
Kältekammer	Temperaturniveau	C1, C2, D
Versuchseisspeicher	Temperaturänderung	C1, C2, D
	Reifbildung	C1, C2, D
Versuchseisspeicher	Reale Umgebung	C1, C2, C3, D, E, G

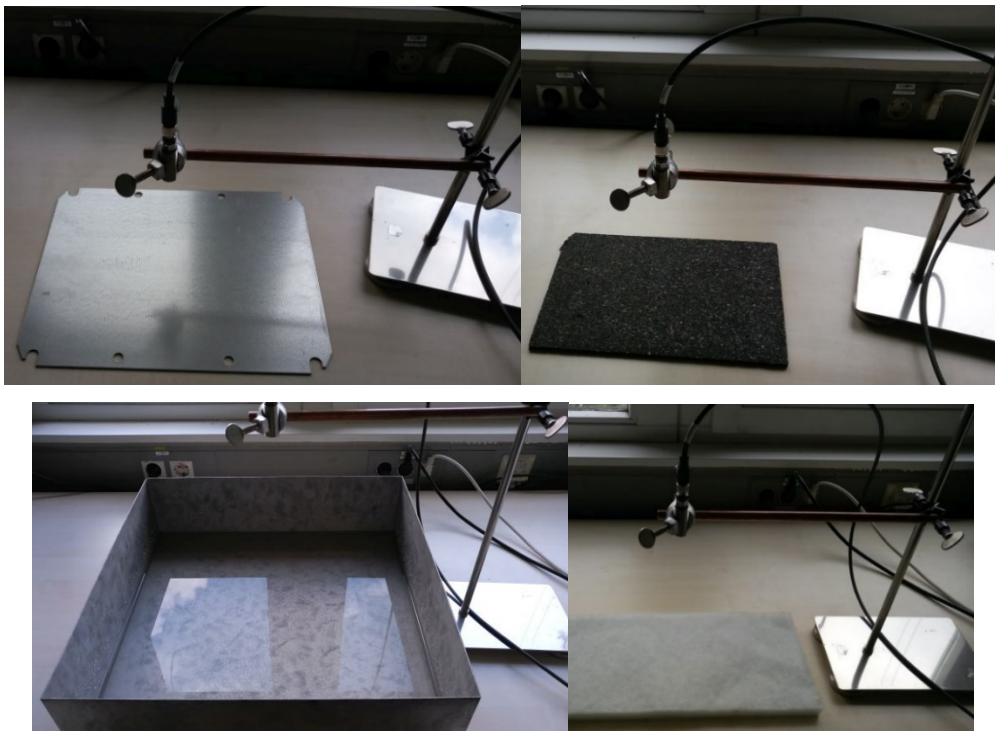


Abbildung 2-90: Bestimmung der Messunsicherheit von U-Schall Abstandssensoren C1 - C2 für verschiedene reflektierende Oberflächen: Metall, Gummimatte, Wasser, Faserfließ (von links oben nach rechts unten)

Tabelle 2-23: Messunsicherheit $u(l)$, Student-T und erweiterte Messunsicherheit $U(l)$ der Ultraschall-Abstandssensoren C1 und C2 für verschiedene reflektierende Oberflächen mit Messanordnung auf dem Labortisch.

	Oberfläche				
	Tischplatte	Metall	Gummimatte	Wasser	Faservlies
$u(l)$	$\pm 1,2 \text{ mm}$	$\pm 1,7 \text{ mm}$	$\pm 2,0 \text{ mm}$	$\pm 0,9 \text{ mm}$	$\pm 2,5 \text{ mm}$
Student-T	2,009	2,776	2,776	2,776	2,776
$U(l)$	$\pm 2,4 \text{ mm}$	$\pm 4,8 \text{ mm}$	$\pm 8,6 \text{ mm}$	$\pm 2,5 \text{ mm}$	$\pm 7,0 \text{ mm}$

Tabelle 2-24: Messunsicherheit von Ultraschall-Abstandssensoren C1 und C2 für verschiedene Reflektionseigenschaften von Wasser mit Messanordnung auf dem Labortisch bei einem Vertrauensbereich von 68 %.

	Oberfläche Wasser			
	glatte Oberfl.	kleine Wellen	mittlere Wellen	mittlere Wellen
$u(l)$	$\pm 0,9 \text{ mm}$	$\pm 1,1 \text{ mm}$	$\pm 2,4 \text{ mm}$	$\pm 2,3 \text{ mm}$

Tabelle 2-25: Messunsicherheit $u(l)$, Student-T und erweiterte Messunsicherheit $U(l)$ von Ultraschall-Abstandssensoren C1 und C2 bei einer Winkelabweichung zur Normalen mit Messanordnung auf dem Labortisch.

	Winkelabweichung zur Normalen (90°)			
	0°	5°	10°	15°
$u(l)$	± 1,2 mm	± 1,9 mm	± 2,6 mm	± 9,1 mm
Student-T		3,182	3,182	3,182
$U(l)$	± 2,4 mm	± 6,1 mm	± 8,4 mm	± 29 mm

Pegelprüfstand

Für die Bestimmung der Messunsicherheit von Beladungssensoren, die auf der indirekten Bestimmung des Beladungszustandes durch die Änderung des Wasserstandes im Speicher beruhen, wurde am IGTE ein Pegelprüfstand entwickelt und aufgebaut (vgl. Abbildung 2-91). An diesem Prüfstand kann die Messunsicherheit der Abstandsmessung, d.h. ohne den Einfluss der Eisausbildung im Speicher, eindeutig und reproduzierbar bestimmt werden. Die Bestimmung der Messunsicherheit erfolgte dabei mit zwei identischen U-Schall Sensoren (Sensor C1 und C2) und dem Sensor D. An dem Pegelprüfstand können zwei Sensoren gleichzeitig betrieben und deren Messdaten erfasst werden. Der Pegelstand über eine Zu- und Ableitung einreguliert. Für Referenzmessungen ist ein starrer Metallmeterstab mit einer Ablesegenauigkeit von 0,5 mm an der transparenten Röhre (Pos. 2) des Prüfstands angebracht.

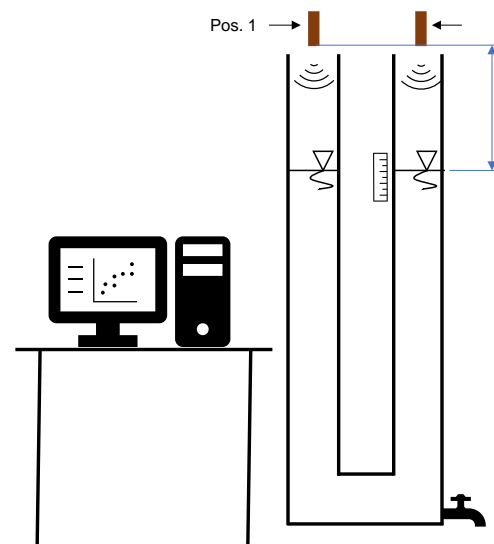


Abbildung 2-91: Pegelprüfstand zur Bestimmung der Messunsicherheit von Sensoren zur Bestimmung des Beladungszustandes von Eisspeichern, die auf einer Messung der Änderung der Höhe des Wasserstands basieren

Als erstes der Einfluss von verschiedenen Sensorhalterungen untersucht, welche in Abbildung 2-92 dargestellt sind. Die Untersuchungen wurden mit den Sensoren C1, C2 und D durchgeführt. Untersucht wurden die Befestigungen der Sensoren in Kunststoffdeckeln, welche die Röhren des Laborprüfstandes komplett verdeckten und direkt auf den Röhren auflagen. Des Weiteren wurde eine Befestigungsvariante in einem Aluminiumblech untersucht, welche die Röhren des Laborprüfstandes teilweise abdeckte und einen Luftspalt zwischen Rohrende und Sensoren aufwies. Das Aluminiumblech wurde mit einem nicht waagrechten Ablenklech versehen, um Reflexionen zu vermeiden bzw. abzulenken. Außerdem wurden Halterungen aus Stahlblech getestet, welche ebenfalls mit einem Abstand zur Röhrenöffnung montiert wurden. Mit den Ultraschallsensoren C1 und C2 in den geschlossenen Deckel (a) (vgl. Abbildung 2-92, links oben) konnten keine aussagekräftigen Messergebnisse erzielt werden. Eine mögliche Ursache dafür sind Reflexionen der Ultraschallwellen.

Die Messunsicherheiten $u_{SV}(l)$ für die Messungen mit den Sensoren in der Aluminiumblechhalterung (b) (vgl. Abbildung 2-92, links unten) bei $u_{SV}(l) = \pm 130 \text{ mm}$.



Abbildung 2-92: Befestigung der Sensoren in geschlossenen Deckeln (a) (links oben), in Aluminiumblech mit Abstand (b) (links unten) und in Stahlwinkeln mit Abstand (c) (rechts).

Aufgrund dieser ungenügenden Ergebnisse wurden mit den Befestigungen (a) und (b) keine weiteren Messungen durchgeführt. Für alle weiteren Messungen am Laborprüfstand wurden die Halterungen aus Stahlblech (c) verwendet.

Mit Sensor D wurden Untersuchungen mit zwei verschiedenen Halterungen durchgeführt. Es wurden zwei Halterungen mit unterschiedlich großen Flächen für mögliche Reflexionen der Radarwellen untersucht. Zum einen eine Halterung aus Metall mit einer minimalen Fläche und zum anderen ein Kunststoffdeckel, vergleichbar mit Befestigung (a), welcher die Öffnung des Prüfstandes komplett verschließt. Es konnten dabei keine signifikanten Auswirkungen der Befestigung auf die Messunsicherheit festgestellt werden. Für alle folgenden Untersuchungen des Sensors D wurde die Halterung mit dem Kunststoffdeckel wie in Abbildung 2-92, links oben verwendet.

Des Weiteren sind Versuche mit Tröpfchen auf der Sensorkopfoberfläche durchgeführt worden (vgl. Abbildung 2-93, links) die allerdings keinen reproduzierbaren und eindeutigen Einfluss auf das Messsignal haben. Bei diesen Messungen hat sich gezeigt, dass sich beim Befüllen Luftblasen an den Seitenwänden bilden und an der Wasseroberfläche ansammeln (vgl. Abbildung 2-93, rechts).



Abbildung 2-93: links: Untersuchung Einfluss von Wassertropfen auf der Sensorkopfoberfläche; rechts: Untersuchung Einfluss von Luftblasen an der Wasseroberfläche

Um den Einfluss der Wasseroberfläche und damit der reflektierenden Fläche zu reduzieren, erfolgten Langzeitversuche mit einem Schwimmer aus Polyurethanschaum. Es wurden Messungen direkt auf die Wasseroberfläche und auf einen auf der Wasseroberfläche schwimmenden mit Aluminium kaschierten Polyurethanschaum durchgeführt (vgl. Abbildung 2-94). Es wurden die Sensoren C1, C2 und D untersucht. Die Abweichung von der Referenz der Sensoren C1 und C2 lag in der 10-tägigen Messreihe zwischen $\Delta l = -0,2 \text{ mm}$ (C1) und $\Delta l = 0,7 \text{ mm}$ (C2). Die Differenz der Abweichung lag zwischen $-0,7 \text{ mm}$ und $0,1 \text{ mm}$ und im Mittel bei $-0,325 \text{ mm}$. Die Verdunstungsrate lag mit $0,1 \text{ mm}$ pro Tag um eine Dimension unter den Werten, die bei Messungen ohne Schwimmer gemacht wurden. Darin begründet sich auch die geringere Abweichung von der Referenzmessung. Durch die klar definierte Oberfläche des Schwimmers im Vergleich zur Wasseroberfläche kann auch von einer höheren Genauigkeit beim Ablesen der Referenzmessung ausgegangen werden. In der Abbildung 2-95 und Abbildung 2-96 sind die Messdaten eines Tages aus der Messreihe ohne und mit Schwimmer dargestellt.



Abbildung 2-94: Polyurethan-Schwimmer in den beiden Röhren des Pegelprüfstandes.

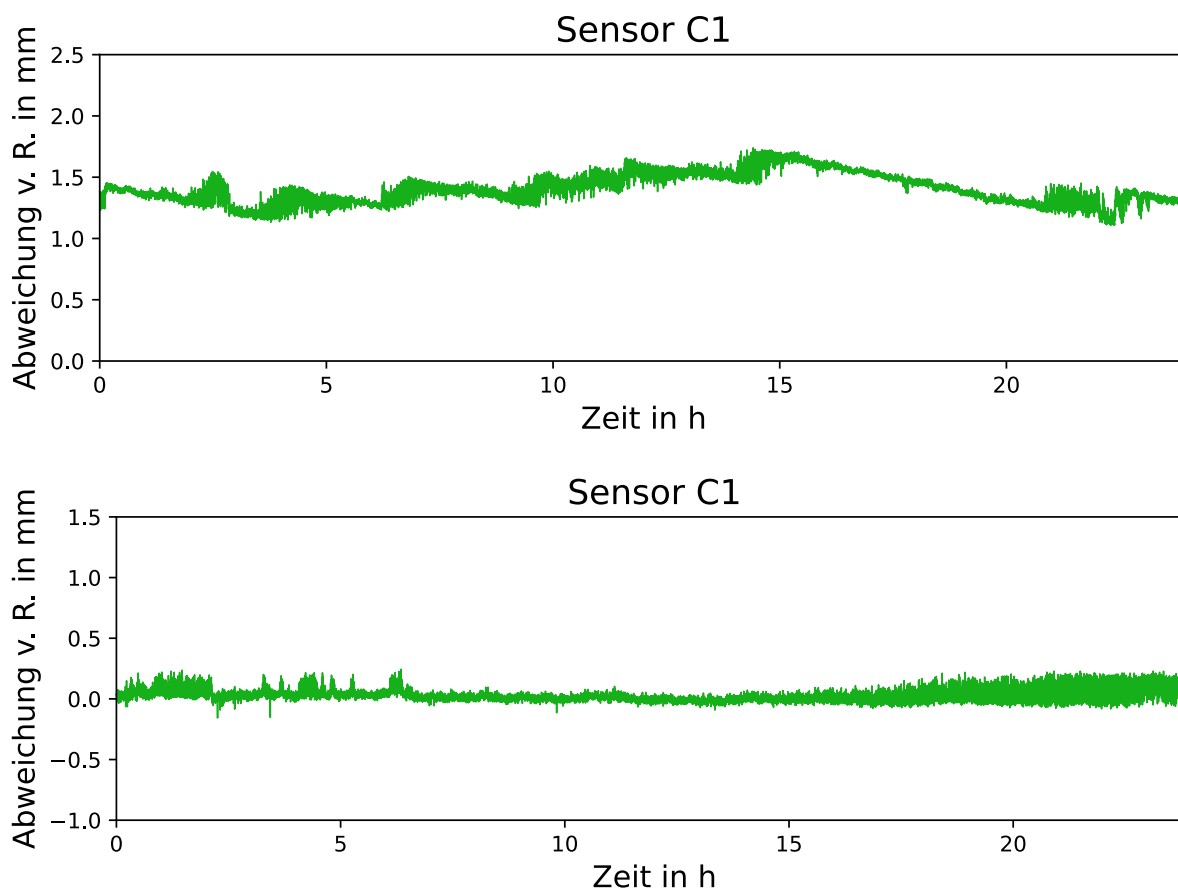


Abbildung 2-95: Abweichung von Referenz des Sensoren C1 ohne (oben) und mit (unten) Polyurethan-Schwimmer über einen Zeitraum von 24 h.

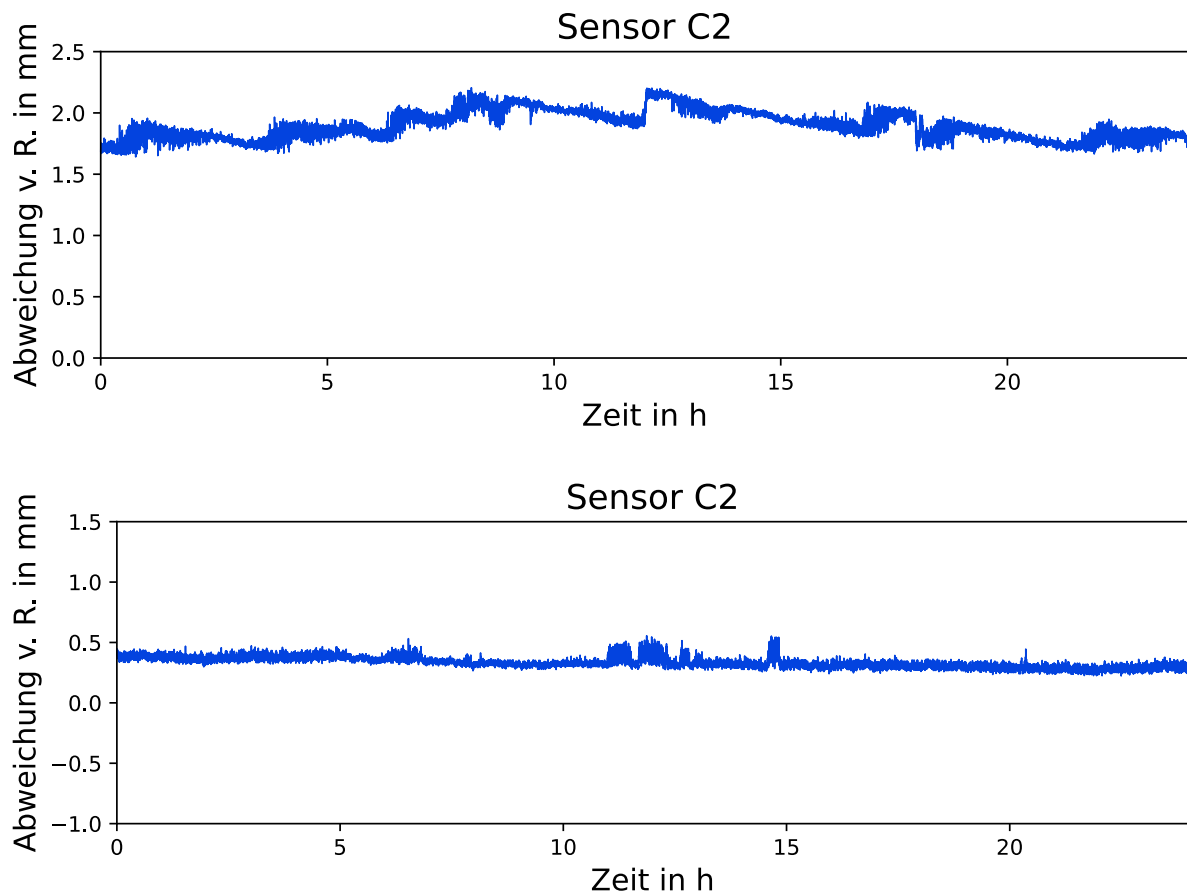


Abbildung 2-96: Abweichung von Referenz des Sensoren C2 ohne (oben) und mit (unten) Polyurethan-Schwimmer über einen Zeitraum von 24 h.

Für den Sensor D konnte kein Einfluss des Polyurethan-Schwimmers auf das Messsignal festgestellt werden.

Im Pegelprüfstand wurden des Weiteren Messungen mit Ultraschall und Radarwellen Abstandssensoren zur Bestimmung der Messunsicherheit durchgeführt. In Abbildung 2-97 links ist das Ergebnis der Längenmessung des Ultraschall-Abstandssensors (C1) im Vergleich zur Referenzlängenmessung dargestellt. Die Bestimmung der Messunsicherheit erfolgte dabei mit zwei identischen Ultraschallsensoren. Abbildung 2-97 rechts zeigt die Dichte der Gauß'schen Normalverteilung für die Messungen mit dem Ultraschall-Abstandssensor vom Typ C. Es ist zu erkennen, dass die Ultraschall Sensoren vom Typ C durchschnittlich eine Mittelpunktsverschiebung von $l_{US,C} = 0,21 \text{ mm}$ aufweisen.

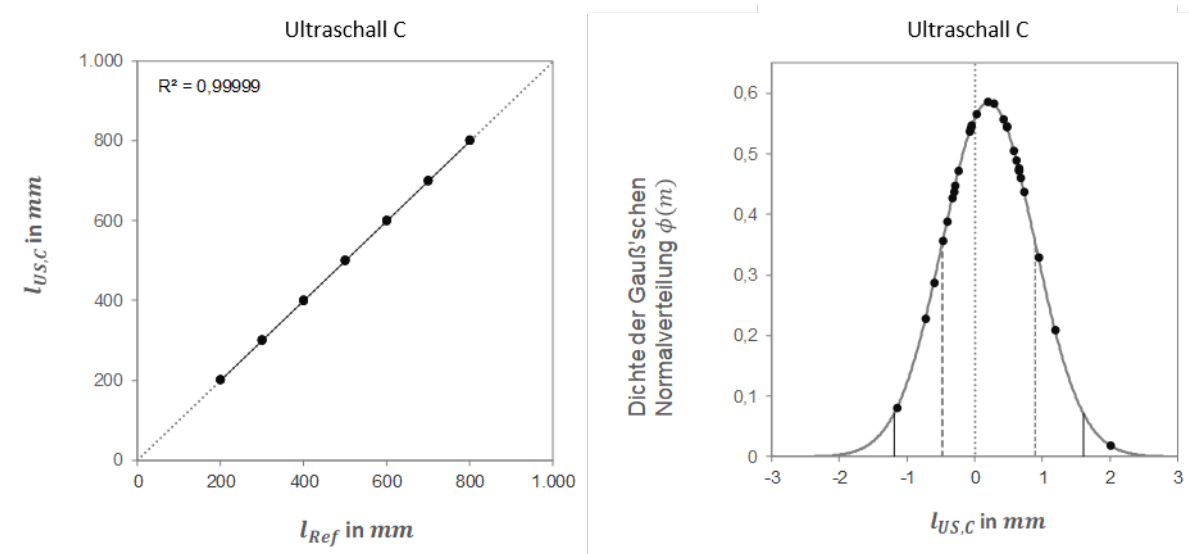


Abbildung 2-97: links: Ergebnis der Längenmessung mit dem Ultraschall-Abstandssensor C1 im Vergleich der Referenzlängenmessung; rechts: Dichte der Gauß'schen Normalverteilung für die Messungen mit dem Ultraschall-Abstandssensor C1

In Abbildung 2-98 links ist das Ergebnis der Längenmessung der Radarwellen-Abstandssensor im Vergleich zu den Referenzlängenmessungen dargestellt. Die Bestimmung der Messunsicherheit erfolgte dabei nur mit einem Radarwellen Sensor. Abbildung 2-98 rechts zeigt die Dichte der Gauß'schen Normalverteilung $\phi(m)$ für die Messergebnisse mit dem Radarwellen-Abstandssensor D im Vergleich zur Referenzlängenmessung. Es ist zu erkennen, dass der Radarwellen Sensor D durchschnittliche eine Mittelpunktsverschiebung von $l_{US,C} = 1,24 \text{ mm}$ aufweist.

Abbildung 2-99 zeigt die Abweichung der Füllstandshöhe, bestimmt mit den Ultraschall Sensoren C1 (links) und mit den Radarwellen Sensor D (rechts) zur Referenzmessung, in Abhängigkeit von der tatsächlichen Füllstandshöhe. Es ist zu erkennen, dass bei den Ultraschall Sensoren C die Abweichung der gemessenen Füllstandshöhe gleichmäßig über den gesamten Messbereich vorhanden ist. Im Gegensatz dazu steigt die Abweichung der Füllstandshöhe bei den Messungen mit dem Radarwellen Sensor D mit zunehmender Abstandslänge an.

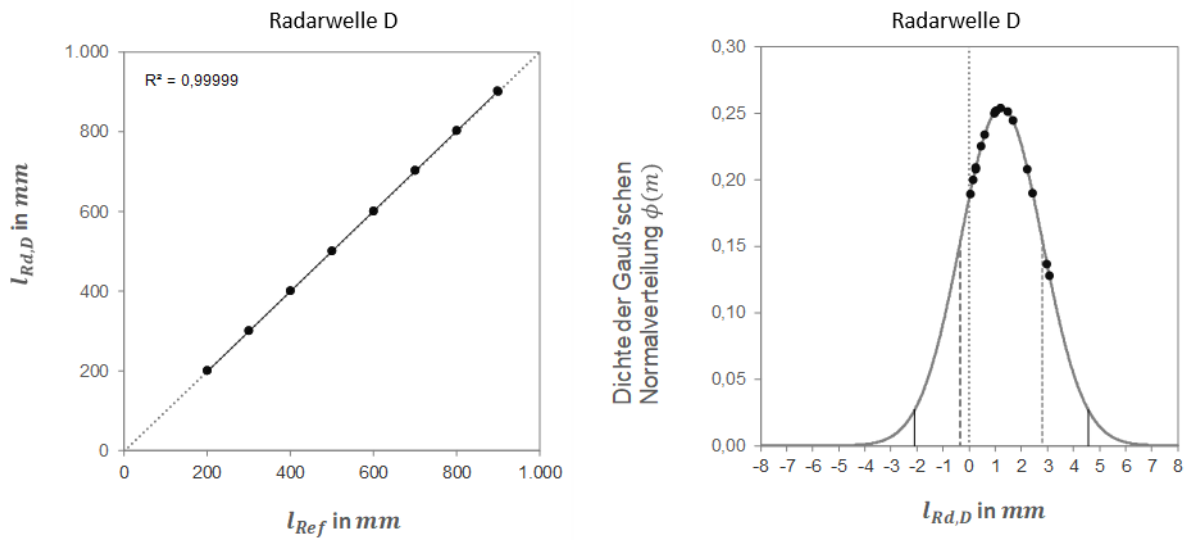


Abbildung 2-98: links: Ergebnis der Längenmessung mit dem Radarwellen-Abstandssensor D im Vergleich zur Referenzlängenmessung; rechts: Dichte der Gauß'schen Normalverteilung für die Messungen mit dem Radarwellen-Abstandssensor D

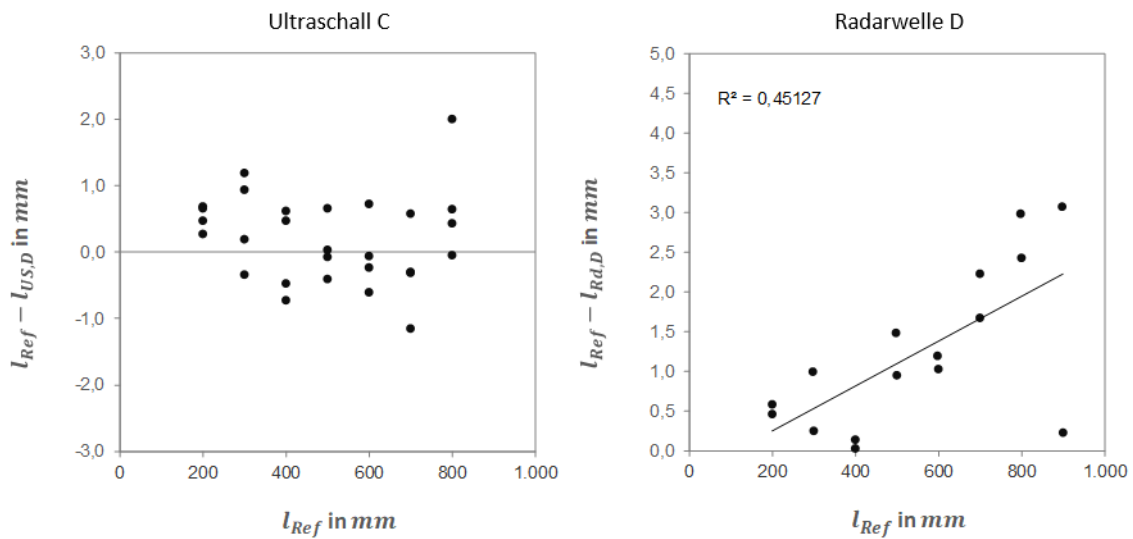


Abbildung 2-99: Abweichung der Füllstandshöhe, bestimmt mit den Ultraschall Sensoren C (links) und mit den Radarwellen-Sensoren D (rechts) zur Referenzmessung, in Abhängigkeit von der tatsächlichen Füllstandshöhe.

Tabelle 2-26 zeigt die Ermittelte Messunsicherheit $u(l)$ und die erweiterte Messunsicherheit $U(l)$ sowie die Abweichung zum Mittelwert für die Ultraschall und Radarwellen-Abstandssensoren für die im Pegelprüfstand durchgeführten Messungen.

Tabelle 2-26: Ermittelte Messunsicherheit $u(l)$ und die erweiterte Messunsicherheit $U(l)$ sowie die Abweichung zum Mittelwert für die beiden Ultraschall-Abstandssensoren und den Radarwellen-Abstandssensor basierend auf Messungen im Pegelprüfstand.

	Sensor C1	Sensor C2	Sensor D
Messprinzip	Ultraschall	Ultraschall	Radarwellen
$u_{SVS}(l)$	$\pm 0,66$ mm	$\pm 0,70$ mm	$\pm 1,57$ mm
Erweiterungsfaktor k	2,145	2,145	2,120
$U_{SVS}(l)$	$\pm 1,4$ mm	$\pm 1,5$ mm	$\pm 3,3$ mm
$W_{SVS}(l)$	$\pm 0,43$ %	$\pm 0,50$ %	$\pm 9,9$ %
Abstand zum Mittelwert	0,33 mm	0,08 mm	1,24 mm
$U_{SVS}(m_{Eis})^*$	± 77 kg	± 81 kg	± 180 kg
$G(S_{OC})^{**}$	$\pm 0,76$ %	$\pm 0,81$ %	$\pm 1,8$ %

* erw. Messunsicherheit der Eismasse $U_{SVS}(m_{Eis})$ berechnet mit Gl. 12 und der Messunsicherheit der Abstandsmessung $U_{SVS}(l)$

** theoretische Genauigkeit des Beladungszustandes für einen Speicher vom Typ SE12 bei einer Nennmasse des Wassers im Latentspeicher von $m_{Nenn} = 10.000$ kg

Untersuchungen in der Klimakammer (KlimSim)

Um das klimatische Verhalten der Füllstandsensoren zu untersuchen, wurden die Sensoren C und D in eine am IGTE zur Verfügung stehende Klimakammer eingebracht. Abbildung 2-100 zeigt den Aufbau des „Klimatests“. Bei diesem Test „sieht“ der Ultraschall Sensor C1 eine alukaschierte PUR-Platte als Oberfläche. Für den zweiten Ultraschall Sensor C2 und den Radarwellen Sensor D dient eine Wasseroberfläche als Reflektionsfläche. Die Lufttemperatur wurde mittels eines Pt100 Temperaturfühlers gemessen.

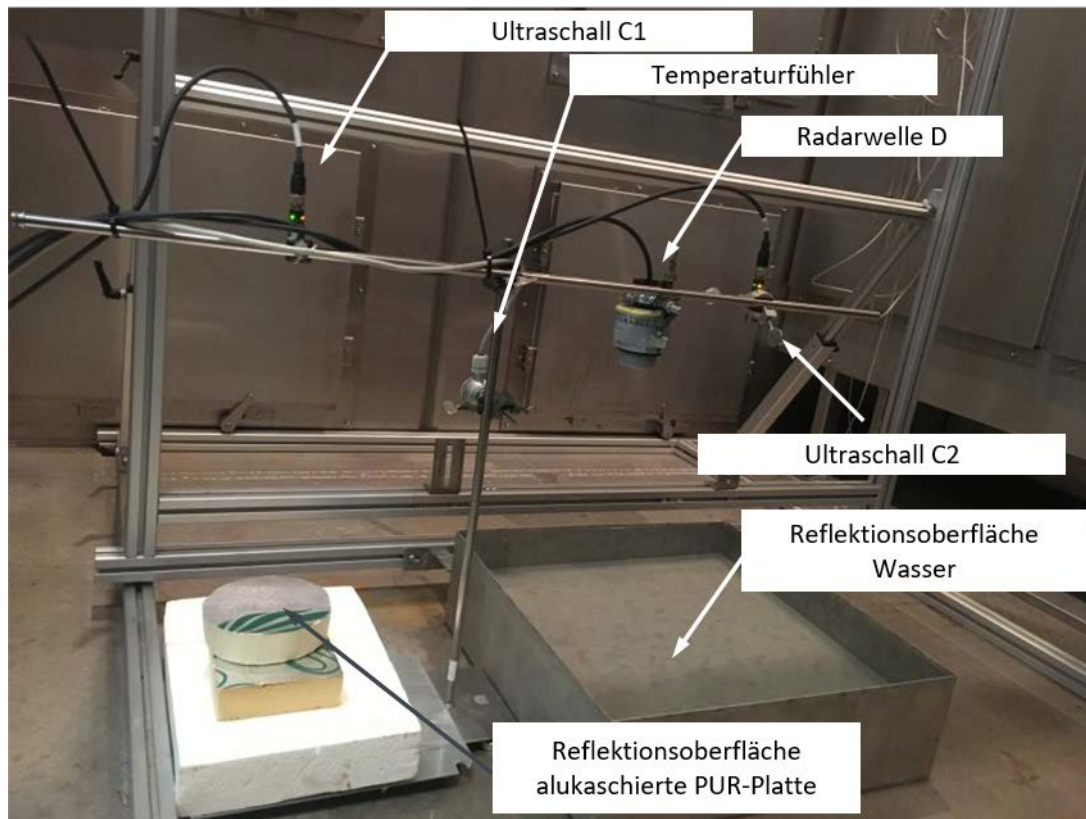


Abbildung 2-100: „Klimatest“ der beiden Ultraschall Sensoren C1 und des Radarwellen Sensors D

Im ersten Prüfzyklus wurde eine Lufttemperatur von $\vartheta_{Luft} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine maximale relative Luftfeuchtigkeit von ca. $\varphi_{Luft} = 98\%$ eingestellt. Abbildung 2-101 zeigt den Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C1 und C2 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer und Abbildung 2-102 zeigt den Verlauf des Messsignals des Radarwellensensors D. Am 22.12.2021 wurde um ca. 17:30 der Versuch gestartet. Die Lufttemperatur in der Klimakammer betrug bei Datenaufzeichnung ca. $\vartheta_{Luft} = 6\text{ }^{\circ}\text{C}$ und regelt sich nach ca. 30 min auf die Solltemperatur von $\vartheta_{Luft} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ein. Nach ca. 5 h Betrieb ging die Klimakammer auf Störung. Die klimatische Bedingung einer Lufttemperatur von $\vartheta_{Luft} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und eine maximale relative Luftfeuchtigkeit von ca. $\varphi_{Luft} = 100\%$ konnte nicht eingeregelt werden, da es vermutlich zu Vereisungen am Wärmeübertrager der Klimakammer kam. Auf Grund der Störung der KlimSim steigt die die Lufttemperatur gegen 22:15 langsam an.

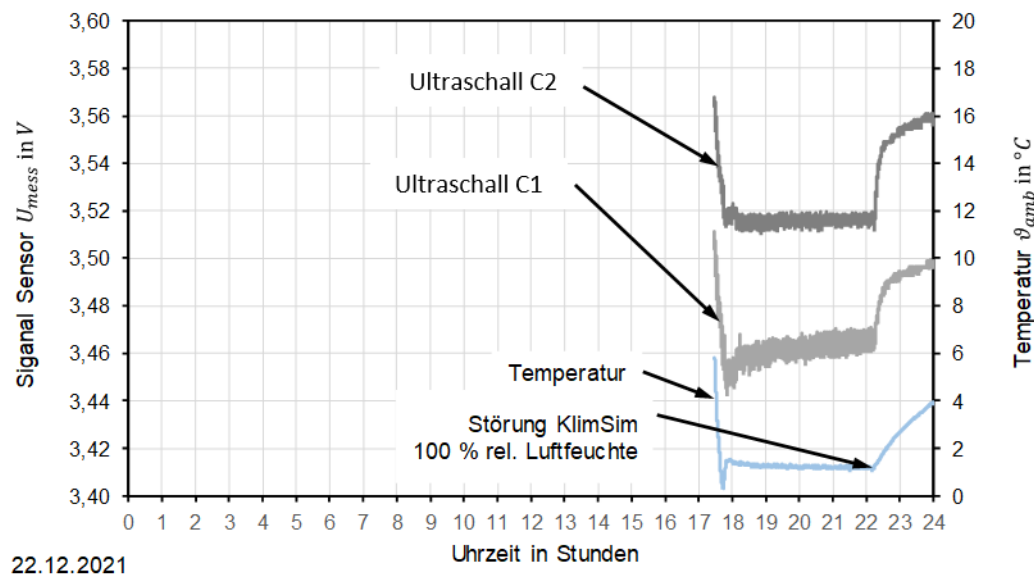


Abbildung 2-101: Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C1 und C2 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 22.12.2021.

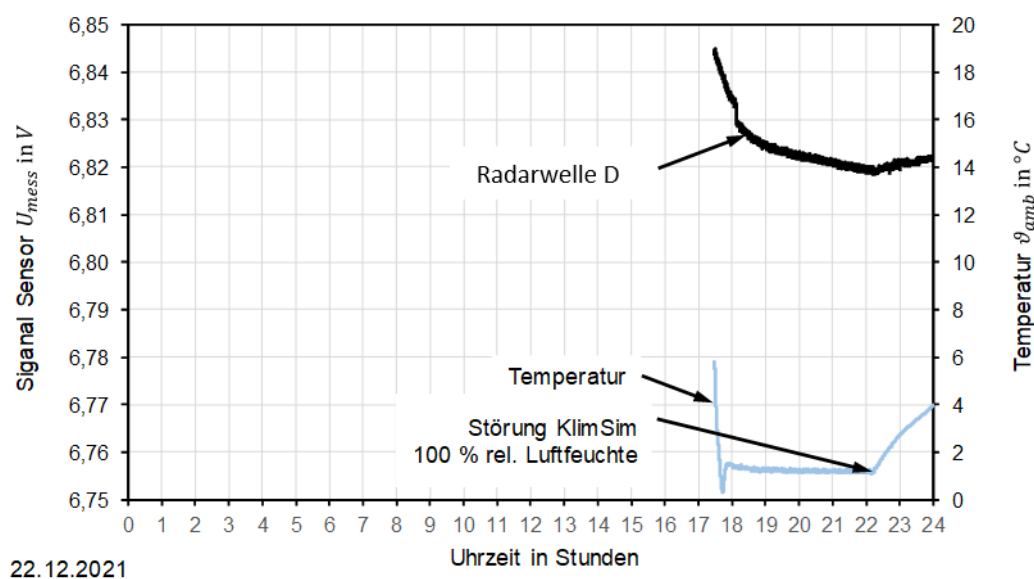


Abbildung 2-102: Verlauf des Messsignals des Radarwellensensors D sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 22.12.2021.

Das Messsignal der Sensoren C1 und C2 folgen proportional der Lufttemperatur in der Klimakammer (vgl. Abbildung 2-101). Beim Sensor D zeigt das Messsignal ebenfalls eine Temperaturabhängigkeit zur Umgebungsluft auf (Abbildung 2-102). Die Änderung der Lufttemperatur in der Klimakammer, einhergehend mit einer Änderung des Messsignals der Sensoren, hat eine Änderung des gemessenen Abstands zwischen der Reflektionsoberfläche (Wasser bzw. alukaschierte PUR-Schaumplatte) und dem Sensor zur Folge. Tabelle 2-27 zeigt die Abweichung zum Anfangswert des Messsignals der Abstandssensoren C1, C2, und D auf Grund der Temperaturänderung in der Klimakammer. Die Summe der Abweichung des Sensors C1 beläuft

sich am 22.12.2021 auf $\Delta l_{C1} = 6,4 \text{ mm}$, beim Sensor C1 auf $\Delta l_{C2} = 5,3 \text{ mm}$ und beim Sensor D auf $\Delta l_D = 2,6 \text{ mm}$. Bei einem Versuchseisspeicher vom Typ SE12, mit einer Grundfläche von $A_0 = 4,91 \text{ m}^2$ und einem Nenngewicht des Wassers von $m_{Nenn} = 10.000 \text{ kg}$, führt eine Erhöhung des Wasserstandes von $\Delta l_{mess} = 1 \text{ mm}$ zu einer Änderung des Beladungszustandes von $\Delta S_{oc} = 0,6 \text{ \%}$. Die Temperaturänderung hätte somit in einem Eisspeicher vom Typ SE12 eine Änderung des Beladungszustandes von bis zu $\Delta S_{oc} = 4 \text{ \%}$ (Sensor C1) zur Folge.

Tabelle 2-27: Abweichung des Messsignals der Abstandssensoren C1, C2 und D auf Grund von Temperaturänderungen in der Klimakammer am 22.12.2021 und Auswirkung auf den Beladungszustand eines SE12 Eisspeichers.

22.12.2021	Anfangswert (Nullpunkt)	Minimale Ab- weichung zum Anfangswert	Maximale Ab- weichung zum Anfangswert	Änderung des Beladungs- grads im SE12
C1	3,46 V	-1,8 mm	4,6 mm	4 %
C2	3,52 V	-0,6 mm	4,8 mm	3 %
D	6,82 V	-2,2 mm	mm	2 %

Am 24.12.2021 (vgl. Abbildung 2-103 und Abbildung 2-104) und am 25.12.2021 (siehe Anhang D: Weitere Messdaten der Ultraschallsensoren C und des Radarwellensensors D) lief die Klimakammer ohne Störung mit einer rel. konstanten Temperatur von $\vartheta_{Luft} = 15 \text{ }^\circ\text{C}$ durch. Treten keine Temperaturschwankungen auf, ist das Sensorsignal der Sensoren C1 und C2 rel. gleichmäßig und es stellt sich eine Änderung des Abstandes zum Anfangswert von $\Delta l_{C1} = 1,6 \text{ mm}$ (C1) bzw. $\Delta l_{C2} = 1 \text{ mm}$ (C2) ein, dass eine Änderung des Beladungszustands von ca. $\Delta S_{oc} = 1 \text{ \%}$ zur Folge hat (vgl. Tabelle 2-28). Die Änderung des Abstandes bei dem D beträgt am 24.12.2021 und 25.12.2021 $\Delta l_D = 0,3 \text{ mm}$ und entspricht einer Änderung des Beladungszustands von $\Delta S_{oc} < 1 \text{ \%}$ (vgl. Tabelle 2-28)

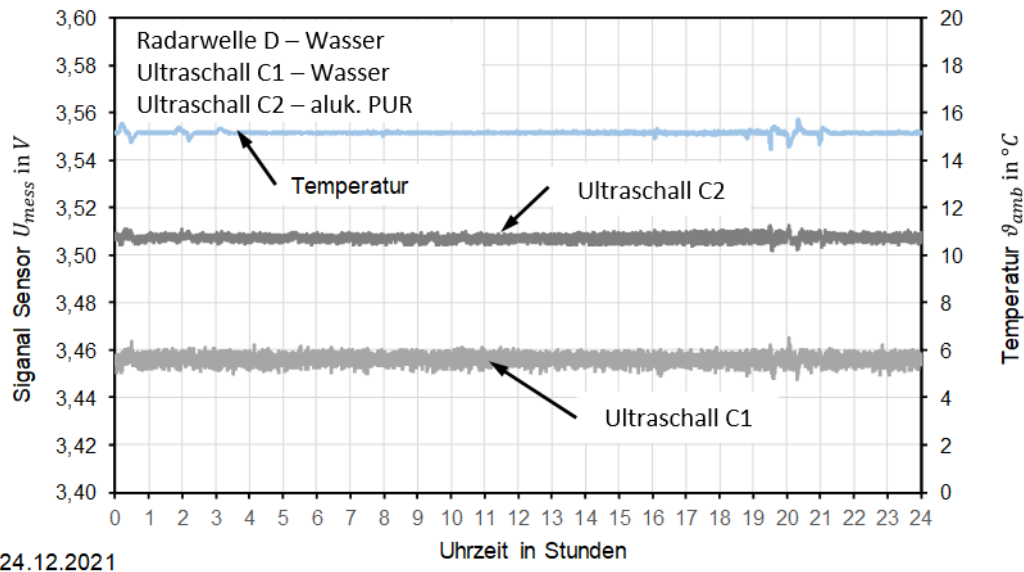


Abbildung 2-103: Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C1 und C2 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 24.12.2021.

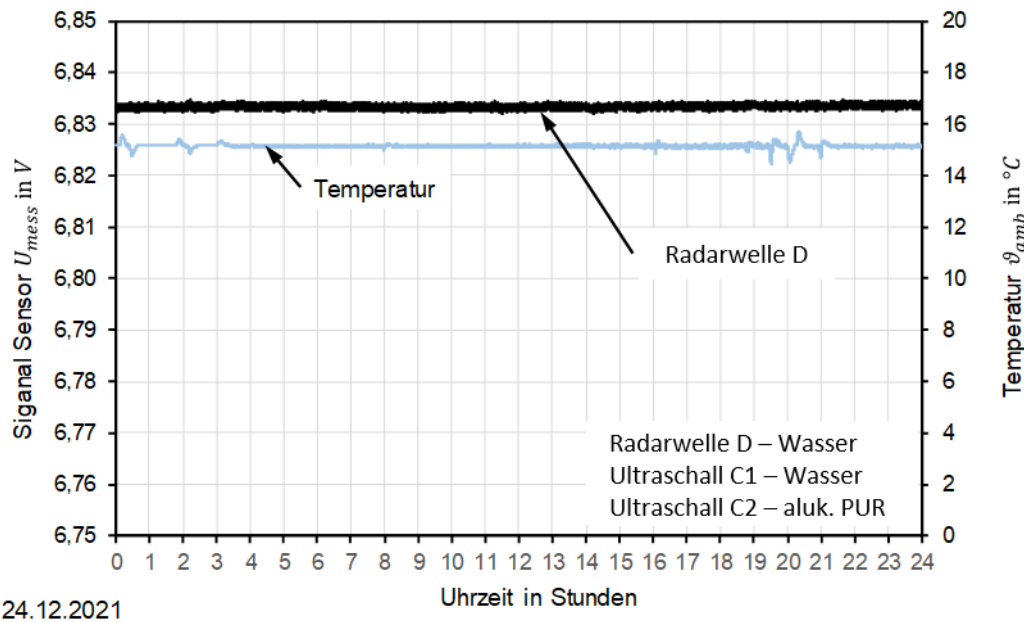


Abbildung 2-104: Verlauf des Messsignals des Radarwellensensors D sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 24.12.2021.

Tabelle 2-28: Abweichung des Messsignals der Abstandssensoren C1, C2 und D auf Grund von Temperaturänderungen in der Klimakammer am 24.12.2021 und 25.12.2021 sowie Auswirkung auf den Beladungszustand eines SE12 Eisspeichers.

24.12.2021 und 25.12.2021	Anfangswert (Nullpunkt)	Minimale Abweichung zum Anfangswert	Maximale Abweichung zum Anfangswert	Änderung des Beladungsgrads im SE12
C1	3,46 V	-1,3 mm	-0,3 mm	1 %
C2	3,52 V	-1,3 mm	-0,4 mm	1 %
D	6,82 V	-1,2 mm	-1,0 mm	<1 %

Am 26.12.2021 fand ein Eingriff in den ungestörten Betrieb der Klimakammer statt (vgl. Abbildung 2-105 bis Abbildung 2-106). Gegen 17:30 wurde die Lufttemperatur in der Klimakammer von $\vartheta_{Luft} = 15\text{ °C}$ für ca. 10 Minuten auf $\vartheta_{Luft} = 10\text{ °C}$ und gegen 17:40 auf $\vartheta_{Luft} = 0\text{ °C}$. Um 18:06 wurde die Lufttemperatur in der Klimakammer wieder auf $\vartheta_{Luft} = 15\text{ °C}$ eingestellt. Eine rel. schnelle Temperaturänderung der Umgebungsluft des Beladungssensors in der Praxis könnte z. B. durch die Öffnung einer Inspektionsluke auftreten. Diese Versuchsreihe soll diese mögliche Situation nachempfinden und es soll dabei das Verhalten des Sensorsignals untersucht werden. Abbildung 2-107 bis Abbildung 2-109 zeigt den Ausschnitt der Messreihe am 26.12.2021 als der Eingriff stattfand.

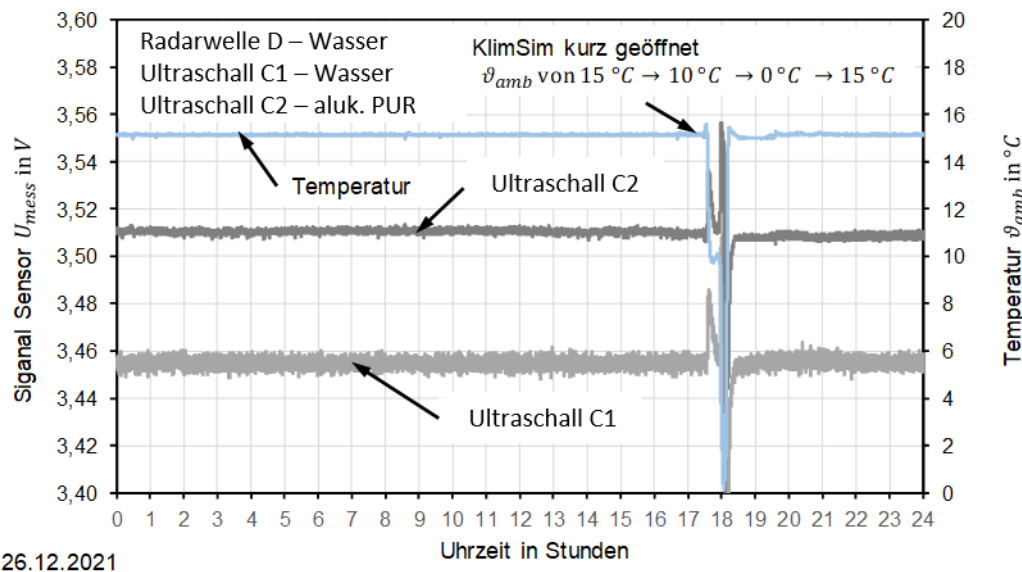


Abbildung 2-105: Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C1 und C2 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 26.12.2021.

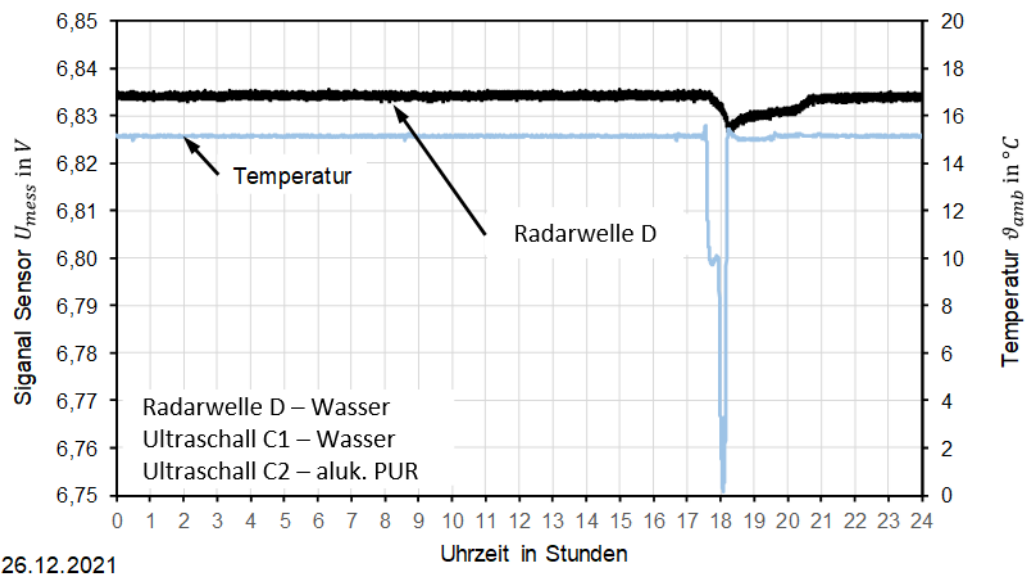


Abbildung 2-106 Verlauf des Messsignals des Radarwellensensors D sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 26.12.2021.

Abbildung 2-107 zeigt den Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C1 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 26.12.2021 in dem Zeitraum von 17:00 bis 19:00 Uhr. Die untersuchten Ultraschallabstandssensoren C weisen eine signifikante Signaländerung bei einer Änderung der Umgebungstemperatur auf. Bei einer Verringerung der Lufttemperatur steigt der Signalwert von ca. $U_{mess} = 3,46 \text{ V}$ in der siebzehnten Stunde steil an und stabilisiert sich in der Stunde 17,9 wieder auf den Signalwert vor der Temperaturänderung in. Darauf folgend wurde die Lufttemperatur in der Klimakammer von $\vartheta_{Luft} = 10 \text{ °C}$ auf $\vartheta_{Luft} = 0 \text{ °C}$ und in der Stunde 18,1 auf $\vartheta_{Luft} = 15 \text{ °C}$ geändert. Nach dem die Lufttemperatur auf den Sollwert eingeregelt wurden, stabilisiert sich in der Stunde 18,4 ebenfalls das Sensorsignal der Sensoren C1 auf den ursprünglichen Wert von ca. $U_{mess} = 3,46 \text{ V}$. Das gleich Verhalten des Sensorsignals ist auch bei dem baugleichen Sensor C2 zu beobachten und zeigt Abbildung 2-108. Bei Ultraschallsensoren zur Abstandsmessung wird die Laufzeit der Schallwellen gemessen. Die Geschwindigkeit der Schallwellen durch die Luft ist abhängig von der Lufttemperatur. Diese Abhängigkeit zwischen Lufttemperatur und Wellengeschwindigkeit wird mittels Temperaturmessung korrigiert. Bei einer Änderung der Umgebungstemperatur bzw. der Lufttemperatur benötigt der Sensor C eine gewisse Zeit für die Temperaturkorrektur, dass sich durch eine Signalabweichung wie in Abbildung 2-107 und Abbildung 2-108 bemerkbar macht.

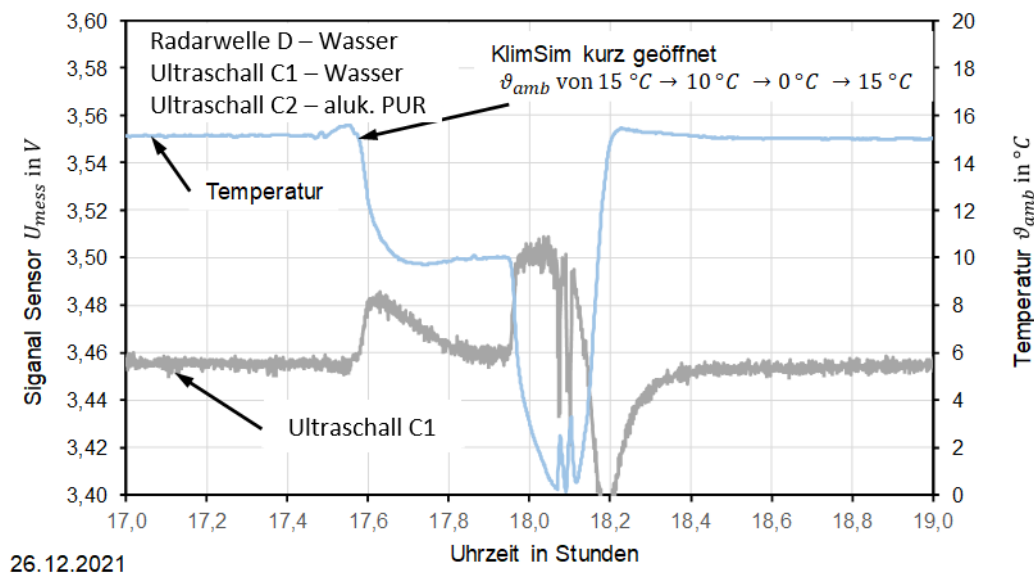


Abbildung 2-107: Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C1 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 26.12.2021 in dem Zeitraum von 17:00 bis 19:00 Uhr.

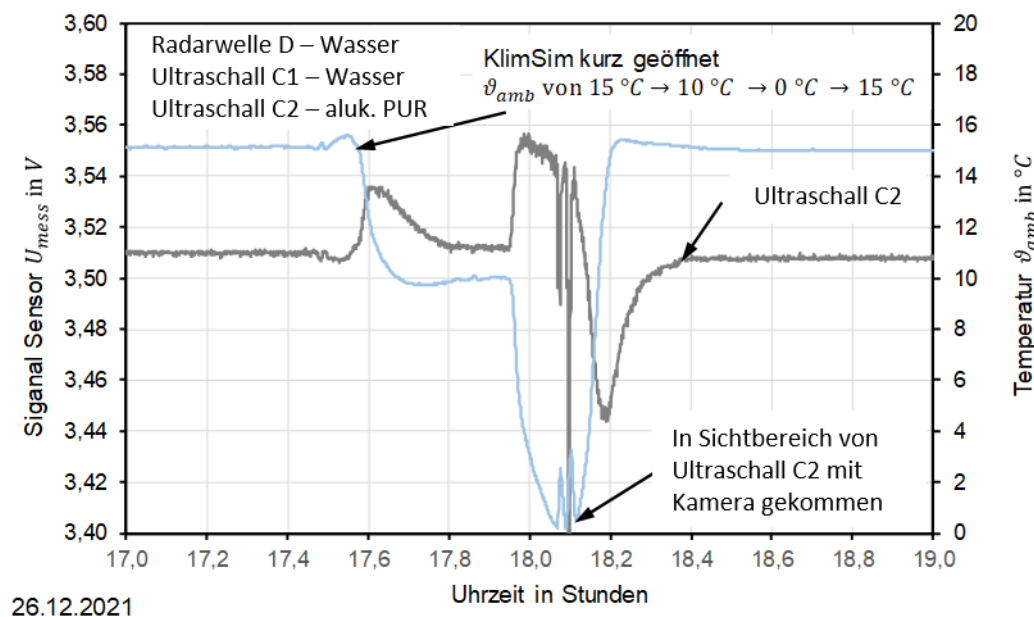


Abbildung 2-108: Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C2 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 26.12.2021 in dem Zeitraum von 17:00 bis 19:00 Uhr.

Abbildung 2-109 zeigt das Verhalten des Sensors D bei einer rel. schnellen Änderung der Umgebungstemperatur. Diese Abhängigkeit zwischen Lufttemperatur und Wellengeschwindigkeit spielt bei Radarwellen eine untergeordnete Rolle. In Abbildung 2-109 ist der Signalverlauf am 26.12.2021 in dem Zeitraum von 17:00 bis 19:00 Uhr des Sensors D zu sehen. Bei der Änderung der Umgebungstemperatur sinkt der Signalwert von $U_{mess} = 6,836 V$ innerhalb von ca. 45 Minuten auf $U_{mess} = 6,827 V$. Dies entspricht einer Änderung des Abstandes von

$\Delta l_D = 1 \text{ mm}$ (C2), dass eine Änderung des Beladungszustands von ca. $\Delta S_{oc} = 1 \%$ zur Folge hat. Ab der Uhrzeit 18:30 stabilisiert sich das Messsignal auf $U_{mess} = 6,83 \text{ V}$.

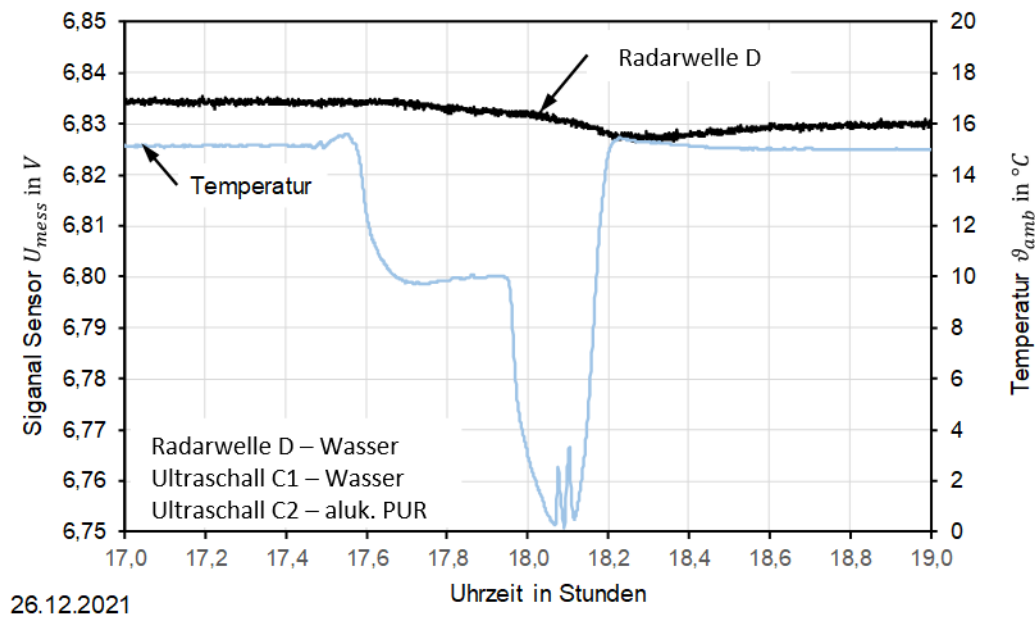


Abbildung 2-109: Verlauf des Messsignals des Radarwellensensors D sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 26.12.2021 in dem Zeitraum von 17:00 bis 19:00 Uhr.

Nach ca. 4 Tagen am 27.12.2021 um ca. 11:30 wurde die Klimabedingungen in der Klimakammer auf $\vartheta_{Luft} = 1 \text{ °C}$ und eine maximale relative Luftfeuchtigkeit von ca. $\varphi_{Luft} = 70 \%$ eingestellt. Abbildung 2-110 zeigt den Signalverlauf der Sensoren C1 und C2 am 27.12.2021 bei der sprunghaften Änderung der Lufttemperatur von $\vartheta_{Luft} = 15 \text{ °C}$ auf $\vartheta_{Luft} = 1 \text{ °C}$. Zum Zeitpunkt der Temperaturänderung steigt das Signal der Sensoren C1 und C2 sprunghaft an. Nach ca. 15 Minuten stabilisiert sich sowohl die Lufttemperatur in der Klimakammer als auch der Signalwert der Sensoren C1 und C2. Tabelle 2-29 zeigt die Abweichung des Messsignals der Abstandssensoren C1 und C2 am Anfang und am Ende des Tages am 27.12.2021 sowie die Auswirkung auf den Beladungszustand eines SE12 Eisspeichers.

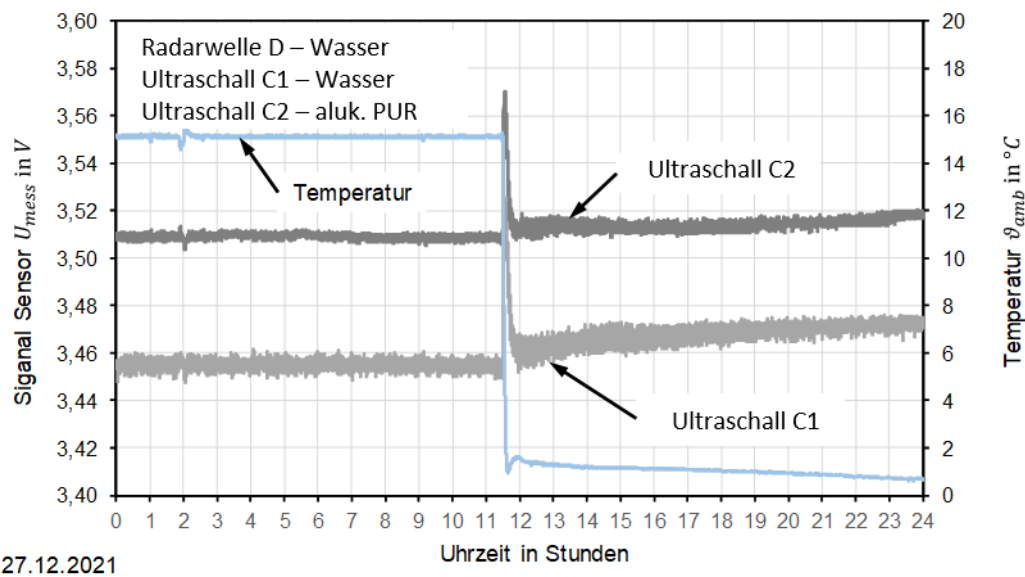


Abbildung 2-110: Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C1 und C2 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 27.12.2021.

Abbildung 2-111 zeigt den Verlauf des Messsignals des Radarwellensensors D bei einer sprunghaften Änderung der Lufttemperatur in der Klimakammer am 27.12.2021. Das Messsignal sinkt in Folge der Verringerung der Lufttemperatur von $U_{mess} = 6,825 V$ auf $U_{mess} = 6,815 V$. Dies hat eine Änderung des Abstandes zum Anfangswert von $\Delta l_D = 2,0 mm$ bzw. eine Änderung des Beladungszustands von ca. $\Delta S_{OC} = 1 \%$ zur Folge (vgl. Tabelle 2-29).

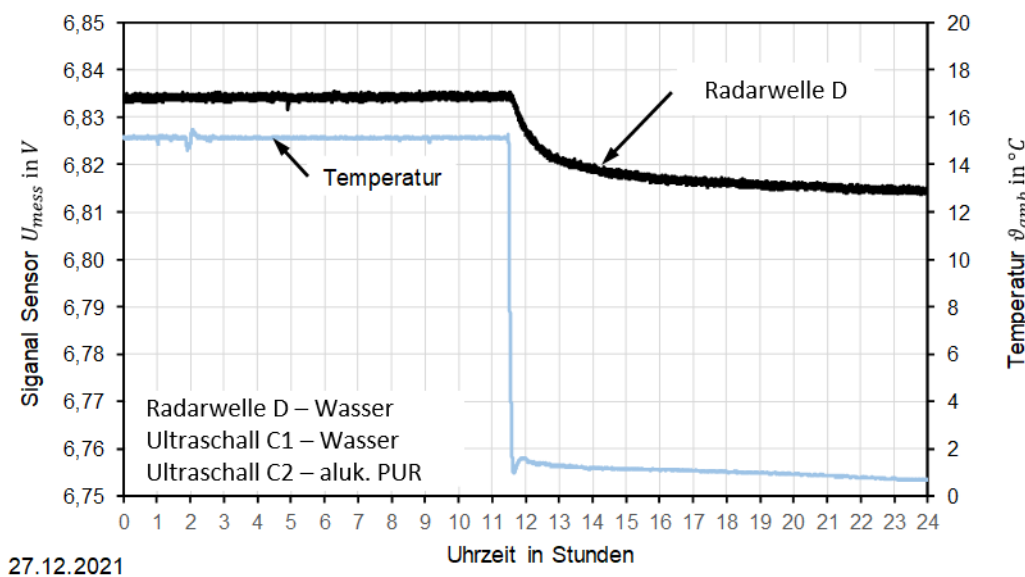


Abbildung 2-111: Verlauf des Messsignals des Radarwellensensors D sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 27.12.2021.

Tabelle 2-29: Abweichung des Messsignals der Abstandssensoren C1, C2 und D am Anfang und am Ende des Tages am 27.12.2021 sowie Auswirkung auf den Beladungszustand eines SE12 Eisspeichers.

27.12.2021	Anfangswert (Nullpunkt)	Abweichung zum Anfangswert am Anfang des Tages	Abweichung zum Anfangswert am Ende des Tages	Änderung des Beladungsgrads im SE12
C1	3,46 V	-0,6 mm	1,0 mm	1 %
C2	3,52 V	-0,6 mm	0,3 mm	1 %
D	6,82 V	-1,1 mm	0,8 mm	1 %

Der Signalverlauf vom 28.12.2024 ist in Anhang D: Weitere Messdaten der Ultraschallsensoren C und des Radarwellensensors D zu finden.

Am 29.12.2021 um 11:30 wurde der Versuch bei einer Lufttemperatur in der Klimakammer von $\vartheta_{Luft} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ beendet. Abbildung 2-112 zeigt den Verlauf des Messsignals der Sensoren C1 und C2 am 29.12.2021. Das Signal des Sensors C1 erhöht sich nach der Temperaturänderung von $\vartheta_{Luft} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $\vartheta_{Luft} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ am 27.12.2021 kontinuierlich von ca. $U_{mess} = 3,46\text{ V}$ auf $U_{mess} = 3,49\text{ V}$ am Ende der Versuchsreihe am 29.12.2021 um 11:30. Der Sensor C2 gibt ein konstanten Signalwert von $U_{mess} = 3,52\text{ V}$ vom 27.12.2021 bis Versuchsende aus. Abbildung 2-113 zeigt den Signalverlauf des Abstandssensors D am 29.12.2021. Dabei ist eine Abnahme des Sensorsignals vom 27.12.2021 von $U_{mess} = 6,835\text{ V}$ auf $U_{mess} = 6,80\text{ V}$ bis zum Versuchsende am 29.12.2021 feststellbar.

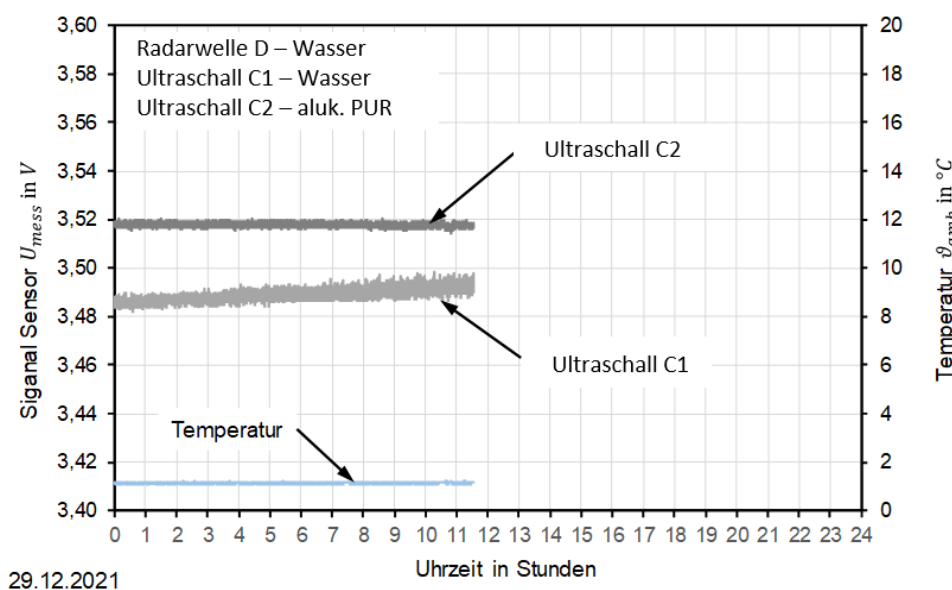


Abbildung 2-112: Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C1 und C2 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 29.12.2021.

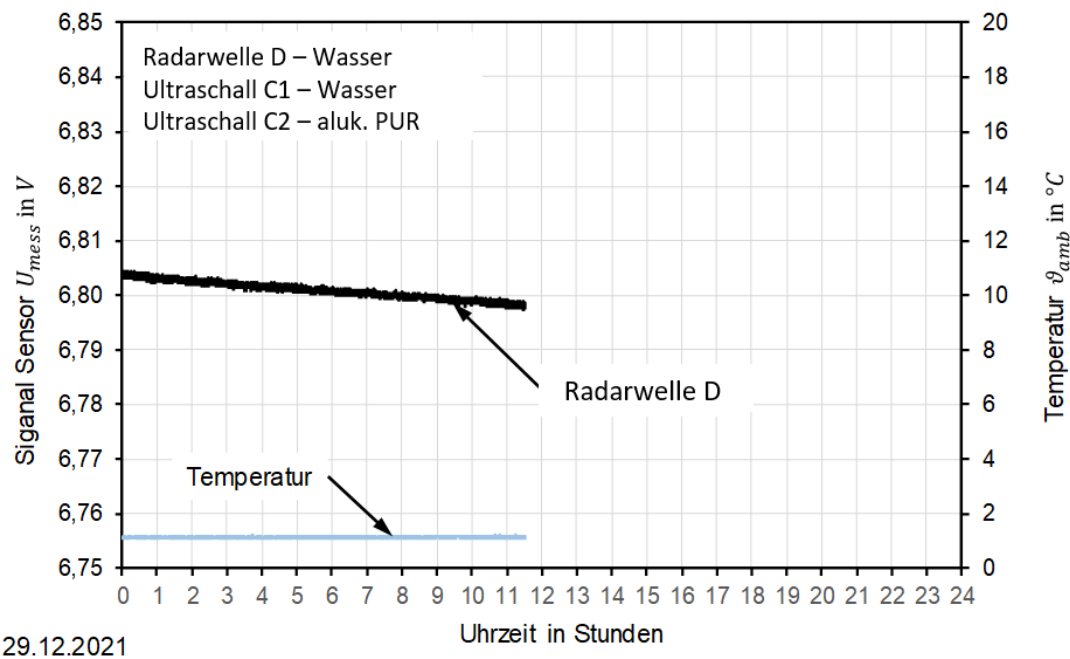


Abbildung 2-113: Verlauf des Messsignals des Radarwellensensors D sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 29.12.2021.

Tabelle 2-30 zeigt die Ergebnisse dieser Versuchsreihe vom 22.12.2021 bis 29.12.2021 in der Klimakammer. Der Nullpunkt der Abstandssensoren wurde am 22.12.2021 bei einer Lufttemperatur von $\vartheta_{Luft} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ als Anfangswert genutzt. Bei Versuchsende am 29.12.2021 ist ebenfalls eine $\vartheta_{Luft} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ in der Klimakammer feststellbar. Während der Versuchsreihe wurde die Lufttemperatur mehrmals zwischen $\vartheta_{Luft} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ und $\vartheta_{Luft} = 15\text{ }^{\circ}\text{C}$ geändert. Am Ende der Versuchsreihe konnte eine Abweichung für den Sensor C1 von ca. $\Delta l_{C1} = 3\text{ mm}$ festgestellt werden, dass eine Änderung des Beladungszustandes bei einem SE12 Eisspeicher von $\Delta S_{oc} = 2\text{ \%}$ entspricht. Der Sensor C2 erreicht am Ende der Versuchsreihe eine Abweichung von $\Delta l_{C1} < 1\text{ mm}$ und somit würde bei diesem Sensor keine Änderung des Beladungszustands bei einem SE12 Eisspeicher festgestellt werden. Bei dem Sensor D ist eine rel. geringe Abweichung nach dem Temperaturwechsel von $\Delta l_{C1} = 2,4\text{ mm}$, dass eine Änderung des Beladungszustands eines SE12 Eisspeichers von $\Delta S_{oc} = 2\text{ \%}$ entspricht.

Tabelle 2-30: Abweichung des Messsignals der Abstandssensoren C1, C2 und D auf Grund von Temperaturänderungen in der Klimakammer in einem Zeitraum vom 22.12.2021 bis zum 29.12.2021 sowie die Auswirkung auf den Beladungszustand eines SE12 Eisspeichers.

22.12.2021 bis 29.12.2021	Anfangswert (Nullpunkt)	Endwert	Abweichung zum Anfangs- wert	Änderung des Beladungszu- stands im SE12
C1	3,46 V	3,49 V	2,9 mm	2 %
C2	3,52 V	3,52 V	0,1 mm	< 1 %
D	6,82 V	6,80 V	2,4 mm	1 %

Am 26.12.2024 gegen 18:00 wurden Fotos von der Oberfläche der Stirnfläche der Sensoren erstellt. Dabei wurde überprüft, ob sich Kondensattröpfchen auf der Sensoroberfläche gebildet und dadurch ein Messfehler verursacht wird. Abbildung 2-114 links zeigt die Oberfläche des Ultraschall-Sensoren C2. Bei den Ultraschall-Sensoren C1 und C2 und dem Radarwellensensors D waren zu diesem Zeitpunkt der Fotoaufnahme keine Kondensattröpfchen erkennbar. Allerdings haben sich an der Spitze des Temperaturfühlers (vgl. Abbildung 2-114 rechts oben) und auf der alukaschierten PUR-Platte (Abbildung 2-114 rechts unten) Kondensattröpfchen gebildet. Interessant ist, dass die rel. großen Kondensattröpfchen auf der alukaschierten PUR-Platte den Messwert des U-Schall Sensor C2 nicht beeinflusst haben. Es wird angenommen, dass durch die Elektronik der Sensor sich leicht erwärmt. Dadurch ist die Oberflächentemperatur des Sensors gegenüber der Umgebungstemperatur höher und somit entstehen keine Kondensattröpfchen auf der Sensoroberfläche. Es konnte auch während der Versuchszeit vom 22.-29.12.2021 keine Signalstörung (Messsignal C1 und C2 $U_{mess} > 10 V$ bzw. Sensor D $U_{mess} = 0 V$) festgestellt werden. Es kann somit weitestgehend ausgeschlossen werden, dass eine Signalstörung der Abstandssensoren zur Bestimmung des Beladungszustands in Eisspeichern auf Grund von Kondensatbildung auf der Sensoroberfläche auftritt.



Abbildung 2-114: Oberfläche des U-Schall Sensors C (links) und Kondensatbildung am Temperaturfühler (rechts oben) und der als Reflektionsfläche dienenden PUR-Platte (rechts unten) während des „Klimatests“

2.6.2.7 Fazit Bestimmung der Messunsicherheit von Sensoren zur Abstandsmessung mit einem Pegelprüfstand

In dem vorherigen Abschnitt wurde die Messunsicherheit und der Einfluss von Klimatischen Bedingungen der Ultraschall Abstandssensoren C1 und C2 sowie der Radarwellen Abstandssensor D untersucht. Dabei wurde ein Labortisch, ein Pegelprüfstand und Untersuchungen in einer Klimakammer durchgeführt. Tabelle 2-31 zeigt die Messunsicherheit der Abstandssensoren C1, C2 und D ermittelt an einem Labortisch und mittels Pegelprüfstand. Im Pegelprüfstand, der die Verhältnisse in der Praxis eher entspricht als den Laborprüfstand, konnte eine erweiterte Messunsicherheit von $U_{SVS}(l) = \pm 1,4 \text{ mm}$ (C1) bzw. von $(l) = \pm 1,5 \text{ mm}$ (C2) erreicht werden. Bei einem SE12 Eisspeicher mit einem Nenngewicht des Wassers von $m_{Nenn} = 10.000 \text{ kg}$ entspricht dies eine Änderung des Beladungszustandes von ca. $\Delta S_{oc} = \pm 1 \%$ (Sensor C1 und C2). Der Sensor D der erreicht eine erw. Messunsicherheit im Pegelprüfstand von $U_{SVS}(l) = \pm 3,3 \text{ mm}$, dass eine Änderung des Beladungsgrades in einem SE12 Eisspeicher von ca. $\Delta S_{oc} = \pm 2 \%$ entspricht. Bei den Untersuchungen mit dem Labortisch und dem Pegelprüfstand konnte der Temperatureinfluss nicht untersucht werden. Daher wurden die Sensoren C1, C2 und D in einer Klimakammer mit einem konstanten Abstand zur Reflektionsfläche bei unterschiedlichen Lufttemperaturen auf ihre Eignung hin untersucht. Tabelle 2-31 zeigt die Abweichung des Messsignals der Sensoren C1, C2 und D auf Grund von Temperaturänderungen. Bis auf den Sensor C1 liegen die Abweichungen innerhalb der erw. Messunsicherheit. In der Klimakammer hat sich gezeigt, dass bei Temperaturschwankungen das Messsignal der Sensoren C1 und C2 rel. große Abweichungen zum Anfangswert aufweisen. Die Sensoren benötigen ca. 15 Minuten um die Temperaturänderung zu kompensieren. Bei dem Sensor C2 funktioniert die Temperaturkorrektur relativ gut, wohin gegen beim Sensor C1 die Temperaturänderung eine rel. große Abweichung zum Anfangswert hervorruft. Die Untersuchungen am Pegelprüfstand haben die generelle Eignung von Abstandssensoren

mittels Pegelstandsmessung zur indirekten Bestimmung der Eismasse in einem Eisspeicher erbracht. Des Weiteren konnte eine Temperaturabhängigkeit des Messsignals festgestellt werden und soll bei der weiteren Untersuchung in dem Versuchseisspeicher beachtet werden.

Tabelle 2-31: Messunsicherheit der Abstandssensoren bestimmt am Labortisch, sowie am Pegelprüfstand und Abweichung auf Grund von Temperaturänderungen in der Klimakammer der Abstandssensoren C1, C2 und D.

	Sensor C1	Sensor C2	Sensor D
Labortisch	$U_{SVS}(l) = \pm 2,5 \text{ mm}$	$U_{SVS}(l) = \pm 2,5 \text{ mm}$	Nicht untersucht
Pegelprüfstand	$U_{SVS}(l) = \pm 1,4 \text{ mm}$	$U_{SVS}(l) = \pm 1,5 \text{ mm}$	$U_{SVS}(l) = \pm 3,3 \text{ mm}$
Klimakammer	$\Delta l_C = 3 \text{ mm}$	$\Delta l_C < 1 \text{ mm}$	$\Delta l_C = 2 \text{ mm}$

2.6.2.8 Methodik zur rechnerischen Bestimmung des Beladungszustands

Ergänzend zu Arbeiten des IGTE im Labor wurde von VCS ein Modell erstellt, welches sich für eine ständige Berechnung des Beladungszustands in der Anlagensteuerung eignen soll. Wie auch die Modellansätze des Latentspeichers aus der Simulation der Gesamtanlage (siehe Kapitel 4.5) basiert das Modell auf einer Energiebilanz des Speichers. Im Gegensatz zu den detaillierten Simulationsmodellen wurden die Gleichungen vereinfacht, um der reduzierten Rechenleistung des Prozessors der lokalen Steuerung Rechnung zu tragen.

Das Modell verarbeitet nur Werte, die in der Steuerung bereits als Datenpunkte vorhanden sind oder aus der Ausführung der Anlage hervorgehen. Hierbei handelt es sich um folgende Größen:

- Volumen des Eisspeichers
- Typ der Wärmepumpe (Kenndaten nach Datenblatt)
- Betrieb der Wärmepumpe
- Primär- und Sekundärtemperatur der Wärmepumpe
- Betrieb der Pumpe zur Regeneration des Latentspeichers durch den Solar-Luft-Kollektor
- Beladungszustand aus komplementärer Sensorik zur Initialisierung und Kalibrierung des Modells

Das Rechenmodell kann in einem wählbaren Zeitabstand durch die Messdaten neu kalibriert werden.

Das Modell wurde mit Daten der Versuchsanlage 2 gespeist. Als Kalibrierungsintervall zum Abgleich der Rechnung mit den Messdaten wurde 10 Tage gewählt. In Abbildung 2-115 ist ein

Vergleich des gemessenen und berechneten Beladungszustands im Zeitraum von Ende Dezember 2020 bis Ende Januar 2021 und in Abbildung 2-116 im Zeitraum von Mitte Februar 2021 bis Mitte März 2021 dargestellt.

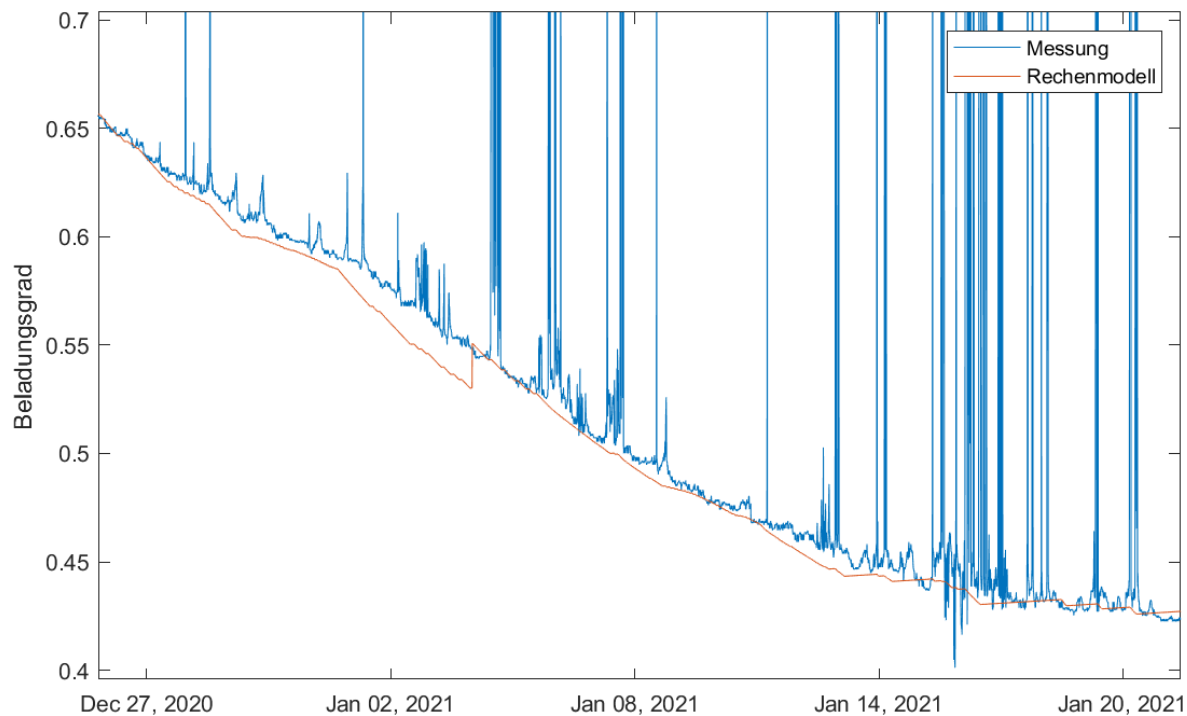


Abbildung 2-115: Verlauf des gemessenen (blau) und gerechneten (orange) Beladungszustands im Zeitraum von Ende Dezember 2020 bis Ende Januar 2021. Bei den Sprüngen des berechneten Wertes wird das Rechenmodell auf den jeweiligen Messwert kalibriert.

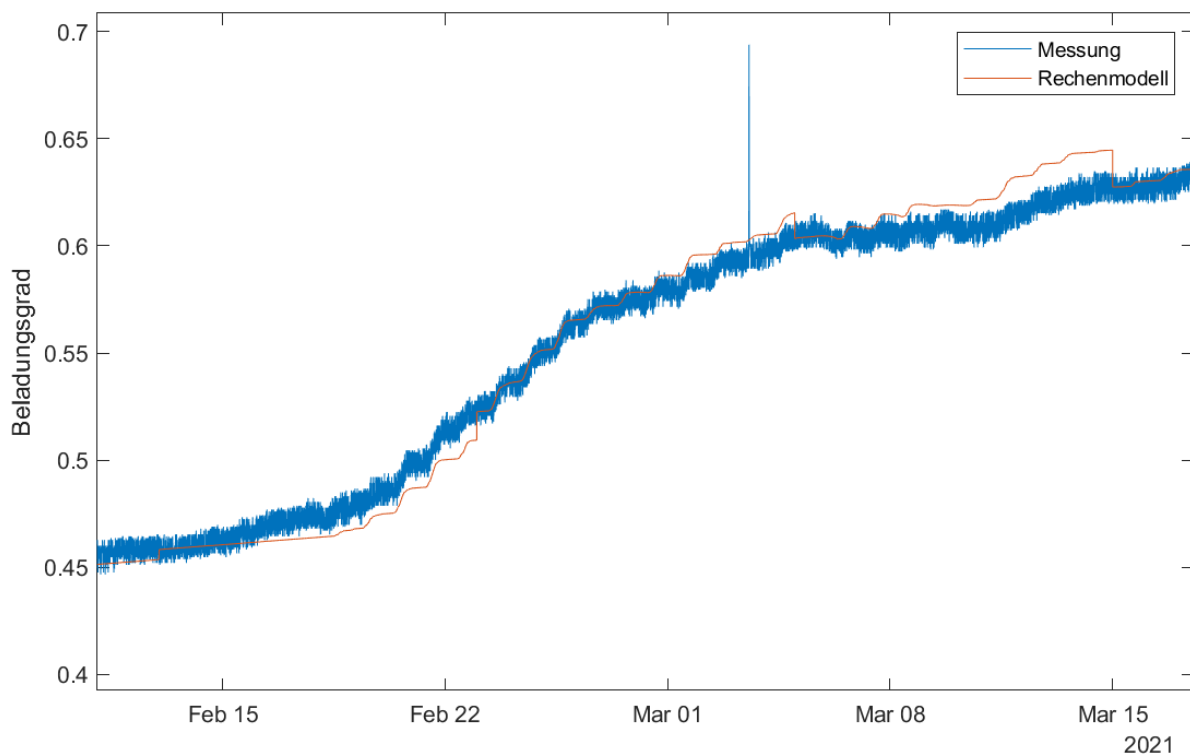


Abbildung 2-116: Verlauf des gemessenen (blau,) und gerechneten (orange) Beladungszustands im Zeitraum Mitte Februar 2021 bis Mitte März 2021. Beim Sprung des berechneten Wertes wird das Rechenmodell auf den jeweiligen Messwert kalibriert.

Im Zeitraum Januar und Februar 2021 ist das gemessene Signal des Beladungszustands, bestimmt mit einem Füllstandsensor, häufig stark gestört. Durch Änderung der elektrischen Anschlüsse des Sensors konnten ab Februar die großen Störungen eliminiert werden. Dennoch weist das Messsignal ein starkes Rauschen auf.

Der vom Modell berechnete Wert des Beladungszustands folgt dem Messwert grob. Deutlich erkennbar ist aber, dass die Genauigkeit des Rechenmodells noch nicht ausreichend ist, um auf einen regelmäßigen Abgleich mit den Messdaten verzichten zu können.

Im weiteren Verlauf des Projekts wurde der Modellansatz verbessert und auch mit Daten aus anderen Anlagen überprüft. Neben den Versuchsanlagen des Forschungsvorhabens stehen dafür auch Daten aus weiteren Anlagen von VCS zur Verfügung.

Zunächst wurde der Zeitbereich für die Überprüfung auf ein gesamtes Jahr erweitert, während als Datensatz für den Parameterfit weiterhin der Zeitraum bis März 2021 genutzt wurde. Bei der Betrachtung des in Abbildung 2-117 dargestellten Verlaufs für ein gesamtes Jahr wird ersichtlich, dass das Modell den Verlauf sehr gut trifft. Relevante Abweichungen treten noch um den Tag 40 auf, bei niedrigem Beladungszustand des Speichers.

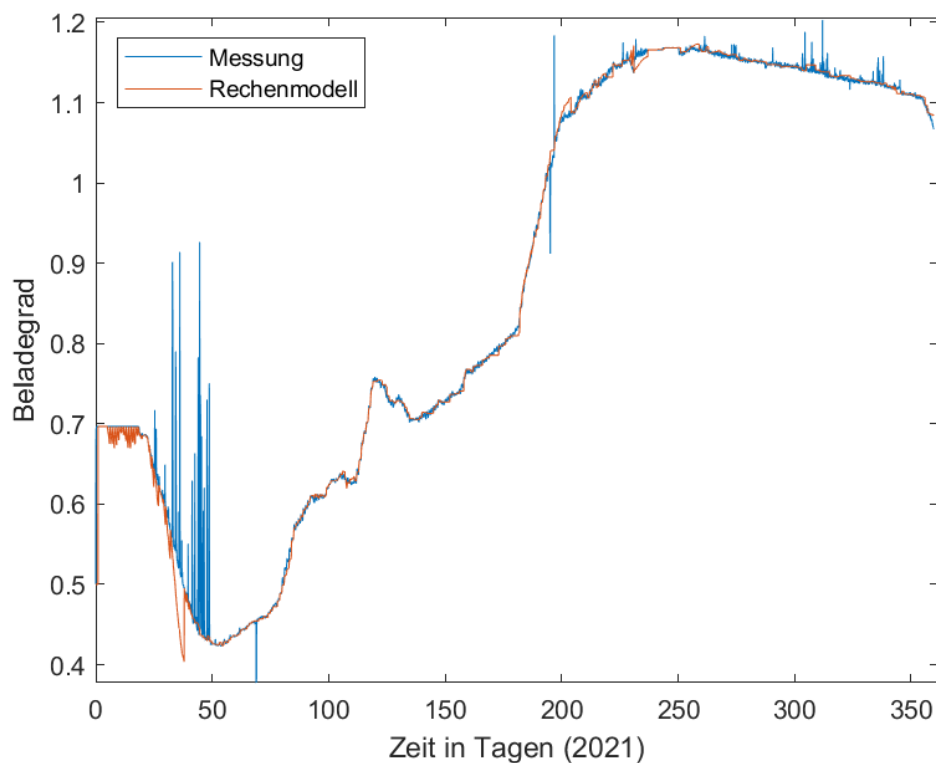


Abbildung 2-117: Vergleich des gemessenen und berechneten Beladungszustands der Anlage 2.

Das Modell wurde zusätzlich an zwei weiteren Anlagen geprüft, deren Daten für Temperatur und Füllstandsensoren des Eisspeichers bei der Fa. VCS vorliegen.

In Abbildung 2-118 ist zu sehen, dass auch für eine Anlage mit einem 320 m³ Eisspeicher und einer 140 kW Wärmepumpe, der gemessene und berechnete Beladungszustand gut übereinstimmen. Die Abweichungen zwischen Tag 50 und 60 sind eventuell darauf zurückzuführen, dass der Füllstandsensoren nicht korrekt auf den Wasserstand des Speichers eingestellt war. Diese Kalibrierung erfolgt bei Inbetriebnahme. Sie wird jedoch fehlerhaft, wenn beispielsweise bei einem Starkregen Wasser durch die Abdeckung des Revisionsschachts oder den Wasserüberlauf in den Speicher gelangt. Eine weitere Fehlermöglichkeit ist die Genauigkeit der Temperaturmessung, die in dieser Anlage nicht über die bislang geringen Anforderungen (± 2 K) der Anlagensteuerung hinausgeht. Bemerkenswert ist hier, dass das Modell sehr genau die Entladung berechnet. Der Verlauf des gemessenen und berechneten Beladungszustands ist hier nahezu deckungsgleich.

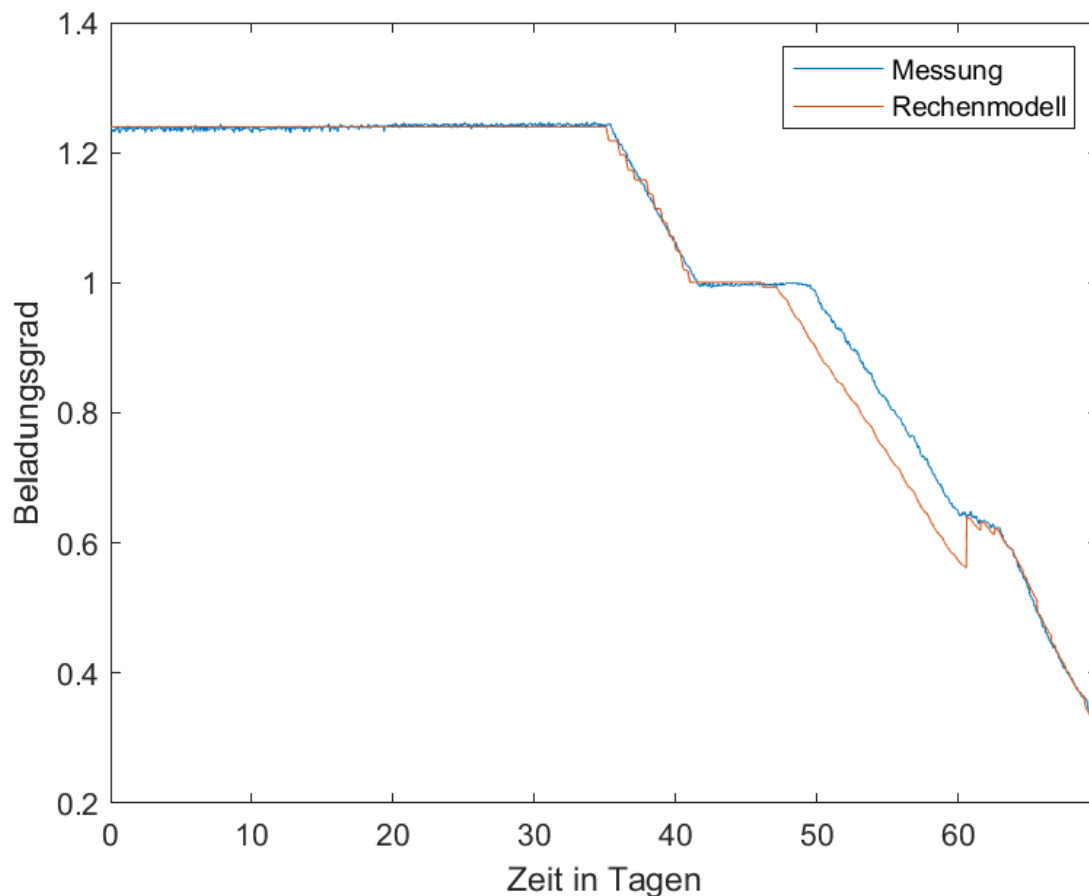


Abbildung 2-118: Vergleich des gemessenen und berechneten Beladungszustands einer Anlage mit 320 m³ Eisspeicher und einer 140 kW Wärmepumpe. Am Tag 60 wird im Modell der berechnete Beladungszustand auf den gemessenen Wert gesetzt.

Erstellung des Software-Codes des Beladungszustand-Rechenmodells

Zur Erstellung des Software-Codes des Beladungszustand-Rechenmodells wurde ein modellbasierter Entwicklungsansatz gewählt. Das in der Simulationsumgebung MATLAB [66] erstellte Konzept wurde dazu in prüfbare Einzelfunktionen, sogenannte Units, aufgeteilt. Die Einzelfunktionen führen beispielsweise die Umrechnung des Füllstandsensorsignals in eine Füllhöhe in Metern durch oder die Berechnung der thermischen Leistung der Wärmepumpe. Die wichtigste Einzelfunktion ist das Modell des Eisspeichers selbst, welches die dem Eisspeicher zugeführten und entnommenen Energieströme bilanziert. Für jede Einzelfunktion wurde eine Prüfung mit Prüfbedingungen und Akzeptanzkriterien erstellt. Das aus den Einzelfunktionen zusammengestellte Modell kann über einen Code-Generator in die Programmiersprache Structured Text exportiert und damit für eine SPS verwendbar gemacht werden. Für das Gesamtmodell gibt es wiederum eine Prüfung mit Akzeptanzkriterien. Das Ziel ist es, im Vergleich zu den Messungen eine Abweichung unter 10 % (besser unter 5 %) im Verlauf des Beladungszustands nach einem Monat zu erreichen.

Das Modell wurde in zwei Versuchsanlagen des Vorhabens implementiert, eine davon mit einem sehr kleinen Eisspeicher (2 x 10 m³). Bei dem kleinen Eisspeicher zeigte sich, dass die

geforderte Genauigkeit hier prinzipbedingt nicht erreicht werden kann: Bei dieser Speichergröße ist der nicht bestimmbare Einfluss des umgebenden Erdreichs zu groß. Bei der Anlage mit dem größeren Speicher ist es möglich, aber es wurden gegenüber dem oben dargestellten Stand keine weiteren Verbesserungen erreicht. Die Schwierigkeit entsteht insbesondere zur den schwer zu bilanzierenden Mischbetrieb der Wärmepumpe, bei dem sowohl Eisspeicher als auch Kollektor gleichzeitig als Quelle genutzt werden (siehe Kapitel 5.3. Entwicklung der Regelungsalgorithmen).

2.6.2.9 Messdatenanalyse von Beladungssensoren aus Kunden- bzw. Versuchsanlagen

Im Rahmen des Projektes wurden mehrere Beladungssensoren, die auf dem Messprinzip der Ermittlung der Änderung der Höhe des Wasserstands im Speicher basieren, aus Versuchs- bzw. Kundenanlagen untersucht. Diese Sensoren werden im Folgenden als Füllstandssensoren bezeichnet. Die untersuchten Füllstandssensoren sind in Tabelle 2-32 aufgeführt.

Tabelle 2-32: Anzahl der ausgewerteten Füllstandssensoren.

Nr.	Messprinzip	Anzahl ausgewerteter Sensoren im Feld
G	Ultraschall	1
C	Ultraschall	23
H	Radar	6
D	Radar	1
E	Geführte Mikrowelle	1

Für die Analyse wurden Messdaten von insgesamt 93 Sensoren (32 bis Sommer 2022) hinsichtlich Messfehler, wie z. B. Ausreißer des Messsignals, geprüft. Als fehleranfällig konnte der Ultraschallsensor C identifiziert werden. Insgesamt 30 von 46 der eingesetzten Sensoren dieses Typs zeigten ein fehlerhaftes Messsignal.

Anhand von zwei Anlagen werden im Folgenden exemplarisch die charakteristischen Ausreißer dieses Ultraschallsensors dargestellt. Als Ausreißer wird ein Sprung des Rohwertes des Messsignals auf den maximalen Wert von 32767 definiert.

Die in Abbildung 2-119 gezeigte Auswertung des Ultraschallsensors C der Versuchsanlage für den Zeitraum Januar 2021 bis Juli 2022 verdeutlicht den stark fehlerbehafteten Rohwert des Messsignals dieses Sensors, der als schwarze Linie dargestellt ist, in den Monaten Januar sowie Juli bis November des Jahres 2021. Rohwerte von 0 sind nicht als Fehler zu interpretieren, sondern deuten auf eine Abschaltung respektive Neustart der SPS hin. Seit dem durchgeführten Sensortausch verhält sich der Rohwert unauffällig.

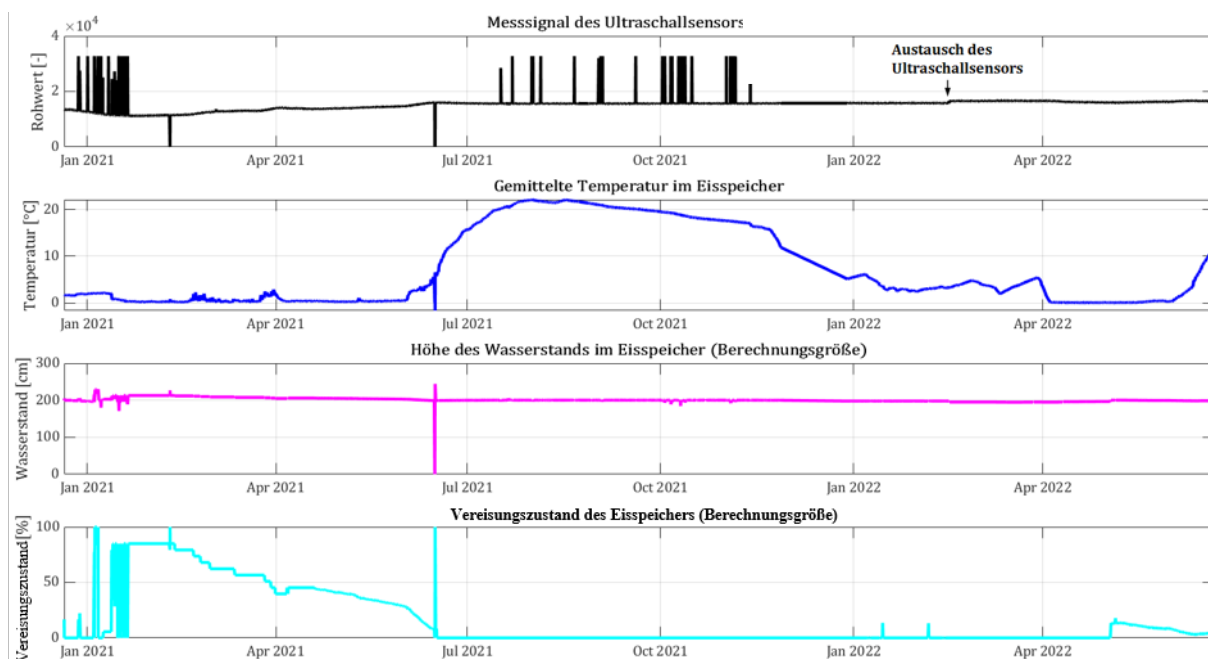


Abbildung 2-119: Darstellung des Messsignals (Rohwert) des Ultraschallsensor C (ganz oben), die gemittelte Temperatur und der Höhe des Wasserstands im Eisspeicher sowie des Vereisungszustandes (ganz unten) der Versuchsanlage für den Zeitraum von Dezember 2020 bis Juli 2022

Die Abbildung 2-120 zeigt als Ausschnitt die Auswertung für den Monat Januar 2021, in welchem eine hohe Dichte an Ausschlägen des Rohwerts identifiziert werden konnte. Der Ausschnitt zeigt deutlich, wie die aus dem tiefpass-gefilterten Rohwert resultierenden Berechnungsgrößen *Vereisungszustand* und *Höhe des Wasserstands im Eisspeicher* den fehlerhaften Ausschlägen folgen. Eine Störung des Betriebsverhaltens kann durch den stark springenden Vereisungszustand nicht ausgeschlossen werden, da dieser in Zusammenhang mit der Regelung maßgeblich über die Betriebslogik der Anlage entscheidet.

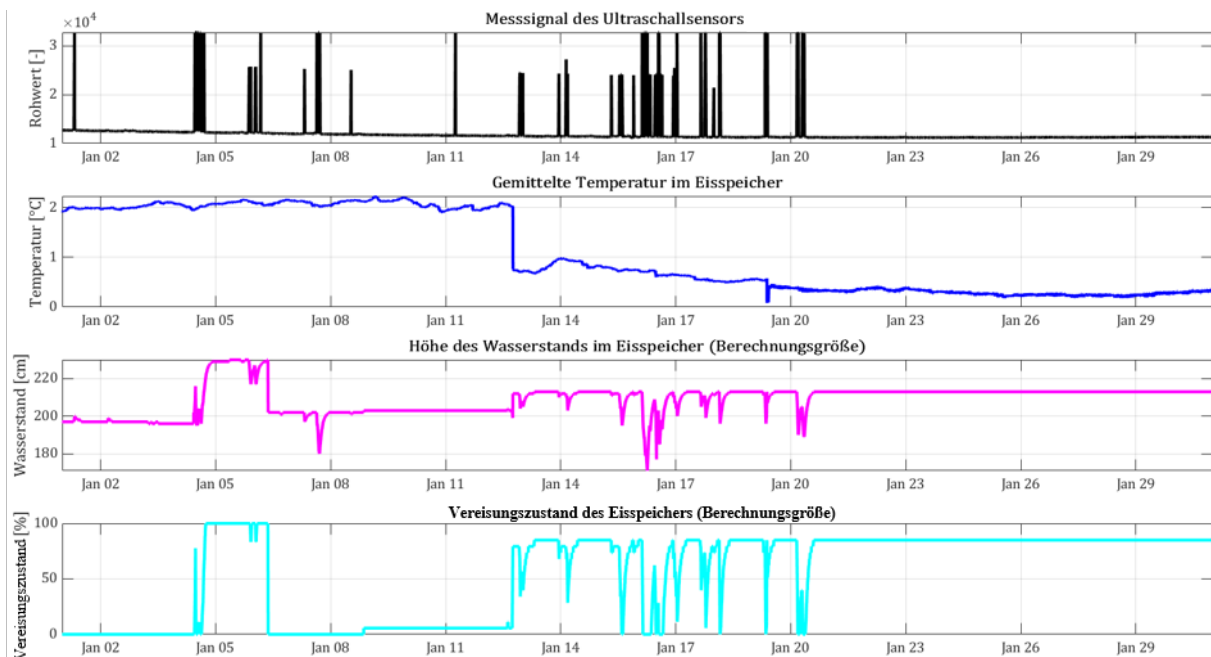


Abbildung 2-120: Darstellung des ausgewerteten Messsignal (Rohwert) des Ultraschallsensor C (ganz oben), der gemittelten Temperatur und der Höhe des Wasserstands im Eisspeicher sowie des Vereisungszustandes (ganz unten) der Versuchsanlage 2 für Januar 2021

Auch in einer weiteren Anlage der Fa. VCS konnten Ausfälle beobachtet werden. In dieser Anlage wurden drei Eisspeicher mit jeweils einem Ultraschallsensor C verbaut. Besonders auffällig ist hier der temporäre Ausfall aller drei Sensoren, was in folgender Abbildung 2-121 zu erkennen ist. Die Sensoren des Eisspeichers 2 (EES2) und 3 (EES3) zeigen im April 2021 ein stark gestörtes Signal, Messwerte sind hier teilweise über Tage nicht verfügbar. Dieses Verhalten kann für den Sensor in Eisspeichers 2 im Zeitraum Dezember 2021 bis Januar 2022 erneut beobachtet werden. Bei Betrachtung des Sensors im Eisspeicher 1 (EES1) können dagegen nur einzelne Ausreißer identifiziert werden. Der in mA umgerechnete Messwert sowie die Berechnungsgröße *Vereisungszustand* folgen auch hier den Ausfällen und sollten nicht zur Regelung der Anlage genutzt werden. Der in der Abbildung zusätzlich dargestellte tiefpassgefilterte Messwert (orange) bleibt von den Messfehlern nicht unbeeinflusst. Eine vollständige Unterdrückung der Ausreißer erfolgt nicht. Weiterhin zeigt sich beim Vergleich aller Eisspeicher, dass diese gleichmäßig entladen werden. Die Eisspeichertemperaturen zeigen einen nahezu identischen Verlauf.

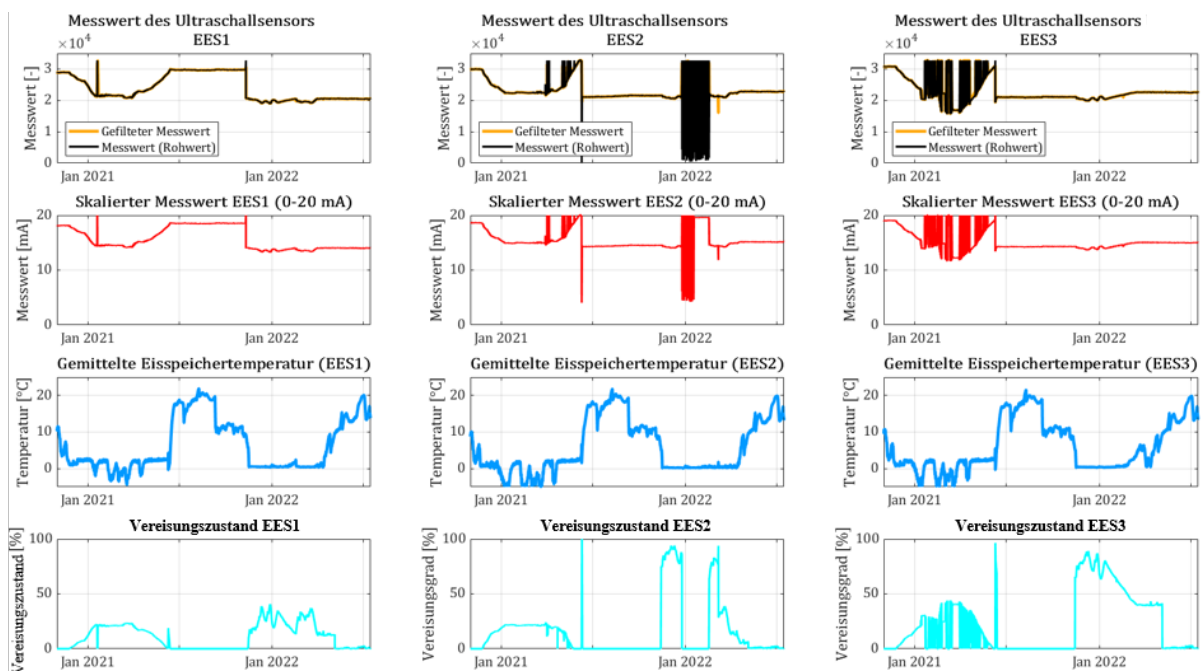


Abbildung 2-121: Darstellung der Messsignale der Ultraschallsensoren C (oberste. Reihe), des skalierten bzw. umgerechneten Messwertes in mA, die gemittelte Temperatur des Eisspeichers und des Vereisungszustands (unterste Reihe) für alle drei Eisspeichern der Anlage für den Zeitraum November 2020 bis Juli 2022

Ein erster Vergleich von Sensoren kann mittels der Versuchsanlage 3 vorgenommen werden (vgl. Abschnitt 4.5.4). Diese verfügt über zwei Eisspeicher mit erweiterter Messtechnik und ermöglicht eine Gegenüberstellung des Messsignals des Ultraschallsensors C, verbaut im ersten Eisspeicher (EES1), dem Ultraschallsensor G und dem auf dem Messprinzip einer geführten Mikrowelle basierenden Sensor E, welche beide im zweiten Eisspeicher (EES2) verbaut wurden. Die gemessenen Abstände zur Wasseroberfläche sowie die Eisspeichertemperaturen sind in nachfolgender Abbildung 2-122 dargestellt. Für die Auswertung wurden die Abstände rechnerisch am 8.4.2022 auf null gesetzt um ausschließlich einen Vergleich der Distanzänderung zu erzielen. Es wird deutlich, dass die Messung aller drei Sensoren einen nahezu identischen Verlauf der Füllstandsänderung zeigen. Aufgrund einer umgekehrten Abstandsdefinition der Sensoren verlaufen die Messwerte des Sensors E verglichen mit den beiden Ultraschallsensoren gegenläufig (E: 4 mA = Wasser erreicht Sensor, C: 4 mA = Wasser hat 1 m Abstand vom Sensor). Der Ultraschallsensor C zeigt aufgrund einer softwaretechnischen Nachbearbeitung im SPS -Programm derzeit eine maximale Genauigkeit von 1 cm, während die zwei Sensoren G und E mit einer maximalen Messgenauigkeit von 1 mm arbeiten. Die nicht korrekte Umrechnung des Messsignals des Sensors C in ganzzahlige cm-Messabstände wurde anschließend korrigiert.

Ergänzend zur Thematik der Füllstandsensoren zeigt sich beim Vergleich der Messdaten für die beiden Eisspeicher, dass diese, analog zu den drei Speichern einer anderen Anlage, gleichmäßig entladen wurden.

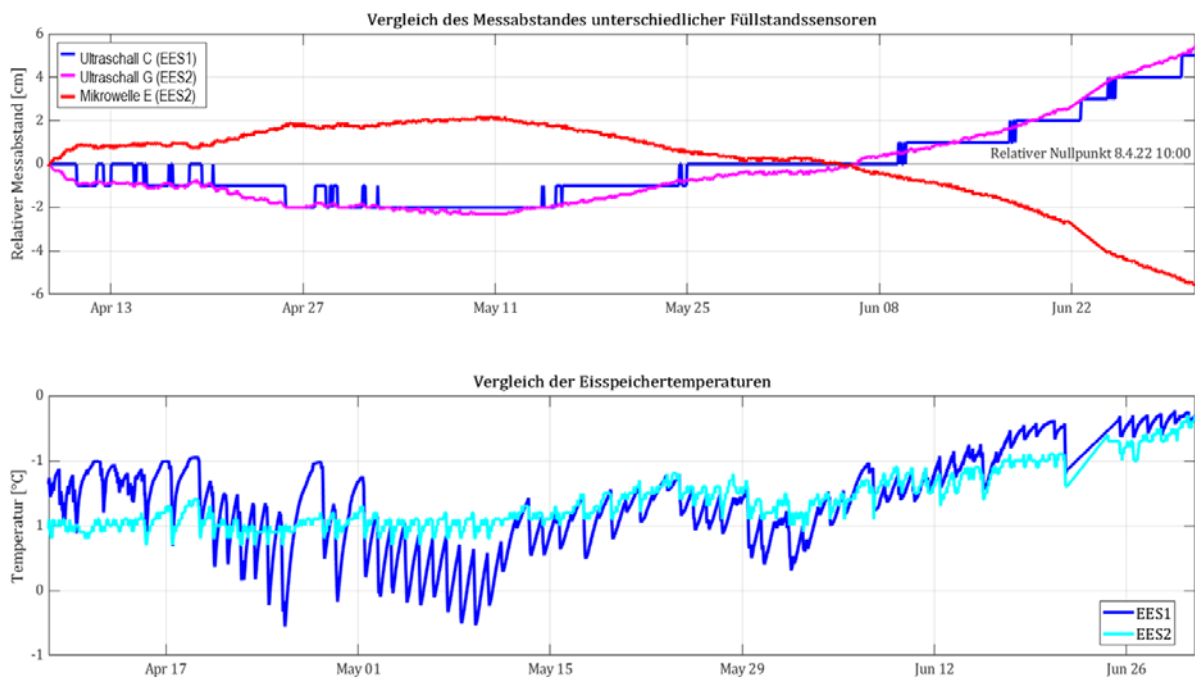


Abbildung 2-122: Vergleich der (relativen) Messabstände zur Wasseroberfläche, gemessen mit dem Ultraschallsensor C im Eisspeicher 1 (EES1) und dem Ultraschallsensor G sowie dem Füllstandssensor E im Eisspeicher 2 (oben) sowie der gemittelten Eisspeichertemperaturen in beiden Eisspeichern (unten). für den Zeitraum vom 08.04,22 bis 30.06.22

Die Messdaten der bis Sommer 2022 betrachteten insgesamt 32 Sensoren wurden geprüft und in einer ersten Auswertung in *fehlerhaft* und *fehlerlos* unterteilt. Das Ergebnis ist in Abbildung 2-123 zu sehen.

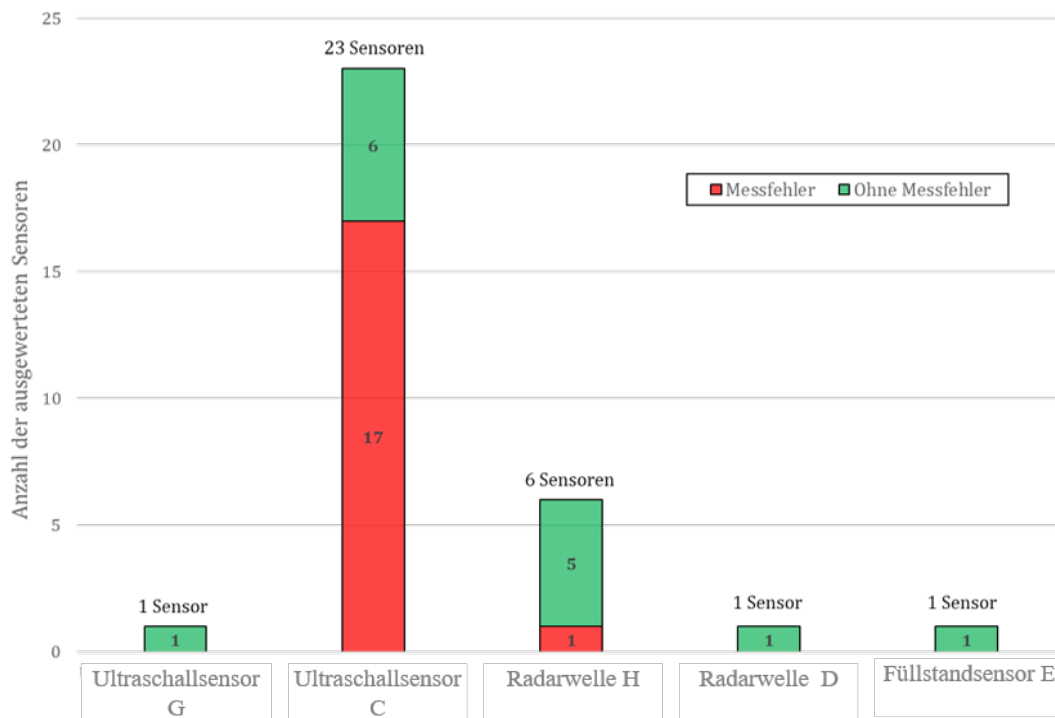


Abbildung 2-123: Vergleich von fünf verschiedenen Typen von Füllstandssensoren. Die Auswertung erfolgte mittels Messdaten von Kunden- bzw. Versuchsanlagen. Die Messsignale der insgesamt 32 Sensoren wurde über einen Zeitraum von mindestens fünf Monaten auf Messfehler geprüft.

Ab dem 2. Halbjahr 2022 wurde die Untersuchung von Beladungssensoren aus Kunden- bzw. Versuchsanlagen für ausgewählte integrale Beladungszustandssensoren noch erweitert und bis zum Ende des Vorhabens eine Gesamtzahl von 93 Sensoren erreicht. Die Sensoren sind in rund 70 unterschiedlichen Anlagen installiert (vgl. Tabelle 2-33), so dass ein möglichst breites Spektrum von unterschiedlichen Randbedingungen wie Einbaulage, Messabstand, Auswertungselektronik und Umgebungsbedingungen abgedeckt wird.

Die Datenerfassung über die Anlagensteuerung Vitocontrol in diesen Anlagen erfolgt seit Oktober bzw. November 2022. Erfasst werden als Standardwerte die Temperaturen des Eisspeichers sowie der mit einem Sensorsignal berechnete Füllstand. In der Erweiterung werden zusätzlich von allen Füllstandssensoren die ungefilterten Rohwerte, die Zeitmittelwerte nach der Filterung (PT1, Zeitkonstante 120 s bis 300 s abhängig vom Sensortyp), der berechnete Abstand des Sensors von der Wasserfläche und der Füllstand aufgezeichnet.

Tabelle 2-33: Anzahl der ausgewerteten Füllstandsensoren.

Nr.	Messprinzip	Anzahl Sensoren 06/2022	Anzahl Sensoren 12/2022	Anzahl Sensoren 02/2024
G	Ultraschall	1	5	5
C	Ultraschall	23	45	46
H	Radar	6	6	10
D	Radar	1	11	14
E	Geführte Mikrowelle	1	6	1
L	elektrische Leitfähigkeit	-	9	9
I	Kapazitiv / Impedanz	-	6	6
P	Differenzdruck	-	-	2

Eine erste Bewertung einiger Sensoren kann ohne detaillierte Auswertung erfolgen:

- Der Ultraschallsensor G zeigt dieselben prinzipiellen Probleme wie der Ultraschallsensor C.
- Das Messprinzip der geführten Mikrowelle bedeutet beim Einbau zu viele Einschränkungen hinsichtlich des Mindestabstands und elektrischer Erdung des Anschlusses.

Diese Sensoren wurden daher nicht weiterverfolgt.

Die Differenzdruckmessung mit dem Sensor G bedeutet im Einbau einen erhöhten Aufwand, da eine Referenzdruck-Messtelle im trockenen, unbewitterten Bereich eingerichtet werden muss. Dies erfolgt über eine Kapillare, die im Messkabel bis in das Gebäude gezogen wird. Zu Beginn des Projekts wurde dieser Aufwand als zu hoch eingeschätzt. Erst im Lauf des Projekts zeigte sich, dass Alternativen zum Radarsensoren entweder ungeeignet sind oder auch sehr kompliziert zu installieren (gute Erdung bei einem Betonbehälter). Die Druckmessdose wurde daher erst zum Projektende aufgenommen. Eine für eine umfassende Bewertung ausreichende Betriebszeit konnte während der Laufzeit des Vorhabens nicht erreicht werden. Dies wird nach Projektende von VCS weiterverfolgt.

Eine relevante Laufzeit für die weitere statistische Auswertung wurde nur mit den beiden Radarsensoren D und H sowie dem Ultraschallsensor C erreicht. Diese werden in der weiteren Auswertung betrachtet (Betriebsmonate s. Abbildung 2-124).

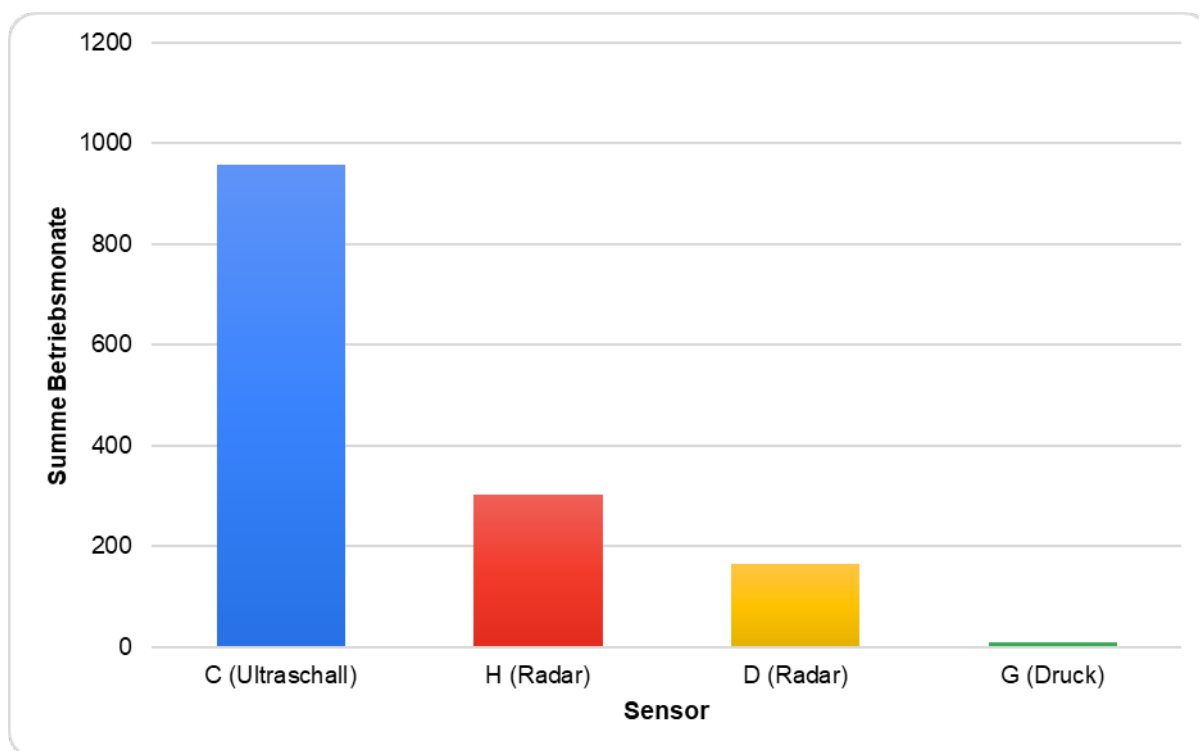


Abbildung 2-124: In der Projektlaufzeit erreichte kumulierte Messzeit für die einzelnen Sensortypen.

Abhängig vom Typ des Sensors traten in den Anlagen Messfehler auf (Abbildung 2-125). Da die Anlagen nicht die gleiche Betriebsdauer haben, wurde das Ergebnis umgerechnet auf die Anzahl der Messfehler pro Betriebsmonat (Abbildung 2-126). Auffällig ist, dass kein Messprinzip absolut fehlerfrei geblieben ist. Das Radar-Messprinzip scheint in Eisspeicher-Anlagen aber eine signifikant niedrigere Fehlerquote zu haben als beispielsweise ein Ultraschallsensor.

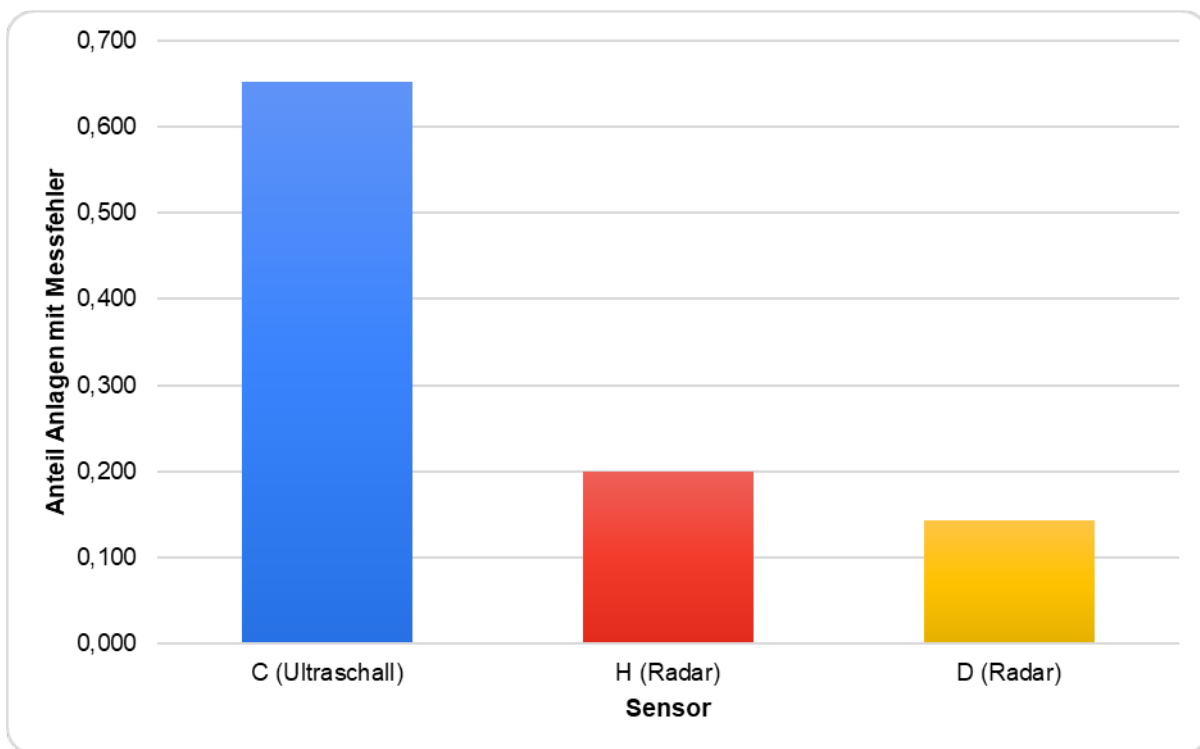


Abbildung 2-125: Anteil der Anlagen mit Messfehler

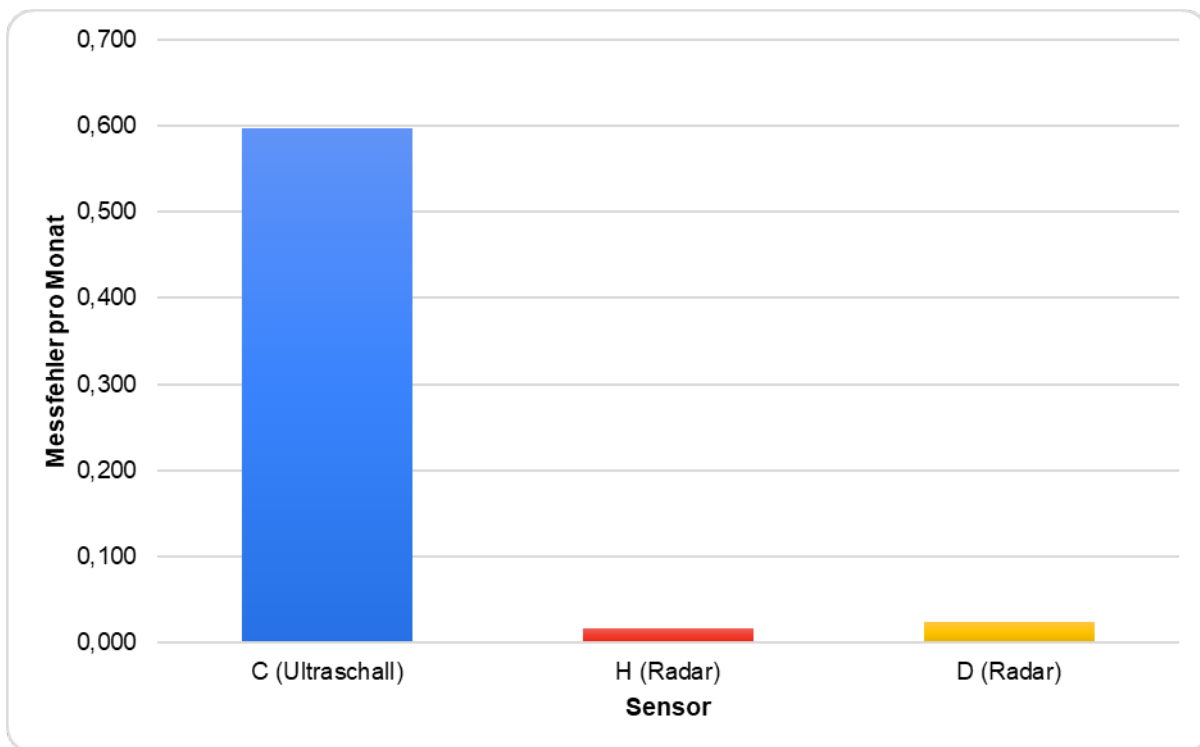


Abbildung 2-126: Messfehler pro Betriebsmonat und Sensor

2.6.2.10 Untersuchung von Beladungssensoren im Labormuster für Latentspeicher

Die in Tabelle 2-34 aufgeführten Beladungssensoren wurden hinsichtlich ihrer Genauigkeit zur Bestimmung des Beladungszustands und ihrer Langzeitstabilität am Labormuster für Latentspeicher (siehe Abschnitt 2.6.3) am IGTE intensiv untersucht. Bei den Beladungssensoren wird differenziert zwischen einer *integralen* Beladungsbestimmung, d.h. einer kontinuierlichen Bestimmung des Beladungszustandes und einer *punktuellen* Beladungsbestimmung (Beladungszustand 0 % oder 100 %).

Bei der **kontinuierlichen Bestimmung des Beladungszustands** wird dieser indirekt über die zu- bzw. abgeführte Wärmemenge, über die Änderung des Pegelstandes oder über die Messung der Auftriebskraft bestimmt.

Tabelle 2-34: Untersuchte Beladungssensoren und Messprinzip der eingesetzten Messgeräte zur Bestimmung Beladungszustands

Bezeichnung Beladungssensor	Messprinzip	Bestimmung von	Art der Bestimmung des Beladungszustands Integral oder punktuell
Sensor A10 u. A11	U-Schall Durchflussmessung* mit Pt100 Temperaturmessung	Wärmemenge	integral
Sensor B	Wärmemengenzähler mit MID** und Pt500 Temperaturmessung	Wärmemenge	integral
Sensor C1 – C3	Ultraschall	Pegelstand	integral
Sensor D	Radarwelle	Pegelstand	integral
Sensor E	geführte Mikrowelle	Pegelstand	integral
Sensor F	Wägezelle	Auftriebskraft	integral
Sensor G	Ultraschall	Pegelstand	integral
Sensor I	Impedanz	Grenzpegel	punktuell
Sensor L	Leitfähigkeit	Grenzpegel	punktuell
* Volumenstrommessung			
** MID: Magnetisch-induktiver Durchflussmessung (Volumenstrommessung)			

Bei dem in Tabelle 2-34 aufgeführten Sensor B wurde nur das Signal der Volumenstrommessung erfasst. Die Signale der Pt500 Temperaturmessfühler konnten auf Grund von Kommunikationsproblemen nicht erfasst werden. Daher erfolgt die Ermittlung der Temperaturen mit der Referenzmesstechnik unter Verwendung von kalibrierten Pt100 Messfühlern und die Volumenstrommessung mittels Sensor B. Aus diesen Messsignalen wird der Massenstrom und die Wärmemenge berechnet. Für die Genauigkeit des Sensors B ist somit nur die Messunsicherheit der Volumenstrommessung relevant.

Tabelle 2-35 zeigt die Ergebnisse der ermittelten Genauigkeit der Beladungssensoren A10, A11 und B zur Bestimmung des Beladungszustands auf Basis der entzogenen Wärmemenge. Hierbei wurde der Einfluss der Wärmegewinne über die Speicherwand noch nicht berücksichtigt. Abbildung 2-127 zeigt das Schema der Messstrecke zur Bestimmung der Messunsicherheit der Beladungssensoren A10, A11 und B. Bei diesen Ergebnissen wird der über die Entzugswärmeübertrager mit den Beladungssensoren A10, A11 und B bestimmte Wärmestrom mit dem mittels Referenzmessung (Ref) bestimmten Wärmestrom verglichen. Die Genauigkeit ergibt sich somit durch die erweiterte Messunsicherheit der Wärmemenge $U_{SVS}(Q)$ bzw. des gemessenen Massenstroms $U(\dot{m}_{Sensor})$ und der Temperaturmessung $U(\vartheta)$. Mit den Beladungssensoren A10, A11 und B wird eine Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustands zwischen $G(S_{OC}) = \pm 4 \%$ und $G(S_{OC}) = \pm 8 \%$ erreicht. Dies entspricht einer erweiterten Messunsicherheit der entzogenen Wärmemenge von $U_{SVS}(Q_S) = \pm 38 \text{ kWh}$ bzw. $U_{SVS}(Q_S) = \pm 74 \text{ kWh}$ gegenüber der Referenzmessung.

Tabelle 2-35: Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustands und der erweiterten Messunsicherheit $U_{SVS}(Q)$ der Beladungssensoren A10, A11 und B, auf Basis der entzogenen Wärmemenge (Basis Versuche 1 – 4).

	Sensor A10	Sensor A11	Sensor A10.11*	Sensor B**
Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustand $G(S_{OC})$	$\pm 8 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 6 \%$	$\pm 4 \%$
Anzahl Versuche n	3	4	3	4
Erweiterungsfaktor k	4,303	3,182	3,182	4,303
erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(Q_S)$	$\pm 74 \text{ kWh}$	$\pm 43 \text{ kWh}$	$\pm 59 \text{ kWh}$	$\pm 38 \text{ kWh}$
rel. erweiterte Messunsicherheit $W_{SVS}(Q_S)$	$\pm 14 \%$	$\pm 6 \%$	$\pm 11 \%$	$\pm 6 \%$
* Mittelwertwert der Ergebnisse Sensor A10 und A11				
** Volumenstrommessung mit Sensor B, Temperaturmessung mit Temperaturfühler der Referenzmessung				

Tabelle 2-36 zeigt die erweiterte Messunsicherheit $U(\dot{m}_{sensor})$ der Beladungssensoren A10, A11 und B sowie die erweiterte Messunsicherheit der Temperaturmessung $U(\vartheta)$ der Beladungssensoren A10, A11 für einen Bereich des Massenstroms von $300 \text{ kg/h} \leq \dot{m} \leq 1.500 \text{ kg/h}$ in einem Temperaturbereich von $-15 \text{ °C} \leq \vartheta_{fluid} \leq 40 \text{ °C}$. Die baugleichen Sensoren A10 und A11 weisen eine systematische Messabweichung (BIAS mittels Doppelbestimmung) bei der Messung des Massenstroms bzw. des Volumenstroms auf. Bei der Temperaturmessung ist bei diesen Sensoren keine systematische Abweichung feststellbar.

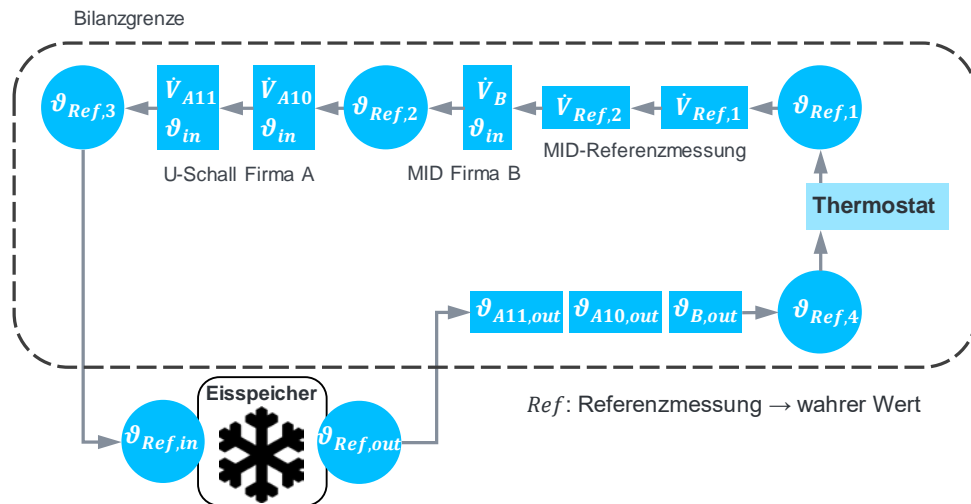


Abbildung 2-127: Schematische Darstellung der Messstrecke zur Bestimmung der Messunsicherheit der Beladungssensoren A10, A11 und B ohne Berücksichtigung des Einflusses der Wärmegewinne über die Speicherwand.

Tabelle 2-36: Ermittlung der erweiterten Messunsicherheit $U(\dot{m}_{sensor})$ und $U(\vartheta)$ der Beladungssensoren für einen Bereich des Massenstroms von $300 \text{ kg/h} \leq \dot{m} \leq 1.500 \text{ kg/h}$ für einen Temperaturbereich von $-15 \text{ °C} \leq \vartheta_{fluid} \leq 40 \text{ °C}$.

	Sensor A10	Sensor A11	Sensor A10.11*	Sensor B**
erweiterte Messunsicherheit $U(\dot{m}_{sensor})$	± 27 kg/h	± 11 kg/h	± 15 kg/h	± 9 kg/h
Bias bzgl. Massenstrommessung	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	Ja	nicht bestimmbar
erweiterte Messunsicherheit $U(\vartheta)$	± 0,81 °K	± 0,90 °K	± 0,84 °K	nicht vorhanden
Bias bzgl. Temperaturmessung	nicht bestimmbar	nicht bestimmbar	Nein	nicht bestimmbar
* Mittelwertwert der Ergebnisse für Sensor A10 und A11				
** Volumenstrommessung mit Sensor B, Temperaturmessung mit Temperaturfühler der Referenzmessung				

Für den Sensor A10 wurde eine erweiterte Messunsicherheit der Volumenstrommessung bzw. der Massenstrombestimmung von $U(\dot{m}_{\text{Sensor}}) = \pm 27 \text{ kg/h}$ und der Temperaturmessung von $U(\vartheta_{10}) = \pm 0,81 \text{ K}$ ermittelt. Der Sensor A11 weist eine ähnliche erweiterte Messunsicherheit der Temperaturmessung von $U(\vartheta_{11}) = \pm 0,90 \text{ K}$ auf. Die erweiterte Messunsicherheit des Massenstroms des Sensors A11 ist gegenüber der des baugleichen Sensors A10 mit $U(\dot{m}_{\text{Sensor}}) = \pm 11 \text{ kg/h}$ etwa nur halb so groß. Da die Temperaturmessung beim Sensor B mittels Referenzmessung erfolgte, kann hier keine erweiterte Messunsicherheit der Temperaturmessung angegeben werden. Für den Sensor B wurde eine erweiterte Messunsicherheit des Massenstroms von $U(\dot{m}_{\text{Sensor}}) = \pm 27 \text{ kg/h}$ ermittelt.

Abbildung 2-128 zeigt die erweiterte Messunsicherheit $U(\dot{m}_{\text{Sensor}})$ der Beladungssensoren A10, A11 und B für den Bereich des Massenstroms von $300 \text{ kg/h} \leq \dot{m} \leq 1.500 \text{ kg/h}$ in Abhängigkeit von der Temperatur. Zu erkennen ist, dass der Sensor A10 gegenüber den Sensoren A11 und B ein höheres Niveau der erweiterten Messunsicherheit des Massenstroms im Temperaturbereich von $-15 \text{ °C} \leq \vartheta_{\text{fluid}} \leq 30 \text{ °C}$ aufweist. Sensor A11 und Sensor B weisen einen ähnlichen Verlauf der erweiterten Messunsicherheit des Massenstroms über den gesamten Temperaturbereich auf.

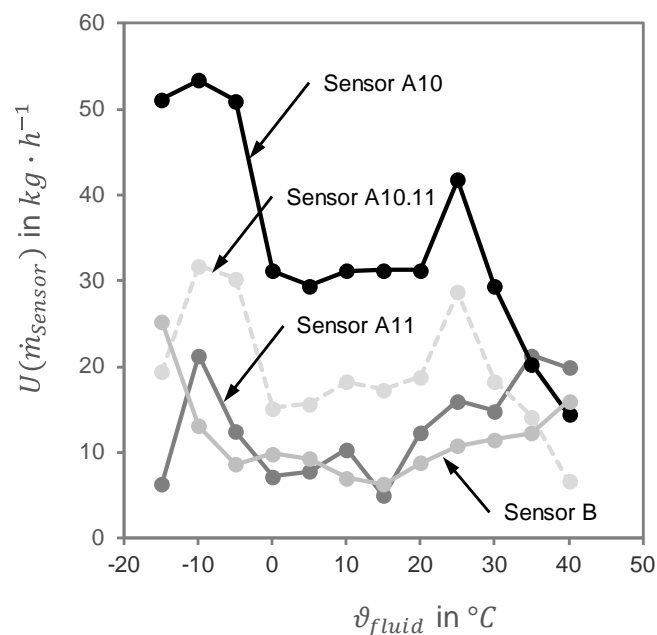


Abbildung 2-128: Erweiterte Messunsicherheit $U(\dot{m}_{\text{Sensor}})$ der Beladungssensoren A10, A11 und B für den Bereich des Massenstroms von $300 \text{ kg/h} \leq \dot{m} \leq 1.500 \text{ kg/h}$ in Abhängigkeit von der Temperatur

Sowohl bei der Bestimmung des Beladungszustands mittels Auftriebskraftmessung als auch mittels Pegeländerung erfolgt die indirekte Eismassenbestimmung volumenbasiert. Infolgedessen bewirken Lufteinschlüsse im Eis eine Überschätzung der Eismasse. Für eine Korrektur der Eismasse wurde ein Luftanteil im Eis von 1 % abgeschätzt. Dadurch ergibt sich gegenüber reinem Eis eine veränderte Dichte des Eis/Luft-Gemisches.

Die mit dieser veränderten Dichte korrigierten Eismassen ergeben die in Tabelle 2-37 berechnete Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustands und die erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis,S})$ von Beladungssensoren.

Die U-Schall Sensoren C1 und C2 erreichen eine Genauigkeit von $G(S_{oC}) = 7 \%$ (Sensor C1) und $G(S_{oC}) = 12 \%$ (Sensor C2). Der Sensor C3 (U-Schall) aus der Anlage 2 erreicht bei den Messungen im Versuchseisspeicher eine Genauigkeit von $G(S_{oC}) = 5 \%$. Der Sensor C3 erreicht somit von den drei eingesetzten U-Schallsensoren (C1-C3) die höchste Genauigkeit zur Bestimmung des Beladungszustandes. Es ist auch zu erkennen, dass die drei Sensoren C1 – C3 eine hohe Streuung aufweisen. Der Sensor D (Radarwelle) erreicht eine Genauigkeit von $G(S_{oC}) = 9,5 \%$. Für den Sensor E (geführte Mikrowelle) liegt bisher nur eine Messung vor. Dadurch können noch keine belastbaren Ergebnisse zur Genauigkeit angegeben werden. Der Beladungssensor F kann die Eismasse mit einer Messunsicherheit von $U_{SVS}(m_{Eis,S}) = \pm 275 \text{ kg}$ bestimmen. Dies entspricht einer Genauigkeit zur Bestimmung des Beladungszustand von $G(S_{oC}) = 3 \%$. Der Sensor G (U-Schall) erreicht eine Genauigkeit von $G(S_{oC}) = 7 \%$.

Tabelle 2-37: Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustands und erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis,S})$ der Beladungssensoren; berechnet mit korrigierten Werten der indirekt bestimmten Eismasse (Basis Versuche 1 – 4).

	Sensor C1 (U-Schall)	Sensor C2 (U-Schall)	Sensor C3 (U-Schall)	Sensor D (Radarw.)	Sensor E (Mikrow.)	Sensor F (Auftrieb)	Sensor G (U-Schall)
Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustand $G(S_{oC})$	$\pm 7 \%$	$\pm 12 \%$	$\pm 5 \%$	$\pm 10 \%$	-	$\pm 3 \%$	$\pm 7 \%$
Anzahl Versuche N	4	3	3	3	1	4	2
Erweiterungsfaktor k	3,182	4,303	4,303	4,303	-	3,182	12,706
erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis,S})$	$\pm 710 \text{ kg}$	$\pm 1.191 \text{ kg}$	$\pm 502 \text{ kg}$	$\pm 954 \text{ kg}$	$\pm - \text{ kg}$	$\pm 275 \text{ kg}$	$\pm 749 \text{ kg}$
rel. erweiterte Messunsicherheit $W_{SVS}(m_{Eis,S})$	$\pm 14 \%$	$\pm 21 \%$	$\pm 13 \%$	$\pm 19 \%$	$\pm - \%$	$\pm 7 \%$	$\pm 21 \%$

Fazit

In der Vorhabensbeschreibung wurde der Meilenstein MAB 2.7 mit folgendem Abbruchkriterium definiert: „Es wird erwartet, dass Latentspeicher durch inhärente Eigenschaften wie z. B. eine spezielle Geometrie oder die Ausnutzung von physikalischen Grenzen, aber auch durch Sensorik oder durch andere zuverlässige Überwachungsmaßnahmen wie z. B. die exakte Bestimmung der Wärmeübergänge (die Entladeleistung sinkt bei abnehmendem Beladungsstand) vor Schäden beim Phasenwechsel geschützt werden können. Sollte es bis zum Erreichen des Meilensteins MAB 2.7 nicht gelingen hierfür geeignete Geometrien zu identifizieren oder einen zuverlässigen Sensor zur Bestimmung des Beladungszustands bzw. des Vereisungszustands zu entwickeln, so werden die Arbeiten am Latentspeicher nach dem Ende des vierten Quartals 2021 nicht weiter fortgeführt.“

Wie beschrieben, wurden für die Bestimmung des Beladungszustandes verschiedene Verfahren zur Bestimmung des Beladungszustands identifiziert und auf ihre Eignung hin untersucht. Wie die Auswertungen zeigen, kann mit einigen Verfahren die geforderte Genauigkeit von 5 % erreicht werden. Weitere Untersuchungen der Sensoren bezüglich ihres Langzeitverhaltens in den Versuchsanlagen sind in Kapitel 2.6.2.7 dargestellt. Änderungen der Speichergeometrie, um Schäden beim Phasenwechsel am Latentspeicher zu verhindern, sind daher nicht nötig. Der Meilenstein MAB 2.7 wurde somit vollumfänglich erreicht und die geplanten Arbeiten fortgeführt.

2.6.3 Aufbau und Untersuchungen am Labormuster für Latentspeicher

2.6.3.1 Aufbau des Labormusters für Latentspeicher

Für die Aufstellung des Labormusters eines Latentspeichers im Außenlabor des IGTE musste zunächst ein vorhandener Heißwasser-Erdbeckenspeicher rückgebaut werden. Abbildung 2-129 zeigt den Ausgangszustand (links) sowie die für den Einbau des Latentspeichers vorbereitete Baugrube (rechts).



Abbildung 2-129: Außenlabor IGTE: Ausgangszustand mit Heißwasser-Erdbeckenspeicher (links) und zur Einbringung des Eisspeichers vorbereitete Baugrube (rechts)

Im ersten Halbjahr 2021 wurde ein Eisspeicher des Typs SE12 der Fa. VCS mit einem Speichervolumen von 12 m³ als Versuchsspeicher in die durch den Rückbau entstandene Grube eingebracht (vgl. Abbildung 2-130 links). Neben der Grube wurde ein Messcontainer aufgebaut, in dem die Temperatureinheit, die Messtechnik und der Leitstand für den Laborspeicher installiert wurden (vgl. Abbildung 2-130 rechts oben). Für eine bessere Zugänglichkeit des Laborspeichers und der Sensoren wurde eine Arbeitsplattform in Höhe des oberen Bereichs der zylindrischen Speicherwand eingebracht. Um den Laborspeicher vor Witterung zu schützen, wurde eine Überdachung über der Grube aufgebaut (vgl. Abbildung 2-130 rechts unten).



Abbildung 2-130: Einbringung des Laborspeichers am Außenlabors am IGTE und Aufbau einer Überdachung.

Abbildung 2-131 zeigt den Laborspeicher mit angehobenem Deckel, um eine bessere Zugänglichkeit zu den Sensoren im Inneren des Speichers zu ermöglichen. Abbildung 2-132 zeigt den Speicherinnenraum mit Wärmeübertrager und Temperatursensoren zur Messung der Eingangs- und Ausgangstemperatur, sowie die Kraftsensoren zur kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse.



Abbildung 2-131: Aufbau Versuchsspeicher: Außenansicht mit angehobenem Speicherdeckel und umgebender Arbeitsplattform.



Abbildung 2-132: Speicherinnenraum mit angehobenem Speicherdeckel und Sensoren (WÜT: Wärmeübertrager)

Für die Erstellung einer Energiebilanz des gesamten Speichers müssen die Energieströme mit einer geringen Messunsicherheit bestimmt werden. Hierfür wurde eigens eine spezielle Messanordnung zur Bestimmung der Energieströme über den Entzugs- und Regenerationswärmeübertrager entwickelt und im Messcontainer aufgebaut. Diese Messanordnung ermöglicht nicht nur die Bestimmung der Messunsicherheit der Referenzmessung des Massenstromes, sondern auch von weiteren Sensoren zur Beladungszustandserkennung nach dem Bilanzierungsverfahren. Als Beladungszustandserkennungssensoren nach dem Bilanzierungsverfahren kommen zwei Volumenstrommessungen über Ultraschall mit Eingangs- und Ausgangstemperaturmessung mittels PT100 Widerstandsthermometer sowie eine magnetisch-induktive Volumenstrommessung (MID) mit Eingangs- und Ausgangstemperaturmessung mittels PT100 Widerstandsthermometer zum Einsatz.

Abbildung 2-133 zeigt den Aufbau der Messanordnung. Zur besseren Übersicht ist hier der Thermostat zur Bereitstellung unterschiedlicher Betriebstemperaturen für den Versuchsspeicher noch nicht installiert und der Messaufbau auch noch nicht wärmegeklämt. Die Referenzmessung des Massenstroms erfolgte in Anlehnung an VDI 4207-2 mittels einer Doppelbestimmung mit kalibrierten magnetisch-induktiven Durchflussmessgeräten (MID) und kalibrierten Widerstandsthermometern des Typs PT100. Die Temperaturmessung erfolgte entlang der Messstrecke an drei Messstellen (Eingang, Mitte, Ausgang) um die Temperaturabnahme auf Grund von Wärmeverlusten über die Messstrecke quantifizieren zu können. Die Temperaturmessung war nötig um mit den Messwerten der Volumenstrommessung (MID) den Massenstrom der Referenzmessung zu berechnen. Des Weiteren dienen die Referenz-Temperaturmessstellen zur Überprüfung der Temperaturmessung der zu überprüfenden Beladesensoren und in Kombination mit der Volumenstrommessung der Beladungssensoren zur Überprüfung des berechneten Massenstromes. Der Massenstrom der Referenzmessung wurde mit Hilfe eines kalibrierten und verifizierten Coriolis-Massendurchflussmessers kalibriert. Die Kalibrierung der Referenzmessung des Massenstroms erfolgte mit Leitungswasser bei einer Temperatur von $\vartheta_{Fluid} = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nach der Kalibrierung wurde in die Leitungen Frostschutzmittel gefüllt, um ein Einfrieren der Leitungen beim Betrieb des Eisspeichers zu verhindern. Im Anschluss erfolgte die Bestimmung der Messunsicherheit der Beladungssensoren in einem Temperaturbereich von $-15\text{ }^{\circ}\text{C} \leq \vartheta_{Fluid} \leq 40\text{ }^{\circ}\text{C}$.



Abbildung 2-133: Messaufbau zur Bestimmung der Energieströme des Entzugs- und Regenerationswärmeübertragers des Versuchsspeichers und zur Überprüfung der Messergebnisse der Sensoren zu Bestimmung des Beladungszustands mittels Energiebilanzierung

Abbildung 2-134 zeigt die fertige Außenansicht des Versuchseisspeichers im Außenlabor des IGTE. Abbildung 2-135 zeigt den Endzustand des Versuchsspeichers von innen. Für die Wägung der am Entzugswärmeübertrager anhaftenden Eismasse wurde eine Tragstruktur erstellt (vgl. Abbildung 2-136). Dadurch ist eine direkte Bestimmung der tatsächlichen bzw. wahren Eismasse am Ende der Entzugsphase möglich, wenn zuvor das noch im Speicher befindliche restliche flüssige Wasser abgepumpt wird. Zur kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse wurden Kraftsensoren (Abbildung 2-137 links) eingebaut und in Betrieb genommen

und ihre Messgenauigkeit mit Hilfe einer Kranwaage (Abbildung 2-137 rechts) überprüft. Außerdem wurden Temperaturfühler zur Messung der Innen- und Außenwandtemperatur (vgl. Abbildung 2-138 links) an der Mantelfläche des Eisspeichers sowie im Innenbereich des Speicherbodens installiert (vgl. Abbildung 2-138 rechts).



Abbildung 2-134: Außenlabor des IGTE mit Versuchseisspeicher



Abbildung 2-135: Aufbau Versuchsspeicher: Außenansicht mit angehobenem Speicherdeckel, umgebender Arbeitsplattform und Zugang zu den extern angebrachten Beladungssensoren.



Abbildung 2-136: Tragstruktur für die Wägung der am Entzugswärmeübertrager anhaftenden Eismasse zur Bestimmung der wahren Eismasse am Ende der Entzugsphase.



Abbildung 2-137: Kraftsensoren zur kontinuierlichen, indirekten Bestimmung der Eismasse (links) während der Entzugsphase und Kranwaage zur Bestimmung der wahren Eismasse am Ende der Entzugsphase (rechts).



Abbildung 2-138: Temperaturfühler zur Messung der Außenwandtemperatur im Bereich des Speichermantels (links) und zur Messung der Innenwandtemperatur auf der Innenseite des Speicherbodens (rechts)

Abbildung 2-139 zeigt außerhalb am Versuchsspeicher positionierte vertikale Röhren, die mit dem Versuchsspeicher verbunden sind. Der Wasserstand in den außerhalb angebrachten vertikalen Röhren zeigen somit den aktuellen Pegelstand im Versuchsspeicher an. Dadurch ist die absolute Höhe des Wasserniveaus im Versuchsspeicher während der gesamten Versuchszeit auch bei geschlossenem Deckel ersichtlich. Zusätzlich sind in den vertikalen Röhren Beladungssensoren montiert, die auf Grund ihre Geometrie nicht in den Versuchsspeicher eingebaut werden können. Die außerhalb des Eisspeichers positionierten Beladungssensoren sind der Grenzpegelsensor L, Radarwellen Sensor D, U-Schall Sensor C mit alukaschiertem PUR-Schwimmer und Abstandsmessung mit geführter Mikrowelle E (vgl. Abbildung 2-140).

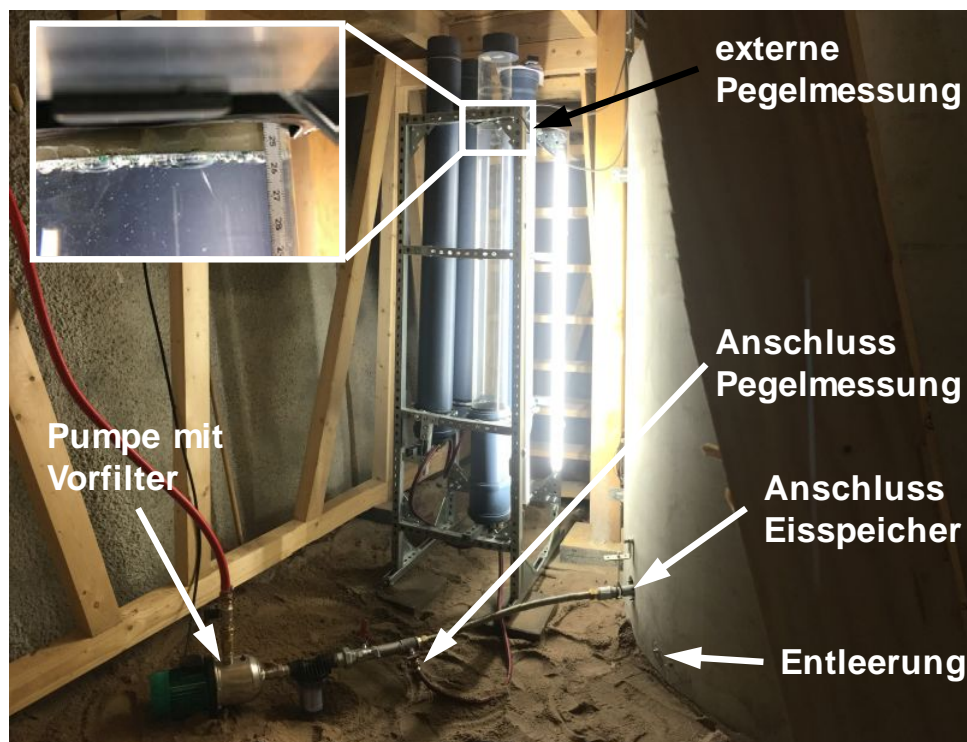


Abbildung 2-139: Vertikale Röhren zur Messung des Pegelstands mit Beladungssensoren, die außerhalb des Eisspeichers angebracht sind und Pumpe mit Vorfilter zur Entleerung des Versuchseisspeichers.

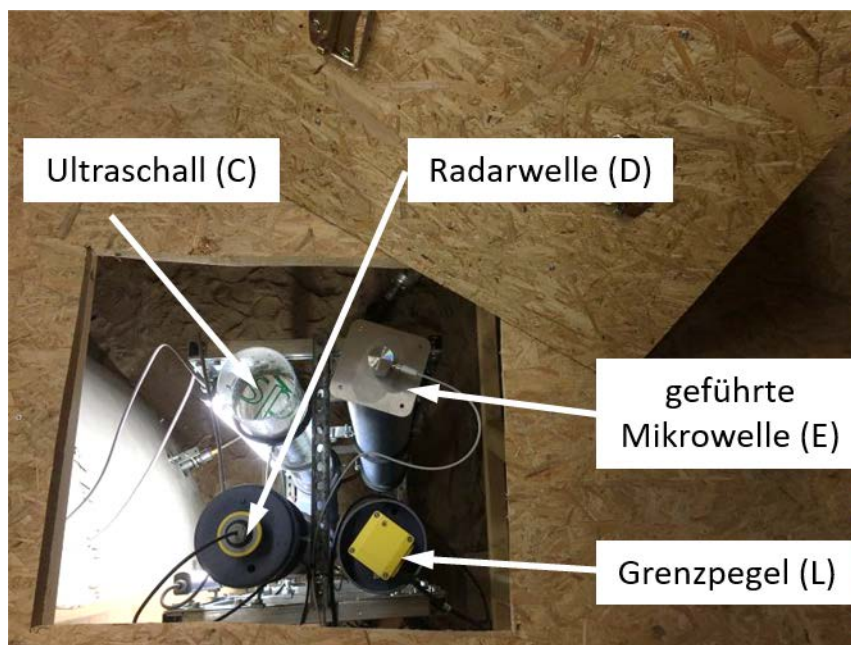


Abbildung 2-140: Beladungssensoren, die außerhalb des Eisspeichers in den vertikalen Röhren angebracht sind.

Für die Befüllung des Versuchseisspeichers war ursprünglich angedacht die zugeführte Wassermenge mit einer kalibrierten Wasseruhr (Volumenstromzähler) in Kombination mit einer Temperaturmessung zu ermitteln. Abbildung 2-141 zeigt die rechnerisch ermittelte erweiterte

Messunsicherheit $U(\dot{m})$ der kalibrierten Wasseruhr in Kombination mit einer Temperaturmessung für die Befüllung des Versuchsspeichers, sowie die daraus resultierende erweiterte Messunsicherheit $U(m_W)$ der Masse des Wassers im Versuchsspeicher (Speichermasse) in Abhängigkeit von der Wassertemperatur während des Füllvorgangs.

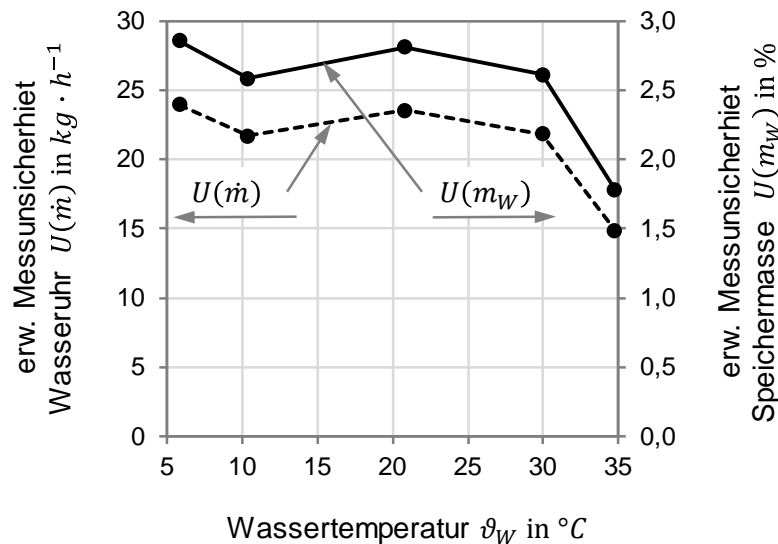


Abbildung 2-141: Erweiterte Messunsicherheit $U(\dot{m})$ der Wasseruhr in Kombination mit einer Temperaturmessung zur Befüllung des Versuchsspeichers, sowie die daraus resultierende erweiterte Messunsicherheit $U(m_W)$ der Masse des Wassers im Versuchsspeicher (Speichermasse) in Abhängigkeit von der Wassertemperatur während des Füllvorgangs.

Bei einer erweiterten Messunsicherheit $U(\dot{m})$ der kalibrierten Wasseruhr in Kombination mit einer Temperaturmessung von $U(\dot{m}) > \pm 25 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ergibt sich eine relative erweiterte Messunsicherheit der Speichermasse von $U(m_W) > \pm 2,5 \cdot 10^{-2}$ bzw. 2,5%. Um einen Beladungszustand mit einer angestrebten Genauigkeit von $U(S_{oc}) \pm 2 \cdot 10^{-2}$ bzw. 2 % zu bestimmen, ist diese relative erweiterte Messunsicherheit der Speichermasse bei der Befüllung des Versuchsspeichers mit einer kalibrierten Wasseruhr in Kombination mit einer Temperaturmessung nicht ausreichend.

Daher soll die während der Befüllung zugeführte Wassermasse nun mit einem kalibrierten Coriolis-Massenstrommessgerät ermittelt werden. Abbildung 2-142 zeigt die erweiterte Messunsicherheit $U(\dot{m})$ des kalibrierten Coriolis-Massenstrommessgeräts zur Befüllung des Versuchsspeichers, sowie die daraus resultierende erweiterte Messunsicherheit $U(m_W)$ der Masse des Wassers im Versuchsspeicher (Speichermasse) in Abhängigkeit von der Wassertemperatur während des Befüllvorgangs. Bei einer erweiterten Messunsicherheit $U(\dot{m})$ des kalibrierten Coriolis-Massenstrommessgeräts von $U(\dot{m}) > \pm 2 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ergibt sich eine relative erweiterte Messunsicherheit der Speichermasse von $U(m_W) > \pm 0,2 \cdot 10^{-2}$ bzw. 0,2 %. Um den

Beladungszustand mit einer angestrebten Genauigkeit von $U(S_{oc}) \pm 2 \cdot 10^{-2}$ bzw. 2 % zu bestimmen, ist diese relative erweiterte Messunsicherheit der Speichermasse bei der Befüllung des Versuchseisspeichers mit einer kalibrierten Coriolis-Massenstrommessgerät ausreichend.

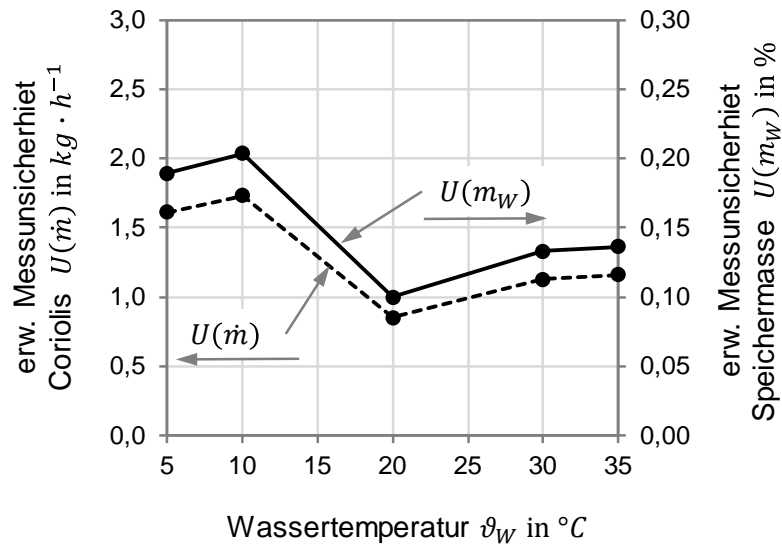


Abbildung 2-142: Erweiterte Messunsicherheit $U(\dot{m})$ des Coriolis Massendurchflussmessgeräts zur Befüllung des Versuchseisspeichers, sowie die daraus resultierende erweiterte Messunsicherheit $U(m_W)$ der Masse des Wassers im Versuchsspeicher (Speichermasse) in Abhängigkeit von der Wassertemperatur während des Füllvorgangs.

2.6.3.2 Modellierung Vereisungsvorgänge (IGTE)

Um die Vereisungsvorgänge detaillierter zu analysieren und damit auch verstehen zu können, erfolgten zusätzliche Untersuchungen mittels CFD Simulationen (Computational Fluid Dynamics). Hierfür wurde das zyklische Verhalten eines Eisspeichers mit umgebendem Erdreich mittels mit der Software Ansys Fluent untersucht. Für die Untersuchung des zyklischen Verhaltens des Eisspeichers wurde ein zur Mittelachse des Eisspeichers rotationssymmetrisches, zweidimensionales Gitternetz verwendet (vgl. Abbildung 2-143). Aufgrund dieser Symmetrie zeigen alle nachfolgenden Bilder immer nur einen halben Modelausschnitt.

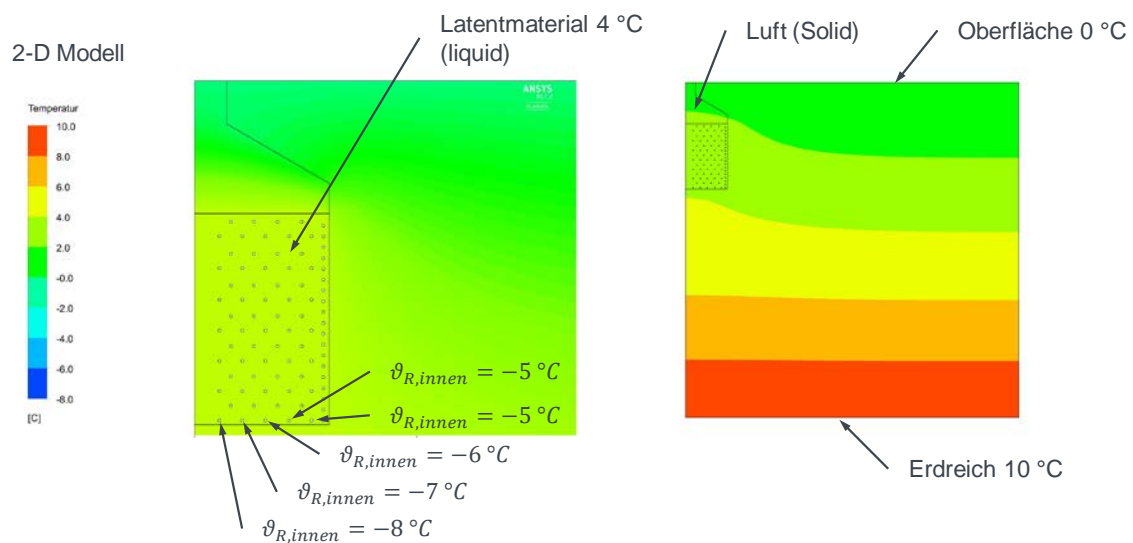


Abbildung 2-143: Ausschnitt des Simulationsmodells mit Rohren für Entzugsbetrieb und Regenerationsbetrieb sowie die Modellrandbedingungen für die Entzugsphase

Abbildung 2-144 zeigt die Temperaturverteilung im Eisspeicher und im umgebenden Erdreich, wenn eine konstante, homogene, mittlere Temperatur des Latentspeichermaterials von $\bar{\vartheta}_{latent} = 4\text{ °C}$, eine Oberflächentemperatur des Erdreiches von $\vartheta_{GOK} = 0\text{ °C}$ (GOK: Geländeoberkante) und eine Temperatur des Erdreiches in 10 m Tiefe von $\vartheta_{Erde,10m} = 10\text{ °C}$ angenommen wird. Diese Temperaturverteilung im Eisspeicher und Erdreich markiert den Anfangszustand zum Beginn der Entzugsphase (vgl. Abbildung 2-144 links). Der Entzug wird in der Simulation durch die Definition einer über die Entzugsphase konstante Rohrinnentemperatur realisiert. Abbildung 2-145 zeigt die Rohrinnentemperatur beispielhaft für die unterste Ebene des Entzugswärmeübertragers. Am Ende einer 7½-tägigen Entzugsphase hat sich die in Abbildung 2-144 Mitte dargestellte Temperaturverteilung im Eisspeicher und Erdreich eingestellt. Nach einer anschließenden 7-tägigen Stillstandsphase findet eine Homogenisierung der Temperatur im Latentspeicher statt und um den Eisspeicher wird das Erdreich durch die Wärme weiter aufliegenden Erdschichten regeneriert, siehe Abb. Abbildung 2-144 rechts. Die mittlere Temperatur des Latentspeichers hat sich nach der 7-tägigen Stillstandsphase von ca. $\bar{\vartheta}_{latent} = -4\text{ °C}$ auf ca. $\bar{\vartheta}_{latent} = -1\text{ °C}$ durch eine Homogenisierung und durch Wärmegewinne aus dem Erdreich erhöht.

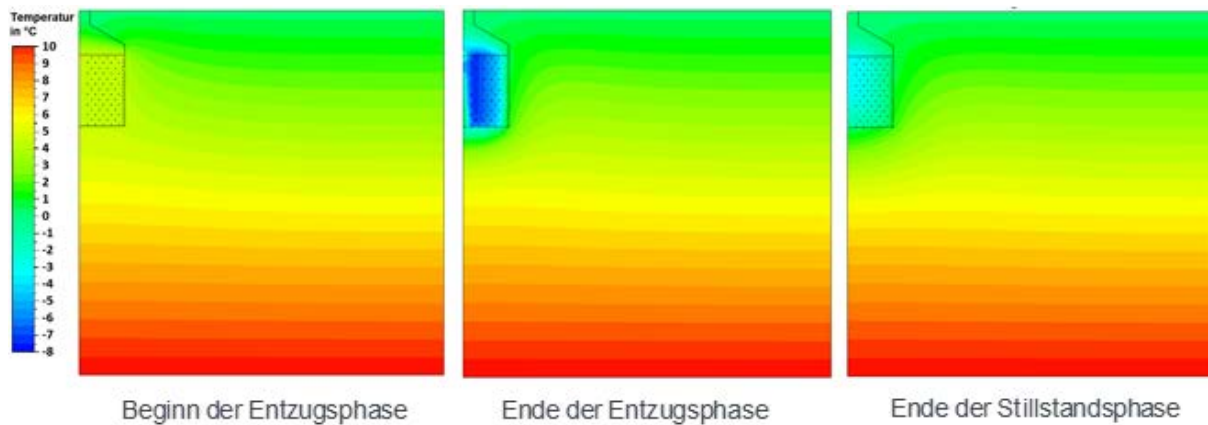


Abbildung 2-144: Erdreichtemperaturen zu Beginn der Entzugsphase, zum Ende der Entzugsphase sowie zu Ende der Stillstandsphase

Abbildung 2-145 zeigt den Eisbildungsvorgang während der 7½-tägigen Entzugsphase. Erkennbar ist, dass sich nach zwei Tagen ein Eismantel um die Rohre des Entzugswärmeübertragers gebildet hat. Im oberen und inneren Bereich des Eisspeichers ist die Dicke des Eismantels größer ausgebildet als im unteren und äußeren Bereich. Der Eismantel der untersten Rohrreihe des Entzugswärmeübertragers berührt bereits am zweiten Tag den Speicherboden. Der Eisbildungsvorgang setzt sich bis zum siebten Tag vom oberen inneren zum unteren äußeren Bereich fort. Dies ist mit der Dichteanomalie des Wassers zu erklären. Wasser weist bei ca. $\vartheta_w = 4\text{ °C}$ die höchste Dichte auf. Aufgrund von Konvektionsvorgängen strömt das kältere Wasser in den oberen Bereich des Eisspeichers und führt dadurch zu einer schnelleren Eisbildung. Zusätzlich wird das Wasser an den Speicherwänden durch die Wärmegewinne aus dem Erdreich erwärmt.

Nach der 7½-tägigen Entzugsphase erfolgte eine siebentägige Stillstandsphase. Dabei wurde die Entzugsleistung in der Simulation auf null gesetzt. Am Ende des siebten Tages (vgl. Abbildung 2-145 rechts unten) sind im Eisspeicher um die Mittelachse und an der Mantelfläche noch Bereiche mit flüssigem Wasser vorhanden.

Das flüssige Wasser im Bereich der Mittelachse gefriert bis zum Ende des neunten Tages vollständig (vgl. Abbildung 2-146 oben Mitte). Dieses „Nachgefrieren“ von flüssigem Wasser im Eisspeicher erfolgt auf Grund der Homogenisierung der Temperaturen und der in Vergleich zu Wasser relativ hohen Wärmeleitfähigkeit von Eis. Im Bereich des Mantels ist ein weiteres Eiswachstum in Abbildung 2-146 nicht zu erkennen. Allerdings ist ein geringfügiges Aufschmelzen in der unteren Ecke zwischen Mantelfläche und Boden erkennbar.

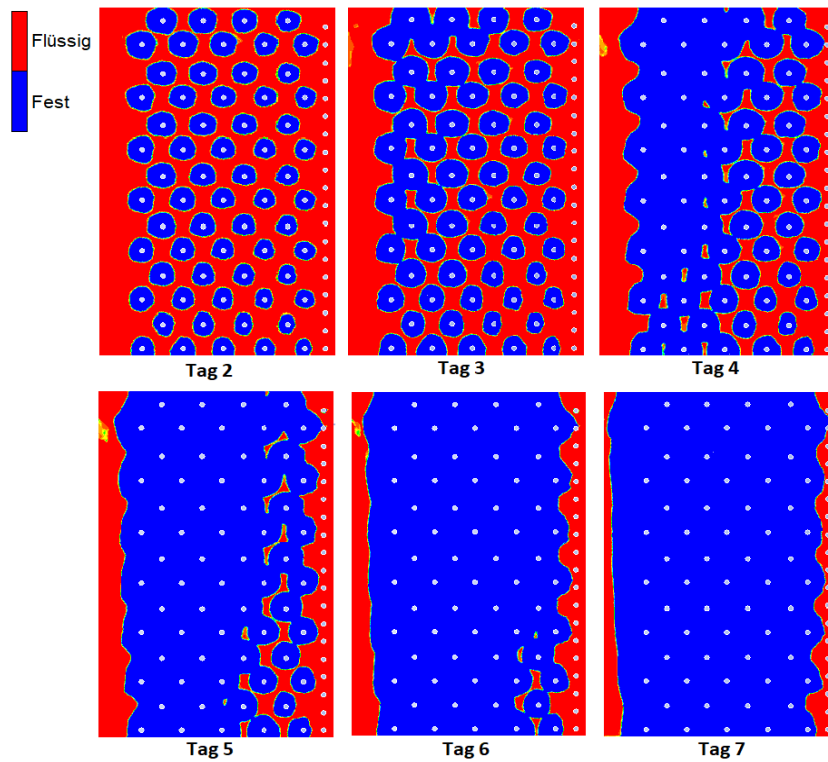


Abbildung 2-145: Eisbildungsvorgang im Eisspeicher während der 7½-tägigen Entzugsphase (rot: flüssiges Wasser, blau: festes Eis)

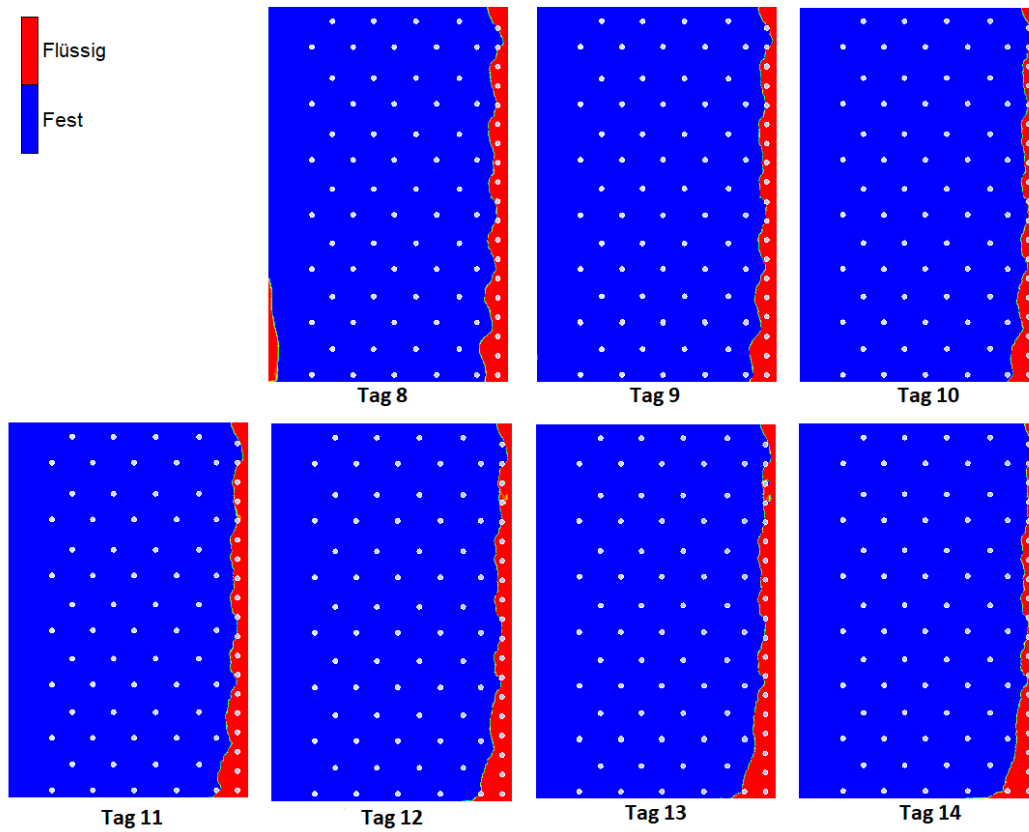


Abbildung 2-146: Eisbildungsvorgang im Eisspeicher während der siebentägigen Stillstandsphase (rot: flüssiges Wasser, blau: festes Eis)

Abbildung 2-147 zeigt den Beladungszustand (S_{oc} : State of Charge) und den Vereisungszustand während der 7½-tägigen Entzugsphase und einer anschließenden siebentägigen Stillstandsphase. Bei einer Anfangstemperatur des Wassers von ca. $\vartheta_W = 4\text{ °C}$ bildet sich unmittelbar beim Entzug Eis. Dabei sinkt die mittlere Temperatur des Latentspeichers auf ca. $\bar{\vartheta}_{latent} = 0\text{ °C}$. In dieser Phase wird sowohl fühlbare Wärme aus dem flüssigen Wasser als auch Wärme aus dem Phasenwechsel gewonnen. Der Beladungszustand ändert sich in dieser Phase von $S_{oc} = 1$ auf ca. $S_{oc} = 0,8$. Anschließend folgt eine Phase in der überwiegend latente Wärme freigesetzt wird. Dabei ist die mittlere Temperatur des Latentspeichers $\bar{\vartheta}_{latent} < 0\text{ °C}$. Gleichzeitig wird durch die Unterkühlung des Eises auch fühlbare Wärme aus dem Eis entzogen. Diese Wärmemenge ist allerdings auf Grund der geringen spez. Wärmekapazität von Eis, im Vergleich zur Schmelzenthalpie, äußerst gering. Der Entzug in der Simulation endete bei einem Beladungszustand von $S_{oc} = 0,108$ bzw. bei einem Vereisungszustand von $S_{oi} = 0,86$ (S_{oi} : State of Ice).

Während der anschließenden Stillstandsphase erhöht sich in den ersten 3½ Tagen der Vereisungszustand geringfügig auf $S_{oi} = 0,873$ und erreicht nach dem siebten Tag einen Wert von $S_{oi} = 0,867$. Das bedeutet, dass das „Nachgefrieren“ im Bereich der Mittelachse mit einem Abschmelzen im Bereich der Mantelfläche einhergeht und so die Gesamteismasse in der siebentägigen Stillstandsphase nahezu konstant bleibt. Der Beladungszustand in der siebentägigen Stillstandsphase erhöht sich auf Grund von Wärmegewinnen aus dem Erdreich über die Speicherwände von $S_{oc} = 0,108$ auf $S_{oc} = 0,123$.

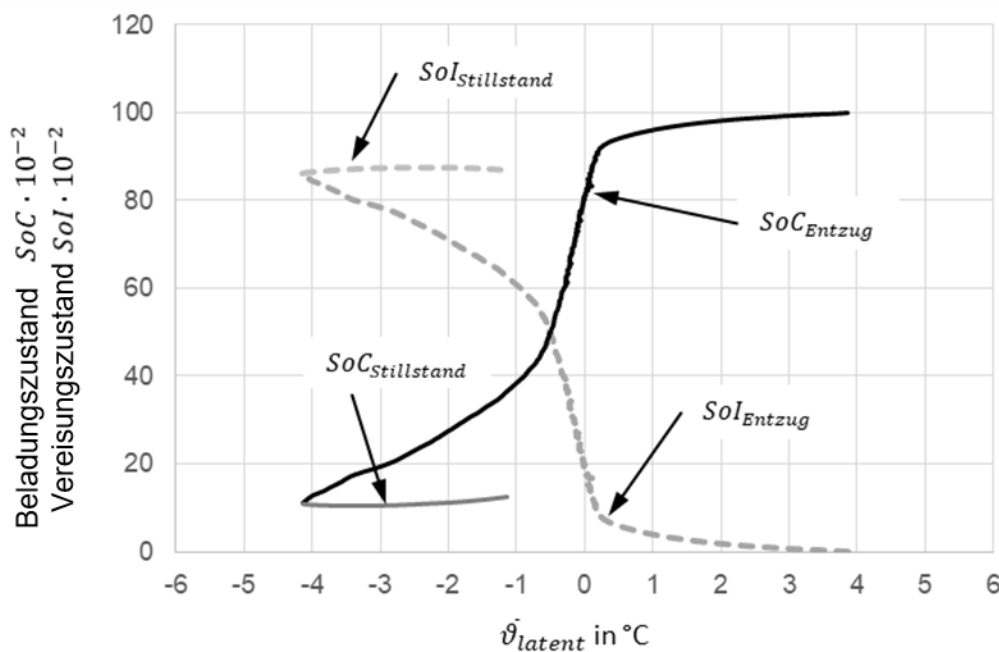


Abbildung 2-147: Beladungszustand bzw. Vereisungszustand in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur des Latentspeichers für eine 7½-tägige Entzugsphase mit einer anschließenden siebentägigen Stillstandsphase

Abbildung 2-148 zeigt den zeitlichen Verlauf des Beladungszustandes S_{oc} für die Anteile der fühlbaren und der latenten Wärme für eine 7½-tägige Entzugsphase und eine anschließende

siebtägige Stillstandsphase. Daraus ist erkennbar, dass der Anteil der fühlbaren Wärme im flüssigen Wasser und im festen Eis gegenüber der latenten Wärme auf Grund des Phasenwechsels gering ist. Der Anteil der fühlbaren Wärme im festen Eis nimmt erst bei einem Beladungszustand von $S_{oc} = 0,2$ merklich zu, bleibt aber deutlich unter $S_{oc} < 0,05$.

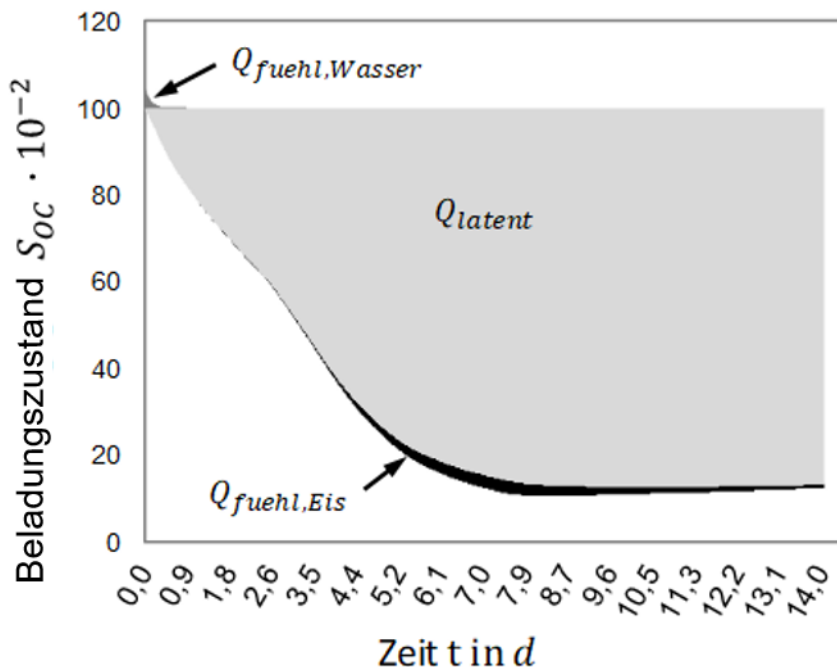


Abbildung 2-148: Zeitlicher Verlauf des Beladungszustandes für die Anteile der fühlbaren und latenten Wärme für eine 7½-tägige Entzugsphase mit einer anschließenden siebtägigen Stillstandsphase

Abbildung 2-149 zeigt den Beladungszustand S_{oc} in Abhängigkeit der Wärmegewinne aus dem Erdreich für eine 7½-tägige Entzugsphase und eine anschließende siebtägige Stillstandsphase. Am Anfang der Entzugsphase sind Wärmeverluste an das Erdreich erkennbar. Dies liegt daran, dass die Simulation mit einer konstanten mittleren Temperatur des Latentspeichermaterials von $\bar{\vartheta}_{latent} = 4\text{ °C}$ begonnen wurde. Im stationären Zustand wäre die mittlere Temperatur des Latentspeichermaterials vermutlich etwas geringer. Bei einer mittleren Temperatur des Latentspeichermaterials von $\bar{\vartheta}_{latent} = 4\text{ °C}$ ergibt sich eine Temperaturdifferenz zwischen dem Latentspeicher und dem umgebenen Erdreich und es entsteht so ein Wärmestrom vom etwas wärmeren Latentspeicher in das Erdreich.

Während der 7½-tägigen Entzugsphase steigt die Gesamtleistung der Wärmegewinne über den Speichermantel bzw. die Speicherwand auf $\dot{Q}_{W\ddot{a}nde,ges} = 480\text{ W}$, nimmt bei einem Beladungszustand von $S_{oc} = 0,6$ auf ca. $\dot{Q}_{W\ddot{a}nde,ges} = 270\text{ W}$ ab und bleibt bis zum Ende der Entzugsphase nahezu konstant (vgl. Abbildung 2-149). Die Wärmegewinne über den Boden bleiben nahezu über die gesamte Entzugsphase mit ca. $\dot{Q}_{Boden} = 100\text{ W}$ konstant.

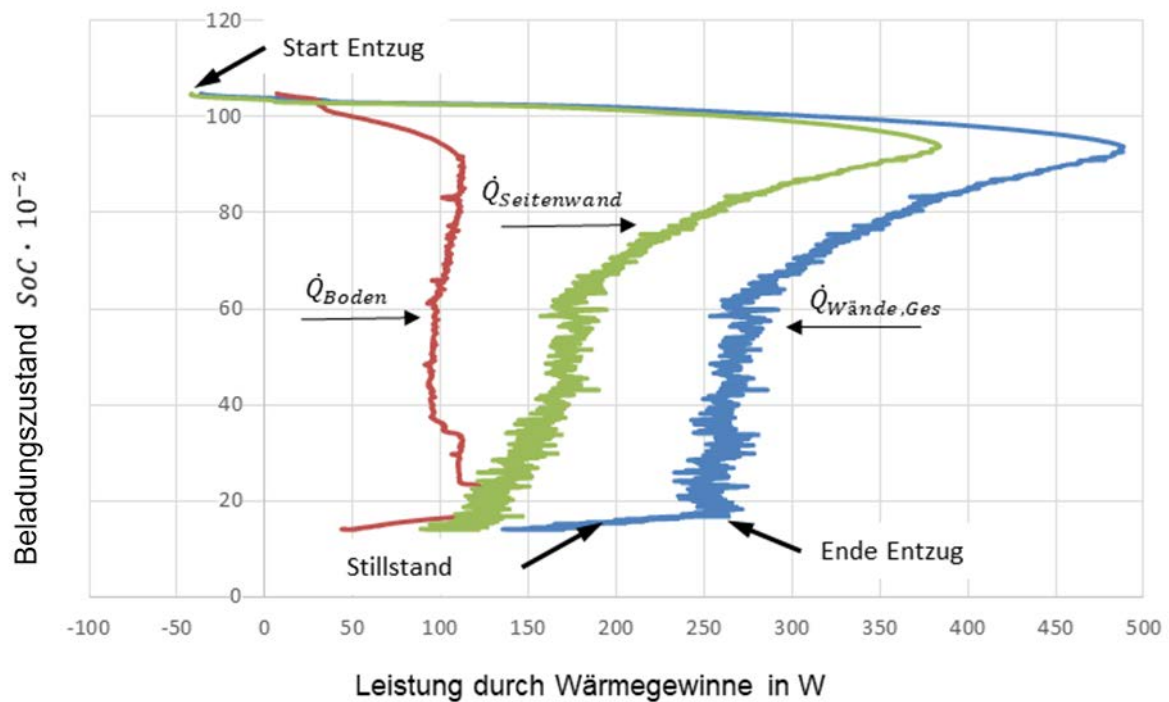


Abbildung 2-149: Beladungszustand in Abhängigkeit von der mittleren Wärmegewinne aus dem Erdreich für eine 7½-tägige Entzugsphase mit einer anschließenden siebentägigen Stillstandsphase

Durch die zuvor beschriebenen detaillierten CFD-Simulationen des Eisspeichers mit dem umgebenden Erdreich konnte der Eisbildungsvorgang, die Temperaturverteilung im Latentspeicher und im Erdreich während der 7½-tägigen Entzugsphase sowie der anschließenden siebentägigen Stillstandsphase analysiert und bildlich dargestellt werden. Anhand der Ergebnisse konnte der reale Beladungszustand in Abhängigkeit der mittleren Temperatur im Latentspeicher ermittelt werden. Des Weiteren konnten die Wärmegewinne aus dem Erdreich über die Speicherwände quantifiziert werden.

2.6.3.3 Vereisungs- und Regenerationsversuche am Versuchsspeicher

Für weitere Entwicklungen und insbesondere auch für die Prüfung der Praxistauglichkeit der neu entwickelten Beladungssensoren wurde ein Versuchseisspeicher im Realmaßstab mit einem Volumen von 12 m³ im Außenlabor des IGTE errichtet.

Der Versuchseisspeicher wurde mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, so dass mittels entsprechender Berechnungsverfahren kontinuierliche eine direkte Bestimmung des wahren Beladungszustandes sowie eine indirekte Bestimmung des Beladungszustandes erfolgen kann. Abbildung 2-150 zeigt schematische die Messanordnung am Versuchseisspeicher. In Tabelle 2-38 sind die Sensoren zur Detektion des Beladungszustandes am Versuchseisspeicher aufgeführt.

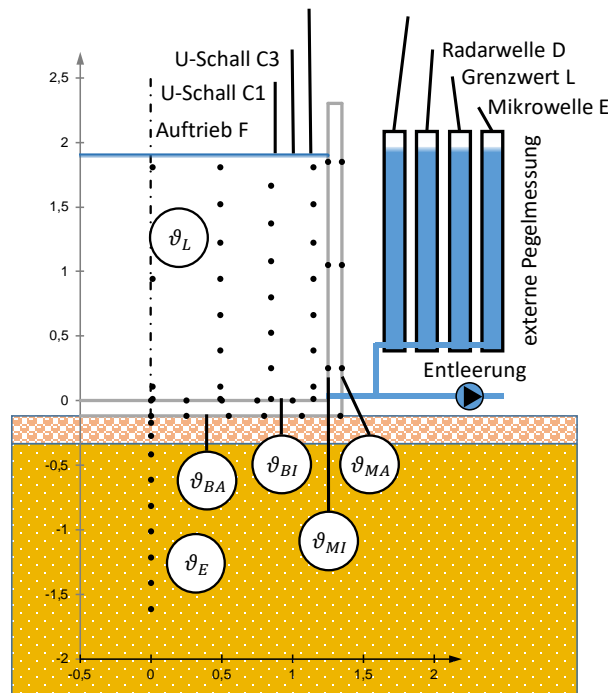


Abbildung 2-150: Messanordnung am Versuchseisspeicher: ϑ_L – Temperaturen Latentspeichermaterial, ϑ_B – Temperaturen Speicherboden, ϑ_M – Temperaturen Speichermantel ϑ_E – Temperaturen Erdreich

Tabelle 2-38: Sensorik zur Detektion des Beladungszustands am Versuchseisspeicher

Integrale Beladungssensoren (indirekte Eismassenbestimmung)
Energiebilanz: (1) (Sensor A bzw. EV10 und EV11) (2) Wärmemengenzähler (Sensor B bzw. MID3)
Pegel bzw. Füllstand: (1) U-Schall Sensor (Sensor C1, C2, C3) (2) Radarwellen Sensor (Sensor D) (3) geführte Mikrowelle (Sensor E) (4) U-Schall Sensor (Sensor G)
Auftriebskraft: (5) Wägezelle (Sensor F)
Punktuelle Sicherheitssensoren
Grenzpegelsensoren: (1) Leitfähigkeit (Sensor L) (2) Impedanz Sensor (Sensor I)
Matrix-Sensor: (3) Eigenentwicklung, derzeit im Laborversuch (Sensor M)

Die Sensoren C1 und C3 sowie Sensor G wurden innerhalb des Speichers montiert. Diese werden daher als **interne Sensoren** bezeichnet

Die Sensoren C2, G und E wurden in der externen Pegelstandmessung außerhalb des Versuchsspeichers montiert. Diese werden daher als **externe Sensoren** bezeichnet.

Der Ultraschall C3 aus der Anlage 2 (vgl. Abschnitt 2.6.2.9) wurde im Versuchseisspeicher montiert.

Insgesamt wurden 5 Versuche im Entzugsbetrieb und 1 Vorversuch in der Regenerationsphase durchgeführt. Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse des 4. Versuches im Entzugsbetrieb präsentiert.

Abbildung 2-151 zeigt den Verlauf der mit Sensoren indirekt bestimmten Eismasse während der Entzugsphase. Es ist erkennbar, dass zu Beginn der Wert der indirekt ermittelten Eismassen der internen Sensoren ähnlich sind. Der externe Sensor D (Radarwelle) und externe Sensor C2 (U-Schall) zeigen jedoch einen zeitlichen Versatz von ca. 0,75 Tagen. Die Eismasse, bestimmt durch den Sensor D (Radarwelle) und Sensor C2 (U-Schall), ist dadurch geringer als bei den anderen Sensoren. Nach ca. 2,9 Tagen wurde der Entzug gestoppt und eine Stillstandsphase wurde begonnen. Bei der Stillstandsphase wird eine Eintrittstemperatur in den Entzugswärmeübertrager von $\vartheta_{EWT,in} = -0,5 \text{ }^\circ\text{C}$ eingeregelt. Dadurch soll erreicht werden, dass beim anschließenden Abpumpen des restlichen flüssigen Wassers nach der Stillstandsphase das am Wärmeübertrager anhaftendem Eis weder abschmilzt noch, dass sich neues Eis bildet und somit die Bestimmung der wahren Eismasse möglich ist. In Abbildung 2-151 ist zu erkennen, dass für ca. 1 h nach der Entzugsphase weiterhin Eis gebildet wird. Am Tag drei des Versuches hat die Eismasse ein Maximum erreicht und nimmt dann innerhalb von 25 h um ca. $\Delta m_{Eis,F} = 217 \text{ kg}$ ab. An den Sensoren C1, C3 und dem Sensor F ist ein „Nachvereisen“ durch eine Homogenisierung der Temperatur des Eises erkennbar. Auf Grund von Wärmegewinnen über die Speicherwand beginnt die Eismasse ab dem dritten Tag wieder abzunehmen. Die mit den externen Sensoren Sensor D und Sensor C2 ermittelten Eismassen nähern sich nach ca. 3 Tagen einem Maximum von ca. 4.000 kg und bleiben über den weiteren Versuch konstant. Gegenüber den Versuchen 1 bis 3 ist dieses Verhalten nicht plausibel. Beim 5. Versuch kam es zu keiner Pegelstandsänderung bei der externen Pegelstandsmessung. Es wird daher vermutet, dass sich in dem Verbindungsstück zwischen dem Versuchseisspeicher und der externen Pegelstandsmessung eine Luftblase beim Befüllungsvorgang gebildet hat. Die Befüllung der Rohre der externen Pegelstandsmessung und des Versuchseisspeichers fand von oben statt. Da der Anschluss an den Messaufbau zur externen Pegelstandsmessung und der Anschluss an den Versuchseisspeicher unterhalb eines Rohrbogens liegen konnte sich dadurch eine Luftblase im Verbindungsrohr bilden.

Beim 6. Versuch (Regenerationsphase) wurde der Versuchseisspeicher über das Verbindungsstück befüllt und somit das Verbindungsstück zwischen externer Pegelstandsmessung und Versuchseisspeicher entlüftet. Im Verlauf der 6. Messung zeigte sich eine gleichmäßige

Änderung des Pegelstands im Versuchsspeicher und in der externen Pegelstandsmessung. Daher kann davon ausgegangen werden, dass das Verhalten der ungleichmäßigen Pegelstandsänderung im 4. und 5. Versuch durch eine Luftblase im Verbindungsstück zwischen Versuchseisspeicher und externer Pegelstandsmessung zurückzuführen ist. Daher werden die Ergebnisse der Messungen der Eismasse mit dem Sensor D und dem Sensor C2 für den 4. und 5. Versuch verworfen. Das teils fehlerhafte Messsignal des Sensors C3 aus einer Versuchsanlage konnte im Labor erst nach langen Versuchsreihen bestätigt werden.

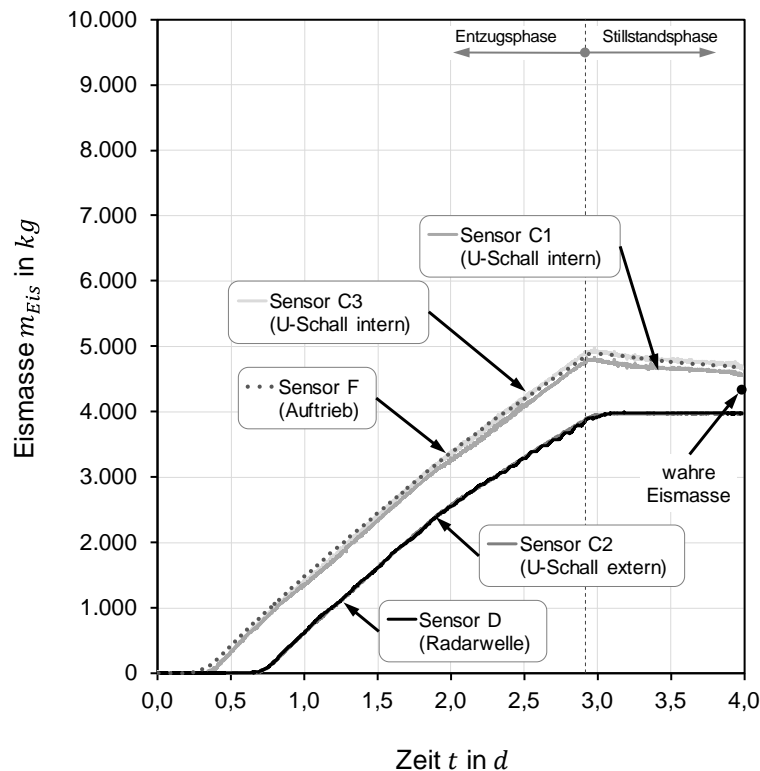


Abbildung 2-151: Verlauf der kontinuierlichen, indirekten Eismassenbestimmung mit dem Sensor F (Auftrieb), den U-Schall Sensoren C1, C2 und C3 (Pegeländerung), dem Radarwellen Sensor D (Pegeländerung) sowie mit der wahren Eismasse (Referenz) während des 4. Versuchs.

Das restliche flüssige Wasser wurde am Ende der Versuche aus dem Speicher abgepumpt und die wahre Eismasse bestimmt. Bei den Versuchen ist eine Abweichung der indirekt bestimmten Eismasse gegenüber der wahren Eismasse am Ende der Entzugsphase feststellbar. In Tabelle 2-39 sind die wahre Eismasse und die indirekt bestimmte Eismasse aufgelistet. Die Abweichung der indirekt bestimmten Eismasse könnte durch Lufteinschlüsse im Eis hervorgerufen werden.

In Abbildung 2-152 ist die aus den Versuchen ermittelte indirekte bestimmte Eismasse mit dem Sensor F (basierend auf der Auftriebskraft), den Sensoren C1 bis C3 (U-Schall, Pegelstandsänderung), der Sensoren D und G (Radarwelle, Pegelstandsänderung), sowie der Sensor E (geführte Mikrowelle, Pegelstandsänderung) am Ende der Versuche über der wahren Eismasse aufgetragen. Die mit Sensoren indirekt bestimmten Eismasse wird gegenüber der wahren Eismasse überschätzt. In Abbildung 2-152 ist ersichtlich, dass mit zunehmender Eismasse

$m_{Eis} > 4.000 \text{ kg}$ die Abweichung zwischen der mit Sensoren indirekt bestimmter Eismasse und der wahren Eismasse zunimmt. Ab einer Eismasse von ca. $m_{Eis} > 6.000 \text{ kg}$ ist die Abweichung nahezu konstant.

Tabelle 2-39: Vergleich der mittels verschiedener Beladungssensoren ermittelten Eismasse $m_{Eis,S}$ mit der wahren Eismasse $m_{Eis,R}$ (Referenz)

Versuch	wahre Eismasse [kg]	Sensor F [kg]	Sensor C1 [kg]	Sensor C2 [kg]	Sensor C3 [kg]	Sensor D [kg]	Sensor E [kg]	Sensor G [kg]
1	5.883	6.759	6.929	6.993	nicht in Betrieb	6.739	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb
2	7.703	8.489	8.505	8.555	8.574	8.167	nicht in Betrieb	nicht in Betrieb
3	3.556	3.743	3.720	3.840	3.713	3.648	3.785	3.785
4	4.324	4.673	4.567	(3.980)	4.687	(3.976)	(4.001)	4.704

$m_{Eis,F}$: Sensor F (Auftrieb)	$m_{Eis,C1}$: Sensor C1 (U-Schall – intern)
$m_{Eis,C2}$: Sensor C2 (U-Schall – extern)	$m_{Eis,C3}$: Sensor C3 (U-Schall – intern)
$m_{Eis,D}$: Sensor D (Radarwellen – extern)	$m_{Eis,G}$: Sensor G (U-Schall – intern)
$m_{Eis,E}$: Sensor E (Mikrowelle – extern)	

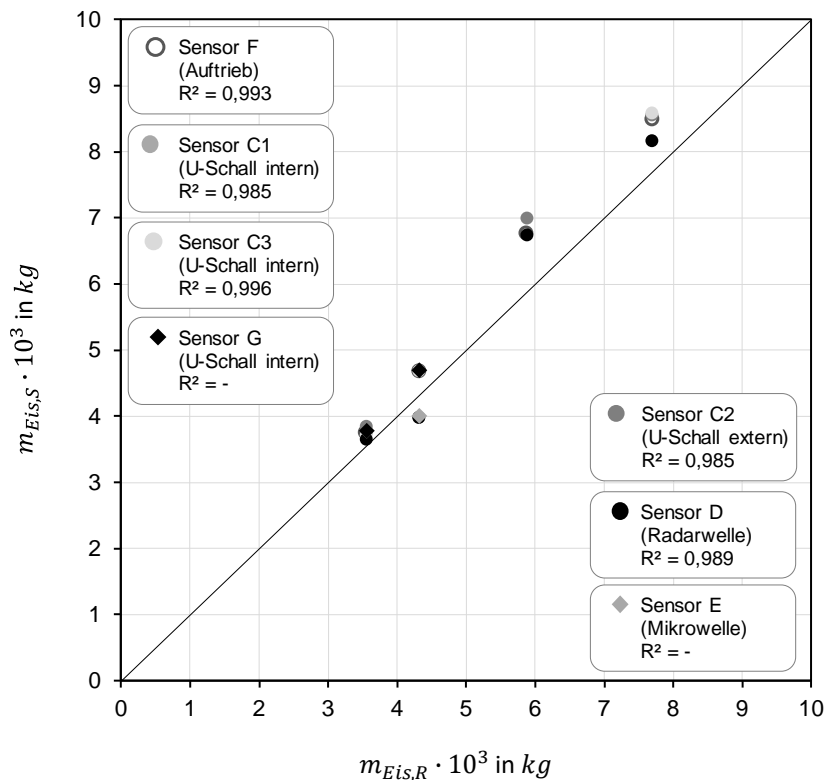


Abbildung 2-152: Eismasse bestimmt durch diverse Sensoren im Vergleich zur Referenzmessung.

Für die in Tabelle 2-39 aufgeführten Eismassen ergeben sich die in Tabelle 2-40 berechneten Genauigkeiten der Bestimmung des Beladungszustands und die erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis,S})$ von Beladungssensoren. Die geforderte Genauigkeit zur Bestimmung des Beladungszustands von $G(S_{OC}) < 2 \%$ wird nicht erreicht.

Tabelle 2-40: Ergebnisse der vollständig ausgewerteten Versuche 1 - 4: Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustands und erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis,S})$ der Beladungssensoren

	Sensor F (Auftrieb)	Sensor C1 (U-Schall)	Sensor C2 (U-Schall)	Sensor C3 (U-Schall)	Sensor D (Radar)	Sensor G (U-Schall)
Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustand $G(S_{OC})$	20 %	21 %	35 %	24 %	21 %	28 %
Anzahl Versuche N	4	4	3	3	3	2
Erweiterungsfaktor k	3,182	3,182	4,303	4,303	4,303	12,706
erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis,S})$	± 621 kg	± 674 kg	± 825 kg	± 552 kg	± 489 kg	± 2.817 kg
rel. erweiterte Messunsicherheit $W_{SVS}(m_{Eis,S})$	± 33 %	± 35 %	± 58 %	± 37 %	± 34 %	± 69 %

Sowohl bei der Auftriebskraftmessung als auch bei der Pegeländerung erfolgt die indirekte Eismassenbestimmung volumenbasiert. Infolgedessen bewirken Lufteinschlüsse im Eis eine Überschätzung der Eismasse. Für eine Korrektur der Eismasse wurde ein Luftanteil im Eis von 1 % abgeschätzt. Dadurch ergibt sich gegenüber reinem Eis eine veränderte Dichte des Eis/Luft-Gemisches. In Tabelle 2-41 ist die volumengewichtete Dichte eines Eis/Luft-Gemisches bei einem 1 % Volumenanteil von Luft im Eis angegeben.

Tabelle 2-41: Korrektur der Dichte von Eis auf Grund von Lufteinschlüssen im Eis.

Dichte von Eis ($\vartheta_{Eis} = 0 \text{ °C}$) $kg \cdot m^{-3}$	Dichte Eis/Luft-Gemisch (volumengewichtet) $kg \cdot m^{-3}$	Volumenanteil Luft im Eis %
916,67	907,9	1 %

In Abbildung 2-153 ist die mit der Dichte aus Tabelle 2-41 korrigierte indirekt bestimmte Eismasse mit dem Sensor F (basierend auf der Auftriebskraft), den Sensoren C1 bis C3 (U-Schall, Pegelstandsänderung), der Sensoren D und G (Radarwelle, Pegelstandsänderung), sowie der Sensor E (geführte Mikrowelle, Pegelstandsänderung) am Ende der Versuche über der wahren Eismasse aufgetragen. Durch die mit der Dichte korrigierten indirekt bestimmten Eismasse ergeben sich geringer Abweichungen gegenüber der wahren Eismasse.

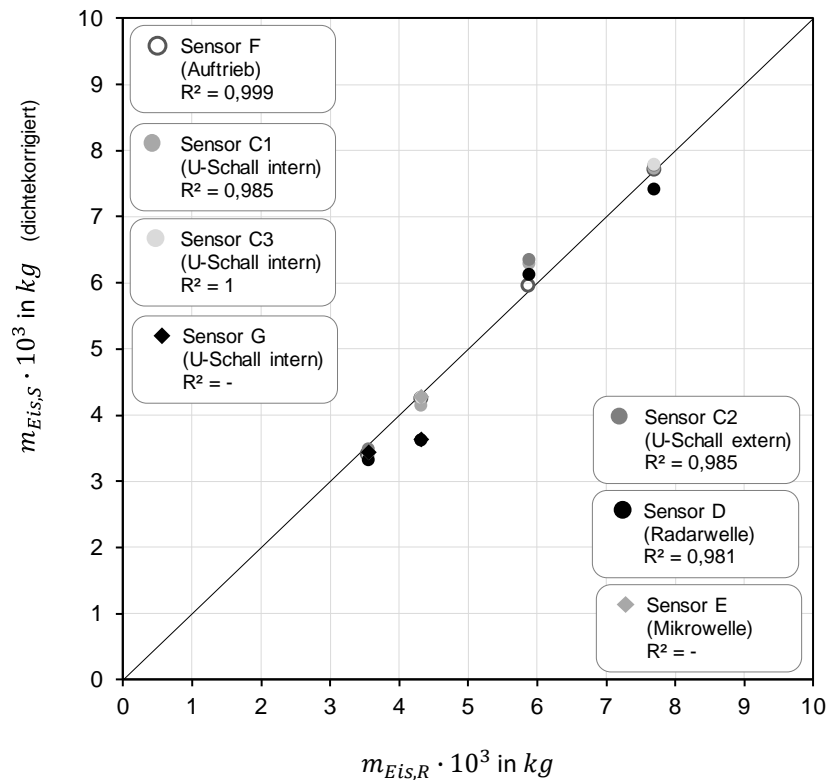


Abbildung 2-153: Eismasse bestimmt durch div. Sensoren im Vergleich zur Referenzmessung.

Für die in Tabelle 2-40 bestimmte und mit der Dichte nach Tabelle 2-41 korrigierten Eismassen ergeben sich die in Tabelle 2-42 berechnete Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustands und die erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis,S})$ von Beladungssensoren. Dabei konnte der Beladungssensor F die Eismasse mit einer Messunsicherheit von $U(S_{oC}) = \pm 275 \text{ kg}$ bestimmen. Dies entspricht eine Genauigkeit zur Bestimmung des Beladungszustand von $G(S_{oC}) = 2,8 \%$. Die U-Schall Sensoren C1 und C2 erreichen eine Genauigkeit von $G(S_{oC}) = 7,1 \%$ (Sensor C1) und $G(S_{oC}) = 12 \%$ (Sensor C2). Der Sensor C3 (U-Schall, Pegelstandsänderung) aus der Anlage 2 (vgl. Abschnitt 2.6.2.9) erreicht bei den Messungen im Versuchseisspeicher eine Genauigkeit von $G(S_{oC}) = 5 \%$. Der Sensor C3 erreicht somit von den drei eingesetzten U-Schallsensoren C1-C3 die höchste Genauigkeit zur Bestimmung des Beladungszustandes. Es ist auch zu erkennen, dass die drei Sensoren C1 – C3 eine hohe Streuung aufweisen. Der Sensor D (Radarwelle) erreicht eine Genauigkeit von $G(S_{oC}) = 9,5 \%$ und der Sensor G (U-Schall) eine Genauigkeit von $G(S_{oC}) = 7,5 \%$. Die in Tabelle Tabelle 2-42 ermittelten Ergebnisse zur Genauigkeit und zur ermittelten Messunsicherheit werden durch weitere Messungen präzisiert.

Tabelle 2-42: Ergebnisse der vollständig ausgewerteten Versuche 1 - 4: Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustands und die erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis,S})$ von Beladungssensoren, berechnet mit korrigierten Werten der indirekt bestimmten Eismasse.

	Sensor F (Auftrieb)	Sensor C1 (U-Schall)	Sensor C2 (U-Schall)	Sensor C3 (U-Schall)	Sensor D (Radar)	Sensor G (U-Schall)
Genauigkeit der Bestimmung des Beladungszustands $G(S_{OC})$	2,8 %	7,1 %	12 %	5 %	9,5 %	7,5 %
Anzahl Versuche N	4	4	3	3	3	2
Erweiterungsfaktor k	3,182	3,182	4,303	4,303	4,303	12,706
erweiterte Messunsicherheit $U_{SVS}(m_{Eis,S})$	± 275 kg	± 710 kg	± 1.191 kg	± 502 kg	± 954 kg	± 749 kg
rel. erweiterte Messunsicherheit $W_{SVS}(m_{Eis,S})$	± 7 %	± 14 %	± 21 %	± 13 %	± 19 %	± 21 %

Tabelle 2-43 zeigt die Messergebnisse aus dem 4. Versuch der Entzugsphase für die Beladungssensoren auf Basis einer Energiebilanz im Vergleich zur Referenzmessung. Bei diesem Vergleich wurde die Auswertung bisher nicht dahingehend vorgenommen, dass aus den Messergebnissen der Beladungszustand errechnet wird. Daher findet hier kein Vergleich der Ergebnisse mit der wahren Eismasse statt, wie dies bei den vorher beschriebenen Beladungssensoren auf Basis des Auftriebs und der Pegelstandsänderung der Fall ist.

In einem ersten Schritt erfolgt ein Vergleich der entzogenen Wärmemenge und der Bestimmung der Messunsicherheit des Massenstroms in Kombination mit einer Temperaturmessung, sowie die Bestimmung der Messunsicherheit der Temperaturdifferenz zwischen Eintritt und Austritt am Versuchseisspeicher. Die gemessene entzogene Energie liegt bei allen Sensoren im gleichen Bereich. Die in Vorversuchen ermittelte erweiterte Messunsicherheit der Massenstrommessung der Beladungssensoren A10 und A11 bestätigt sich in den Messungen am Versuchseisspeicher für die Entzugsphase. Der Beladungssensor A10 weist eine höher erweiterte Messunsicherheit gegenüber A11 auf. Bei A10 ist eine systematische Abweichung der Werte vorhanden. Die Werte mit der Bezeichnung A10.11 wurden aus Doppelbestimmungen mit dem und A11 bestimmt. Die aus der Doppelbestimmung resultierenden Werte des A10.11 weisen ebenfalls eine systematische Abweichung auf. Die erweiterte Messunsicherheit des Massenstroms des MID3 beträgt bei diesem 4. Versuch $U(\dot{m}_{MID2}) = \pm 52 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$. Bei diesem MID ist eine systematische Abweichung der Werte erkennbar. Der Wärmestrom ergibt sich als

Produkt aus der spezifischen Wärmekapazität, der Temperaturdifferenz, und dem Massenstrom. Daher wurde auch die Messunsicherheit der Temperaturdifferenz ermittelt. Die erweiterte Messunsicherheit der Temperaturdifferenz des A10 wurde mit $U(\Delta\vartheta_{EV10}) = \pm 0,28 K$ und des A11 mit $U(\Delta\vartheta_{EV11}) = \pm 0,34 K$ bestimmt. Die Erfassung der Temperatur des Beladungssensors MID3 mit einem Wärmemengenzähler (WMZ) war auf Grund von Kommunikationsproblemen zwischen Messwerterfassung und WMZ nicht möglich. Das Messsignal der Volumenstrommessung wurde direkt an den Messwertumformer des MID3 übertragen und ist somit verfügbar.

Tabelle 2-43: Vergleich der mittels verschiedener Beladungssensoren ermittelten entzogenen Wärmemenge und der erweiterten Messunsicherheit der Massenstrommessung sowie der Temperaturdifferenzmessung.

	Einheit	MID-Ref.	A10	A11	A10.11	MID 3
Entzogene Wärme	<i>kWh</i>	535	521	528	525	523
Massenstrom						
abs. erweiterte Messunsicherheit	<i>kg · h⁻¹</i>	± 21	± 47	± 15	± 35	± 52
rel. erweiterte Messunsicherheit	%	± 6,7	± 3,6	± 1,1	± 2,7	± 3,9
systematische Abweichung	-	nein	ja	nein	Ja	ja
Temperaturdifferenz Eintritt / Austritt						
abs. erweiterte Messunsicherheit	<i>K</i>	nicht bestimmbar	± 0,28	± 0,34	± 0,06	nicht in Betrieb
rel. erweiterte Messunsicherheit	%	nicht bestimmbar	± 5,2	± 5,8	± 0,91	nicht in Betrieb
systematische Abweichung	-	nicht bestimmbar	nein	ja	Ja	nicht in Betrieb

Abbildung 2-154 zeigt die Position der im Versuchseisspeicher sowie unterhalb des Versuchseisspeichers installierten Temperaturfühler und deren Bezeichnung.

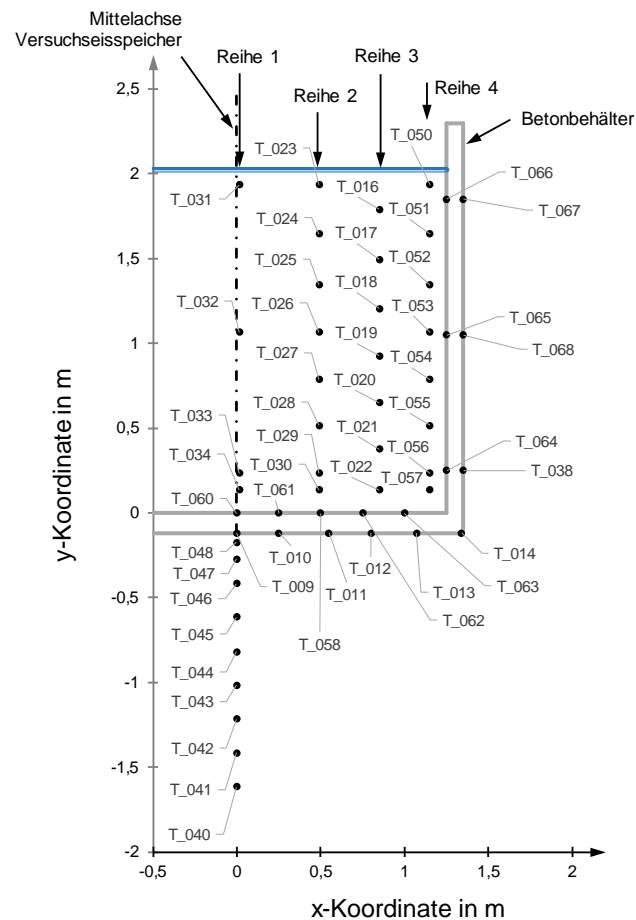


Abbildung 2-154: Position der im und unterhalb des Versuchseisspeichers installierten Temperaturfühler und deren Bezeichnung.

Abbildung 2-155 zeigt den Verlauf der Temperatur im Versuchseisspeicher in der Reihe 1 (vgl. Abbildung 2-154). Von einer anfänglichen Temperatur größer als $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ fallen die Temperaturen an den Messfühlern T_031 bis T_033 nach wenigen Stunden auf eine Temperatur von $\vartheta_{\text{Latent}} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab. Die Verläufe der Temperaturen an der Messstelle T_031 (Speicher oben) und T_034 (Speicher unten) zeigen den Effekt der Dichteanomalie des Wassers. Wasser mit einer Temperatur von $\vartheta = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ besitzt eine höhere Dichte als Wasser bei einer Temperatur von $\vartheta = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. An der Position von T_034 wird am Anfang des Versuches eine Wassertemperatur von größer als $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ gemessen. Nach wenigen Stunden fällt die Temperatur an der Position T_034 auf eine Temperatur von $\vartheta_{T_034} = 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab und verhartet dort für einige Stunden bis diese dann auf ca. $\vartheta_{T_034} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ weiter abfällt. Der im oberen Bereich des Speichers positionierte Messfühler T_031 erreicht als erstes eine Temperatur von ca. $\vartheta_{T_031} = 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Da Wasser mit einer Temperatur von $\vartheta < 4\text{ }^{\circ}\text{C}$ eine geringere Dichte besitzt, strömt dieses in den oberen Bereich des Speichers. In dem 4. Versuch erreicht das Wasser in der Mitte des Speichers (Reihe 1) keine Temperatur von $\vartheta_{\text{Latent}} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und es ist davon auszugehen, dass der Bereich während der gesamten Entzugsphase eisfrei bleibt. Dies konnte durch eine visuelle Beobachtung bestätigt werden.

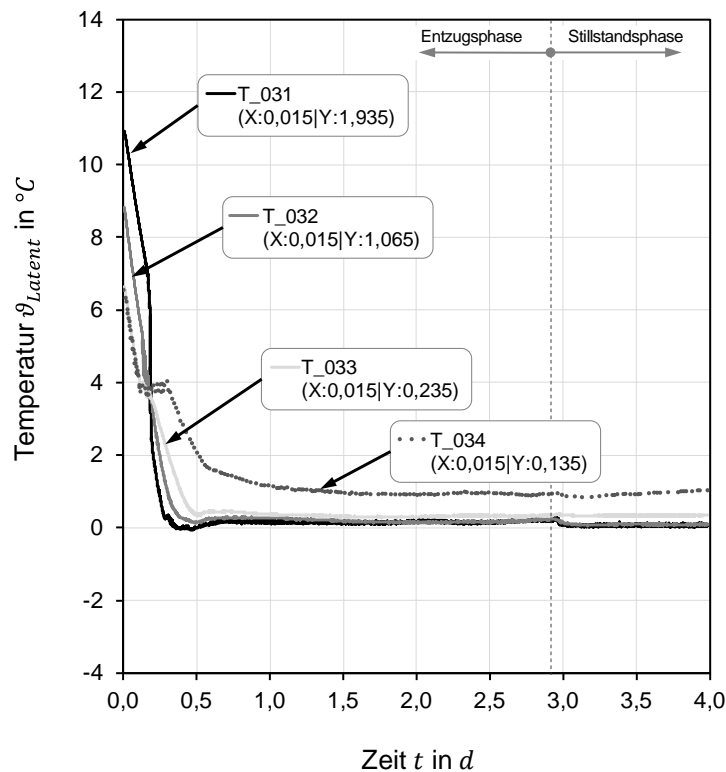


Abbildung 2-155: Verlauf der Temperaturen im Versuchseisspeicher an der Position von Reihe 1 (X: x-Koordinate in m | Y: y-Koordinate in m).

Die Abbildung 2-156 zeigt den Verlauf der Temperaturen im Versuchseisspeicher in der Reihe 2 (vgl. Abbildung 2-154). Von einer anfänglichen Temperatur größer $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ fallen die Temperaturen an den Messfühlern T_023 bis T_028 nach wenigen Stunden auf eine Temperatur von $\vartheta_{Latent} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nach ca. 1,5 Tagen erreichen die Temperaturen an den Messfühlern T_023 bis T_028 eine Temperatur von $\vartheta_{Latent} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ und es ist mit Eisbildung in diesem Bereich zu rechnen. Die Temperaturen am Messfühler T_029 stagniert nach etwa einem halben Tag bei $\vartheta_{Latent} \sim 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Erst gegen Ende der Entzugsphase sinkt die Temperatur an dem Messfühler T_029 auf $\vartheta_{Latent} \sim 0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Vermutlich erreichte die Eisgrenze zu diesem Zeitpunkt den Messfühler T_029. Die Temperatur am Messfühler T_030 stagniert über die gesamte Versuchszeit bei ca. $\vartheta_{Latent} = 1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nach ca. 2,9 Tagen wird der Entzug gestoppt und eine Stillstandsphase wurde begonnen. Bei der Stillstandsphase wurde eine Eintrittstemperatur in den Entzugswärmeübertrager von $\vartheta_{EWT,in} = -0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ eingeregelt. Dadurch sollte erreicht werden, dass beim anschließenden Abpumpen des restlichen flüssigen Wassers nach der Stillstandsphase das am Wärmeübertrager anhaftendem Eis weder abschmilzt noch, dass sich neues Eis bildet und so die Bestimmung der wahren Eismasse möglich ist. In Abbildung 2-156 ist zu erkennen, dass für ca. 1 h nach der Entzugsphase weiterhin Eis gebildet wird. Am Tag drei des Versuches hat die Eismasse ein Maximum erreicht und nimmt innerhalb von 25 h um ca. $\Delta m_{Eis,F} = 217\text{ kg}$ ab. Eis besitzt eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{Eis} = 2,1\text{ W} \cdot (\text{K} \cdot \text{m})$ gegenüber flüssigem Wasser mit $\lambda_{flüssig} = 0,56\text{ W} \cdot (\text{K} \cdot \text{m})$. Die eingestellte Eintrittstemperatur in den Entzugswärmeübertrager von $\vartheta_{EWT,in} = -0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, das

Nachvereisen und die relativ hohe Wärmeleitfähigkeit von Eis bewirken eine Homogenisierung der Temperatur im Eis innerhalb weniger Minuten.

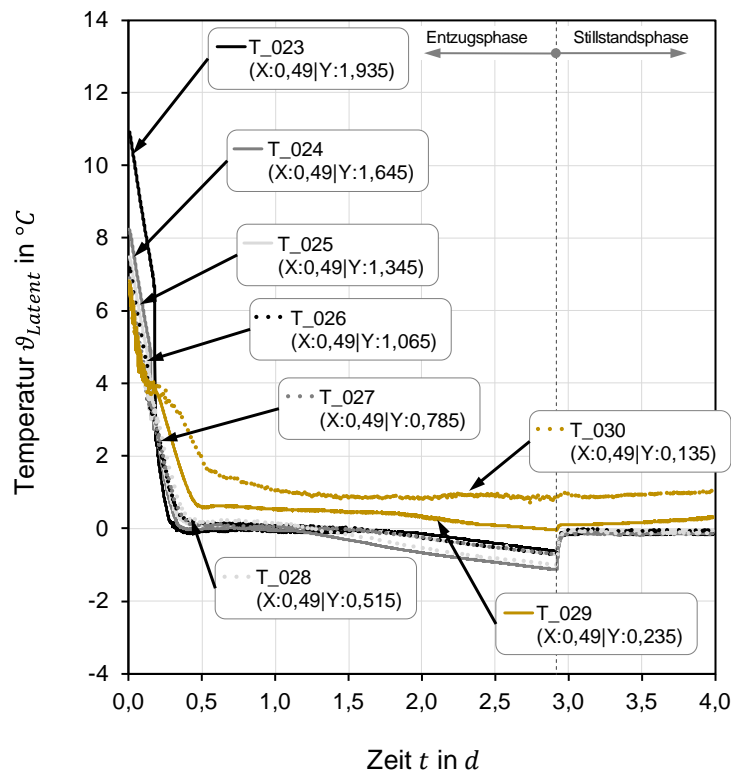


Abbildung 2-156: Links: Verlauf der Temperaturen im Versuchseisspeicher an der Position Reihe 2 (X: x-Koordinate in m | Y: y-Koordinate in m).

Die Abbildung 2-157 zeigt den Verlauf der Temperaturen im Versuchseisspeicher in der Reihe 3 (vgl. Abbildung 2-154). Von einer anfänglichen Temperatur größer 6 °C fallen die Temperaturen an den Messfühlern T_016 bis T_021 nach wenigen Stunden auf eine Temperatur von $\vartheta_{Latent} \sim 0\text{ °C}$. Nach ca. 2,5 Tagen erreichen die Temperaturen an den Messfühlern T_020 und T_017 eine Temperatur von $\vartheta_{Latent} < 0\text{ °C}$ und es ist mit Eisbildung in diesem Bereich zu rechnen. Wird der Entzug gestoppt ist innerhalb ca. einer Stunde eine Homogenisierung der Temperatur an den Messfühlern T_020 und T_017 im Eis feststellbar. Die Temperatur des Wassers im Bereich des Messfühlers T_022 (Speicher unten) erreicht bis zum Ende der Entzugsphase eine Temperatur von ca. $\vartheta_{Latent} = 1\text{ °C}$. Anschließend steigt die Temperatur auf ca. $\vartheta_{Latent} = 2\text{ °C}$ was auf Wärmegewinne über den Speichermantel und den Speicherboden zurückzuführen ist.

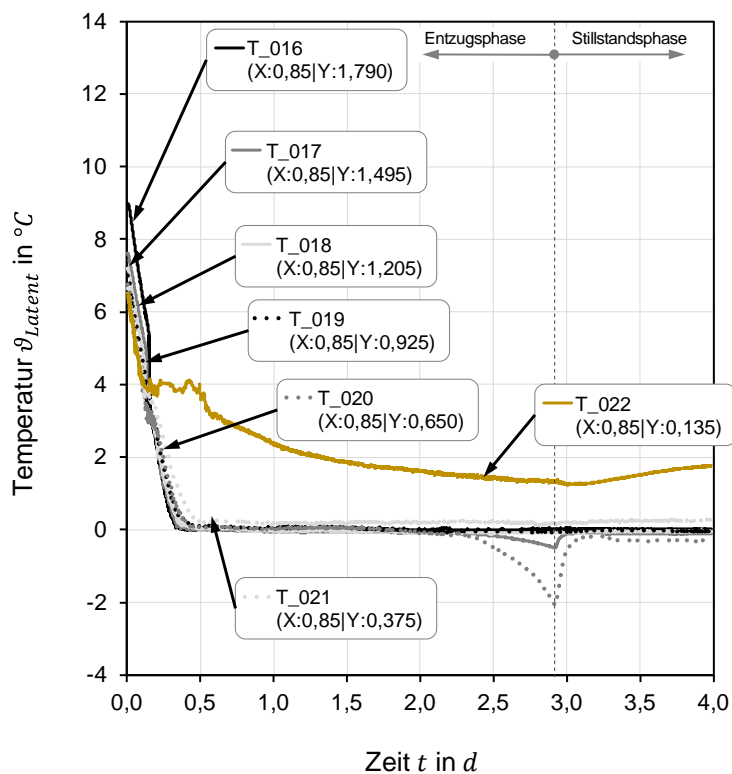


Abbildung 2-157: Links: Verlauf der Temperaturen im Versuchseisspeicher an der Position Reihe 3 (X: x-Koordinate in m | Y: y-Koordinate in m).

Abbildung 2-158 zeigt den Verlauf der Temperaturen im Versuchseisspeicher in der Reihe 4, also am Speicherrand im Bereich der Regenerationswärmeübertragerrohre (vgl. Abbildung 2-154). Von einer anfänglichen Temperatur größer $6^{\circ}C$ fallen die Temperaturen an den Messfühlern T_050 bis T_056 nach wenigen Stunden auf eine Temperatur von $\vartheta_{Latent} \sim 0^{\circ}C$. Nach ca. 2,5 Tagen erreichen die Temperaturen an den Messfühlern T_051 und T_053 eine Temperatur von $\vartheta_{Latent} < 0^{\circ}C$ und es ist mit Eisbildung in diesem Bereich zu rechnen. In diesem Bereich werden Rohrleitungen des Entzugswärmeübertragers vom oberen in den unteren Bereich des Speichers geführt. Wird der Entzug gestoppt ist innerhalb weniger Minuten eine Homogenisierung der Temperatur an den Messfühlern T_051 und T_053 im Eis feststellbar. Die Temperatur des Wassers im Bereich des Messfühlers T_057 (Speicher unten) erreicht bis zum Ende der Entzugsphase eine Temperatur von ca. $\vartheta_{Latent} = 0,5^{\circ}C$ und steigt am Ende des Versuches auf eine Temperatur von ca. $\vartheta_{Latent} = 1^{\circ}C$. Der Verlauf der Temperaturen im Versuchseisspeicher zeigt die inhomogene Eisbildung im Eisspeicher, was auch visuell bestätigt werden konnte. Durch den konstruktiven Aufbau des Entzugswärmeübertragers im Versuchseisspeicher ergeben sich Bereiche mit starker Eisbildung, vor allem im Bereich der Speicherwand. Um eine Zerstörung des Speichers zu verhindern, z. B. auf Grund von starker Eisbildung im Bereich der Speicherwand und zur effektiven Ausnutzung des gesamten Speichervolumens wird empfohlen die Geometrie des Entzugswärmeübertragers entsprechend zu optimieren.

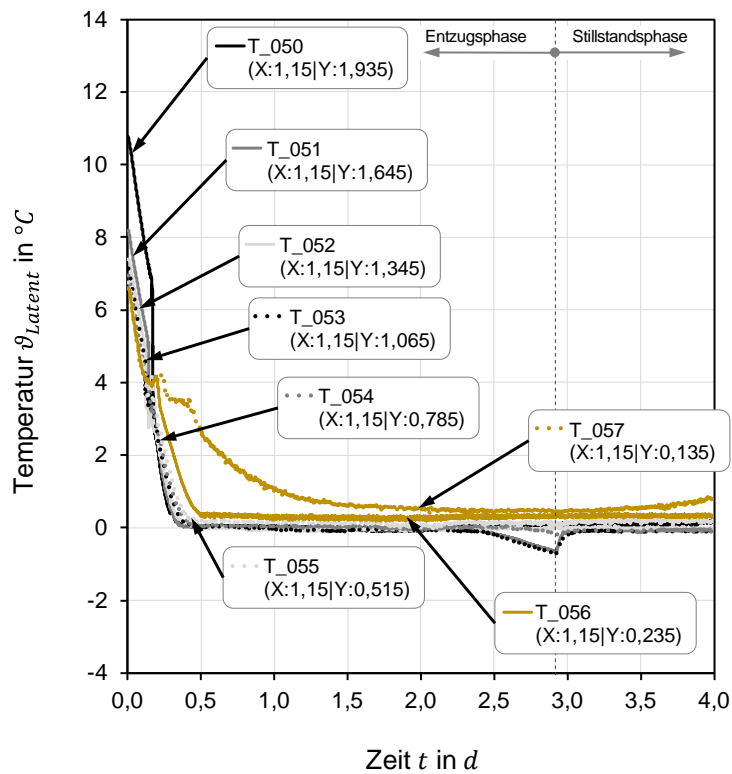


Abbildung 2-158: Links: Verlauf der Temperaturen im Versuchseisspeicher an der Position Reihe 4 (Speicherrand im Bereich des Regenerationswärmeübertragerrohre) (X: x-Koordinate in m | Y: y-Koordinate in m).

Die Abbildung 2-159 zeigt den Verlauf der Temperaturen im Erdreich unter der Mitte des Versuchseisspeichers. Die Position der Messfühler ist in Abbildung 2-154 erkennbar. Das Erdreich weist zu Beginn der Entzugsphase in einer Tiefe von 175 cm (T_048) unterhalb des Speicherbodens eine Temperatur von ca. $\vartheta_{Erde} = 7\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf. Auf Grund des Wärmeentzugs kühlt das Erdreich in diesem Bereich auf ca. $\vartheta_{Erde} = 4,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab. In einer Tiefe ab 1,2 m bleibt die Erdreichtemperatur über die gesamte Versuchszeit konstant bei ca. $\vartheta_{Erde} = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

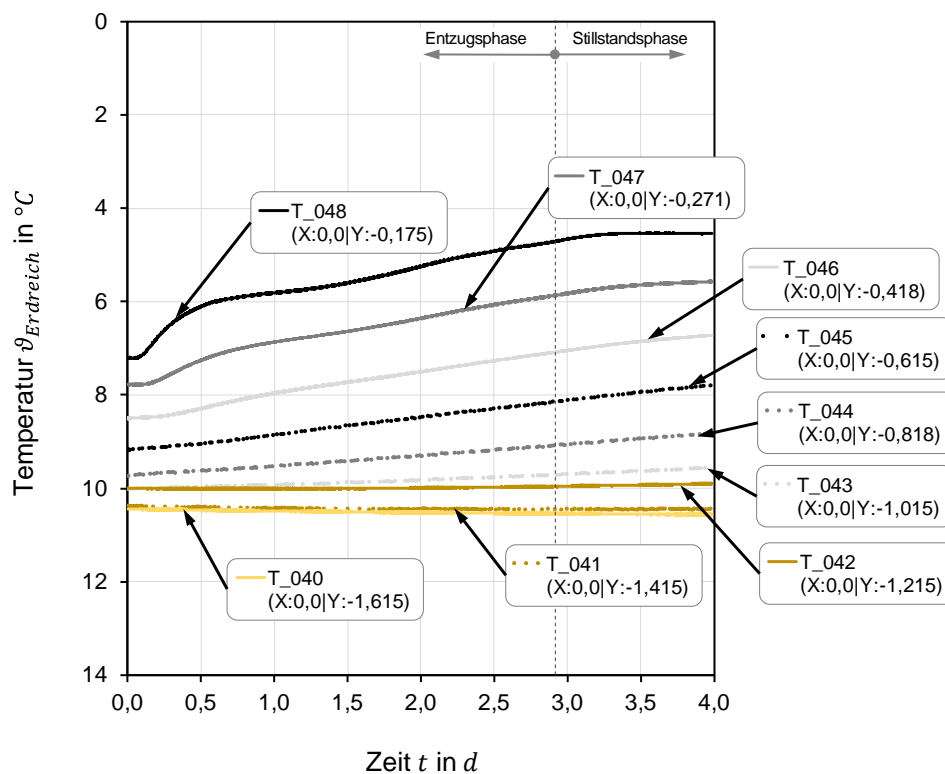


Abbildung 2-159: Verlauf der Temperaturen im Erdrreich unter der Mitte des Versuchseisspeichers (X: x-Koordinate in m | Y: y-Koordinate in m).

Fazit

Es zeigte sich in den bisherigen Versuchen, dass eine Differenz zwischen der wahren Eismasse und der über Beladungssensoren berechneten Eismasse vorhanden sind. Die Gründe hierfür sind vermutlich Luftblasen im Eis. Weitere Untersuchungen hierzu erfolgen aktuell. Die Messung der Temperaturen im Eisspeicher zeigt eine inhomogene Eisbildung. Es ist daher zu überlegen, eine entsprechende Optimierung der Geometrie des Entzugswärmeübertragers vorzunehmen, um so das Speichervolumen effizienter ausnutzen zu können und damit auch die Anlageneffizienz zu steigern. An dem Versuchseisspeicher sollen in den kommenden Monaten weitere Untersuchungen hinsichtlich der Bestimmung des Beladungszustandes und Versuche zur Ermittlung der Wärmegewinne aus dem Erdrreich über die Speicherwände und den Speicherboden durchgeführt werden.

2.6.3.4 Konditionierungsversuche

In Abschnitt 2.6.3.3 wurde das Thema der Lufteinschlüsse und die dadurch entstandenen Abweichungen zwischen der indirekt bestimmten Eismasse mit Beladungssensoren basierend auf einer Pegelstandsänderung und durch die Messung der Auftriebskraft und damit der wahren Eismasse beschrieben. Dieser Aspekt wurde im Projektverlauf detaillierter untersucht. In Abbildung 2-160 links ist das kristallklare Eis am Beginn der Entzugsphase ohne eingeschlossene Luftblasen im Eis erkennbar. Abbildung 2-160 rechts zeigt das mit Luftblasen durchsetzte Eis am Ende der Entzugsphase.

Nach Aussagen der Eisspeicherspezialisten der Fa. VCS sind derartige Lufteinschlüsse in Eisspeichern, welche mehrere Be- und Entladezyklen durchlaufen haben, nicht mehr in erkennbarer Weise vorhanden. Bei den bisher durchgeführten Messungen mit dem Versuchseisspeicher am Außenlabor des IGTE wurde das restliche flüssige Wasser am Ende des Entladezyklus aus dem Eisspeicher abgepumpt um die wahre Eismasse mit einer Kranwaage direkt zu bestimmen.



Abbildung 2-160: links: kristallklares Eis am Anfang der Entzugsphase und rechts: mit Luftblasen durchsetztes Eis am Ende der Entzugsphase.

Anschließend wurde das aufgefangene Wasser wieder in den Eisspeicher gefüllt. Bei jeder Versuchsdurchführung wurde ein Teil des Wassers umgewälzt und dadurch unweigerlich mit Umgebungsluft angereichert. Um den Einfluss der Umwälzung des Wassers und die damit verbundene Anreicherung mit Luft zu untersuchen, wurde eine Konditionierung des Versuchseisspeichers vorgenommen. Dabei wurden mehrere Entzugs- und Regenerationszyklen ohne die Umwälzung des Speicherwassers zwischen den Zyklen durchgeführt. In Abbildung 2-161 links ist die Eisformation in Speicherwandnähe am Ende der Entzugsphase mit eingeschlossenen Luftblasen erkennbar.



Abbildung 2-161: links: Nach der Konditionierung mit Luftblasen durchsetztes Eis am Ende der Entzugsphase nach drei Zyklen. Rechts: Eisformation in Speicherwandnähe am Ende des Entzugs mit eingeschlossenen Luftblasen und flüssigen Wasser im Spalt.

Gegenüber dem Versuch vor der Konditionierung des Eisspeichers ist die Menge im Eis eingeschlossenen Luftblasen deutlich geringer. Allerdings wird der Einschluss von Luftblasen im Eis nach drei Zyklen noch nicht vollständig unterbunden. Abbildung 2-162 rechts zeigt eine Detailaufnahme der eingeschlossenen Luftblasen im Eis. Des Weiteren ist das flüssige Wasser in dem wenige Millimeter breiten Spalt zwischen Wand und Eis ersichtlich. Der Einfluss der verbliebenen Luftblasen im Eis auf den mit unterschiedlichen Verfahren ermittelten Beladungszustand wurde bei dieser Versuchsreihe der Konditionierung des Eisspeichers nicht untersucht.

Abbildung 2-162 links zeigt die Eisformation im Bereich der Speichermitte des Versuchseisspeichers zwei Tage vor der Beendigung der Entzugsphase. Der Blick ist von oben senkrecht in Richtung Speicherboden gerichtet. In diesem Bereich ist durchgängig von oben bis zum Speicherboden noch flüssiges Wasser vorhanden. Das Wasser friert in diesem Bereich erst zu einem relativ späten Zeitpunkt. Abbildung 2-162 rechts zeigt zwei Tage später den vollständig zugefroren Bereich in der Speichermitte zum Ende der Entzugsphase. Zu diesem Zeitpunkt war ein Spalt von wenigen Millimetern mit flüssigem Wasser zwischen Eis und Seitenwand vorhanden bzw. das Eis berührte an einigen Stellen bereits die Speicherwand.



Abbildung 2-162: links: Eisformation in Bereich der Speichermitte des Speichers – 2 Tage vor Beendigung des Entzugs ist noch flüssiges Wasser vorhanden. Rechts: 2 Tage später am Ende der Entzugsphase ist der Bereich in der Speichermitte vollständig zugefroren.

Das Gestell, das die Wärmeübertragerrohre im Eisspeicher trägt, wird standardmäßig auf den Speicherboden gestellt und mit Winkeln gegen Auftrieb an der Speicherseitenwand befestigt. In Abbildung 2-163 links ist erkennbar, dass die unterste Ebene der Entzugsrohre wenige Millimeter über dem Speicherboden positioniert ist. Während der Entzugsphase bildet sich ein kreisförmiger Eismantel um die Rohre des Entzugswärmeübertragers und nach kurzer Zeit erreicht das Eis den Speicherboden. Dadurch ist im unteren Bereich nach relativ kurzer Entzugszeit kein Eis bzw. Latentspeichermaterial mehr vorhanden und ein Wärmeentzug in der untersten Entzugebene erfolgt in der weiteren Entzugsphase überwiegend auf Basis von fühlbarer Wärme auf Grund der Temperaturdifferenz zwischen Eismantel und Speicherboden. Zum anderen wird vermutet, dass das Eis und der Betonboden eine Verbindung eingehen, also das Eis auf dem Speicherboden anfriert. Auf Grund der Adhäsionskraft wird dadurch die Auftriebskraft beeinflusst und somit kann es zu Fehlmessungen bei der Bestimmung des Beladungszustands mit dem Beladungssensor, der auf dem Prinzip der Auftriebskraft basiert, kommen. Daher wurde im Versuchseisspeicher für weitere Untersuchungen das Wärmeübertragergestell um 125 mm angehoben (vgl. Abbildung 2-163 rechts).



Abbildung 2-163: links: Position der untersten Ebene der Entzugsrohre im originalen Zustand bei Auslieferung durch die Fa. VCS. rechts: Position der untersten Ebene der Entzugsrohre im angehobenen Zustand im Versuchseisspeicher

Das Anheben des Wärmeübertragergestells bewirkt, dass am Ende der Entzugsphase der Eismantel, der sich um die Entzugsrohre in der unteren Ebene gebildet hat, nicht den Speicherboden berührt. In Abbildung 2-163 ist die Eisformation in Bodennähe am Ende der Entzugsphase an zwei unterschiedlichen Positionen sichtbar. Der Abstand zwischen Eis und Speicherboden beträgt ca. 30 – 40 mm. Die beiden Bilder in Abbildung 2-164 wurden im zweiten Entladezyklus der Konditionierung aufgenommen. Es ist zu erkennen, dass in der unteren Stirnseite des Eiszylinders Luftblasen im Eis eingeschlossen sind. Gegenüber der oberen Stirnseite des Eises sieht es so aus, dass ein Einschluss von Luftblasen im Eis im Bereich der unteren Stirnseite verstärkt auftritt. Dieser Effekt bestätigt sich in Abbildung 2-164 links in der Aufnahme der Eisbildung in der Ecke zwischen Speicherboden und Seitenwand. Im linken oberen Bereich der Aufnahme ist der Blick auf die untere Stirnseite des Eises gerichtet und das Eis ist dort milchig trüb was auf viele Lufteinschlüsse hindeutet. Im rechten oberen Bereich der Aufnahme ist das Eis nahezu kristallklar und es ist möglich in das Eis hineinzublicken. Dabei sind die Rohre des Entzugswärmeübertragers im Eis gut zu erkennen. Es scheint, als ob der Effekt des verstärkten Luftblaseneinschlusses an der Mantelfläche nicht auftritt. Abbildung 2-164 rechts zeigt das Eis in der Nähe der Seitenwand. Der Kamerakopf für diese Aufnahme wurde zwischen der Seitenwand des Speichers und den Regenerationsrohren positioniert. Der Spalt ist in diesem Bereich ca. 40 mm breit. Der Eismantel um die Entzugsrohre hat zu diesem Zeitpunkt der Entzugsphase die Rohre des Regenerationswärmeübertragers nahezu umschlossen. Die Eisgrenze schließt relativ gleichmäßig mit den Rohren des Regenerationswärmeübertragers ab.

Des Weiteren ist in Abbildung 2-164 rechts erkennbar, dass relativ wenige Lufteinschlüsse im Bereich des Eismantels vorhanden sind. Der Einfluss der eingeschlossenen Luftblasen im Eis im Bereich des Speicherbodens auf den ermittelten Beladungszustand wurde bei dieser Versuchsreihe der Konditionierung des Eisspeichers nicht untersucht.



Abbildung 2-164: Eisbildung mit eingeschlossenen Luftblasen in Bodennähe am Ende der Entzugsphase



Abbildung 2-165: links: Eisbildung in der Ecke von Speicherboden und Seitenwand; rechts: Eisbildung in Wandnähe am Ende der 3. Entzugsphase.

Die Abbildung 2-166 zeigt die Eisformation in Bodennähe während der 1. (links), 2. (Mitte) und 3. (rechts) Regenerationsphase bei der Versuchsreihe zur Konditionierung des Eisspeichers. Dabei konnte beobachtet werden, dass gegenüber dem Eis im oberen und mittleren Bereich das Eis in Bodennähe relativ lange vorhanden ist. Bei einer erneuten Entzugsphase, bei der das Eis in der unteren Ebene der Entzugsrohre noch nicht vollständig geschmolzen ist, wird infolgedessen, ausgehend von dem vorhandenen Eis, weiter Eis gebildet. In Abbildung 2-167 links ist der Effekt, dass sich das Eis in einer nachfolgenden Entzugsphase weiter ausgebildet, erkennbar. Obwohl die Regenerationsphase in der Aufnahme bereits relativ weit fortgeschritten war, berührt die Eisformation immer noch den Speicherboden.

Abbildung 2-167 rechts zeigt das relativ gleichmäßige abschmelzen der Mantelfläche des Eises während der 3. Regenerationsphase der Versuchsreihe zur Konditionierung des Eisspeichers. Des Weiteren ist in dieser Abbildung erkennbar, dass das Eis in diesem Bereich relativ wenige Lufteinschlüsse aufweist.



Abbildung 2-166: links: Eisformation in Bodennähe bei 1. Regeneration; Mitte: Eisformation in Bodennähe bei 2. Regeneration; rechts: Eisformation in Bodennähe bei 3. Regeneration – zu sehen ist hier eine Eisplatte zwischen der untersten Ebene der Rohre des Entzugswärmeübertragers und dem Boden.

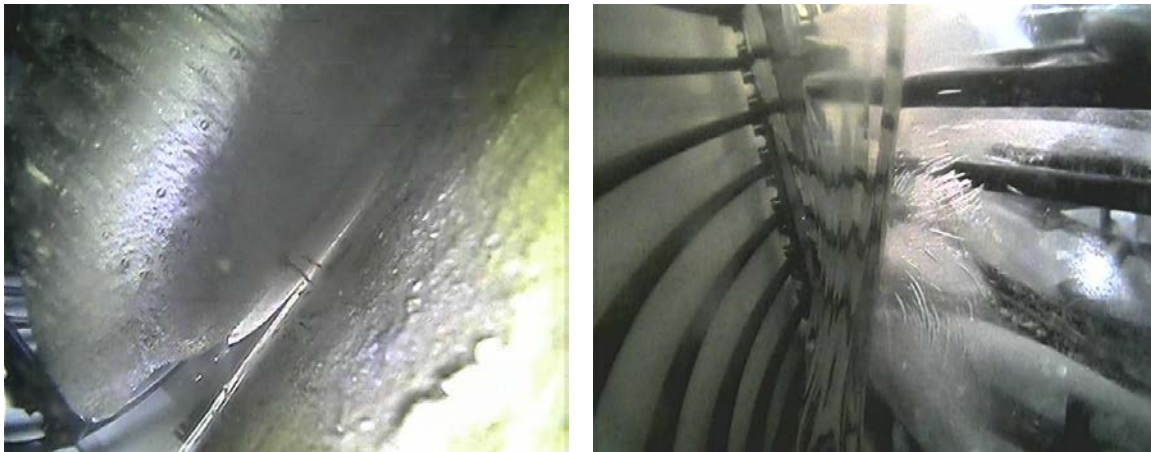


Abbildung 2-167: links: Eisformation am Boden während der 3. Regenerationsphase; rechts: Eisformation in Wandnähe während der 3. Regenerationsphase

Bei einer Messung des Pegelstands zur indirekten Bestimmung des Beladungszustands muss die Messoberfläche aus flüssigem Wasser bestehen, um die Distanz zwischen Pegelstand und Sensor richtig zu bestimmen. In der Entzugsphase ist im Wandbereich das Niveau des Wassers ausschließlich oberhalb des Eises, so dass hier zuverlässige Messungen möglich sind.

Abbildung 2-168 links zeigt jedoch eine mögliche Situation, bei der das Niveau des Wassers und das Niveau des Eises nicht übereinstimmt. Diese Situation tritt überwiegend während der Regenerationsphase auf, da im Bereich der Mantelfläche das Eis schneller schmilzt als im Zentrum des Speichers und auf Grund des Dichteunterschieds zwischen flüssigem Wasser und Eis zunächst ausschließlich der Pegel des flüssigen Wassers sinkt.

Eine andere Situation, bei der es zur Fehlmessungen mit Pegelstandsensoren kommen kann, zeigt Abbildung 2-168 rechts. In dieser Situation hat sich eine Eisbrücke gebildet. Der tatsächliche Pegelstand des flüssigen Wassers liegt jedoch deutlich unterhalb des Niveaus der Eisbrücke.

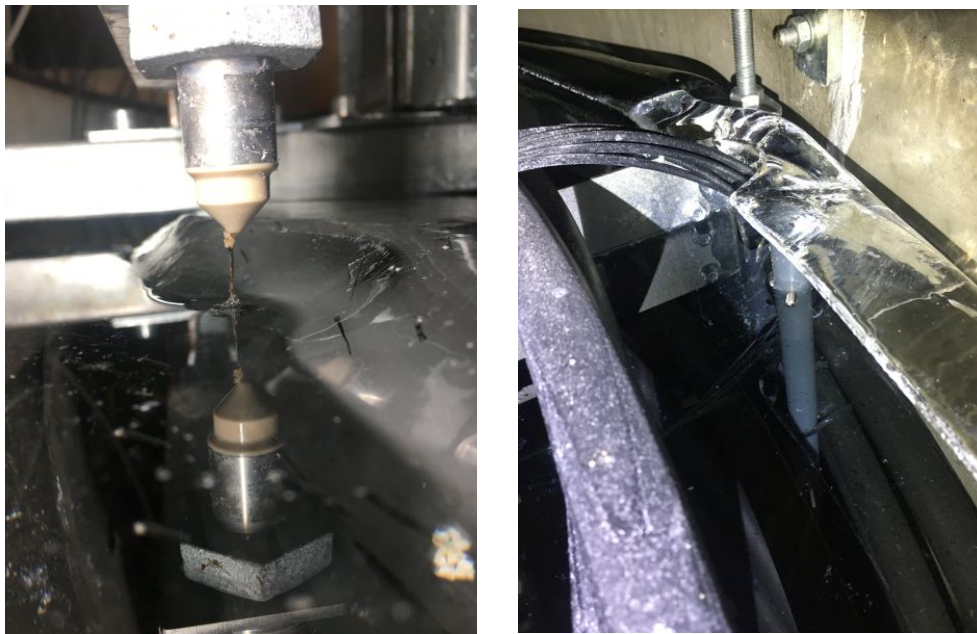


Abbildung 2-168: Mögliche Fehlmessung des Pegels auf Grund von Unterschieden zwischen dem Niveau von Wasser und Eis. links: Unterschiedliches Wasser- und Eisniveau; rechts: Bildung einer Eisbrücke

Fazit zu den Untersuchungen des Versuchseisspeichers im Außenlabor des IGTE

Durch die Beschaffung einer wasserdichten Inspektionskamera konnte erstmals die Eisformation im unteren Bereich von Eisspeichern visualisiert werden. Dadurch konnten unterschiedliche Effekte beim Betrieb eines Eisspeichers beobachtet werden. Unter anderem konnte mit der Inspektionskamera gezeigt werden, dass nach ca. drei Be- und Entladezyklen der Einschluss von Luftblasen im oberen und mittleren Bereich des Eises deutlich abnimmt. Im Bereich des Speicherbodens ist erkennbar, dass weiterhin Luftblasen im Eis eingeschlossen sind. Der Einschluss von Luftblasen im Eis ist insbesondere deshalb problematisch, da er sich – je nach angewandtem Verfahren – signifikant auf die Bestimmung des Beladungszustands auswirken kann.

Für die weiteren Untersuchungen zur Detektion des Beladungszustands mit Sensoren und zur direkten Bestimmung der wahren Eismasse im Versuchsspeicher sollte daher eine Konditionierung des Eisspeichers mit mindestens drei Be- und Entladezyklen erfolgen.

Auf Basis der Untersuchungen am Modelleisspeicher und am Versuchseisspeicher konnten folgende Optimierungsmaßnahmen identifiziert werden:

- Die untere Entzugsebene sollte ca. 125 mm oberhalb des Speicherbodens positioniert werden, um ein Festfrieren des Eises am Speicherboden zu verhindern und damit genügend Latentspeichermaterial bzw. Eis für die gesamte Entzugsphase vorhanden ist.
→ Diese Optimierung wurde am Versuchsspeicher bereits umgesetzt.
- Für eine gleichmäßige Eisbildung im Eisspeicher und um somit das Speichervolumen effizienter ausnutzen zu können und damit auch die Anlageneffizienz zu steigern,

müssen die Wärmeübertragerrohre strukturiert angeordnet und gleichmäßig im Speicher positioniert werden. Durch eine entsprechende Anordnung der Rohre des Entzugswärmeübertragers besteht ein hohes Potential für die Realisierung eines sicheren und effizienten Betriebes des Eisspeichers.

→ Ein zu geringer Abstand der Rohre des Entzugswärmeübertragers von der Speicherwand wurde am Versuchseisspeicher bei einzelnen Rohren durch ein Verspannen mit weiter innen liegenden Rohren korrigiert.

- Für eine gleichmäßigere Regeneration im Bereich des Speicherbodens wäre ein Regenerationswärmeübertrager vorteilhaft, der sich über die gesamte Speicherbodenfläche erstreckt. Durch Hinzufügen einer weiteren Rohrebene in das Gestell des Wärmeübertragers kann dies bei der Fertigung des Speichers relativ einfach realisiert werden.

→ Für diese Optimierung müsste ein neuer Wärmeübertrager für den Versuchseisspeicher angefertigt werden. Auf Grund der baulichen Gegebenheiten an dem Versuchseisspeicher im Außenlabor des IGTE ist ein Austausch des Wärmeübertragers jedoch mit sehr großen Aufwand verbunden, so dass diese Maßnahme nicht umgesetzt wurde.

- Für die Messung des Pegelstandes während der Regeneration bzw. im intermittierenden Betrieb von Entzug und Regeneration ist es von Vorteil, auch eine Ebene von Rohren des Regenerationswärmeübertragers im oberen Bereich zu platzieren, um ein einheitliches Niveau von Wasser und Eis zu gewährleisten.

→ Es sollte geprüft werden, ob die Möglichkeit besteht das Anschlussrohr des Regenerationswärmeübertragers welches sich im oberen Bereich des Eisspeichers befindet im Bereich der Pegelmessung zu positionieren.

Zum Zeitpunkt der Antragsstellung wurde davon ausgegangen, dass einige vom IGTE durchzuführende Untersuchungen bis an die Zerstörungsgrenze des Eisspeichers herangehen müssen. Die Untersuchungen sollten daher an drei Labormustern, die am IGTE aufgebaut werden sollten, durchgeführt werden. Durch die umfangreichen Messungen an den beiden Versuchsspeichern, d. h. dem Modelleisspeicher im Labor und dem Versuchseisspeicher im Außenlabor des IGTE, den Versuchsanlagen sowie die Untersuchungen der Sensoren zur Bestimmung des Beladungszustands in einer Klimakammer konnten jedoch die relevanten Fragestellungen beantwortet werden.

Einen wesentlichen Beitrag hierzu haben insbesondere auch der Aufbau eines Modelleisspeicher im Labor sowie die umfangreichen daran durchgeführten Untersuchungen geleistet (vgl. ZB 2 - 5). Diese Arbeiten waren im ursprünglichen Projektantrag nicht vorgesehen.

Zusätzlich konnte mit einer wasserdichten Inspektionskamera erstmals die Eisformation im unteren Bereich von Eisspeichern visualisiert werden. Dadurch konnten unterschiedliche Effekte beim Betrieb eines Eisspeichers beobachtet werden. Auch diese Arbeiten incl. der Beschaffung der Inspektionskamera waren ursprünglich nicht geplant.

Es wurde daher entschieden, auf den weiteren Bau von Labormustern für Versuchseisspeicher zu verzichten. Ergänzend zu den oben bereits genannten Aspekten ist hierfür auch die Tatsache ausschlaggebend, dass der Versuchseisspeicher mit deutlich mehr Messtechnik als ursprünglich geplant ausgestattet wurde und so äußerst umfangreiche und detaillierte Untersuchungen zur Bestimmung des Beladungszustands und der wahren Eismasse im Versuchseisspeicher möglich sind.

So konnte mit diesem Versuchseisspeicher z. B. durch Untersuchungen zur Be- und Entladung in Kombination mit der Bestimmung des wahren Beladungszustands und mit Hilfe der Inspektionskamera festgestellt werden, dass die exakte Bestimmung des Beladungszustands sowie die Anordnung der Rohre des Entzugswärmeübertragers im Eisspeicher eine ausgeprägte Relevanz hat, um eine Zerstörung des Speichers zu verhindern bzw. ein vollständiges Durchgefrieren zu vermeiden und um eine maximale Anlageneffizienz zu erreichen. Ausgehend von dieser Erkenntnis wurden u. a. ausgewählte Sensoren in deutlich mehr Feldanlagen (59 Anlagen) als ursprünglich geplant messtechnisch untersucht. Durch die die deutlich höhere Zahl von Sensoren in Kombination mit Speichern können bessere Aussagen über die Qualität und Einsetzbarkeit der einzelnen Messprinzipien getroffen werden, als dies an einzelnen Labormuster möglich gewesen wäre. Wie zuvor beschrieben, stellt die Bestimmung des Beladungszustands und die Zuverlässigkeit des hierfür eingesetzten Messprinzips eine große Herausforderung dar.

Durch die zuvor beschriebenen Untersuchungen konnten umfangreiche Erkenntnisse zur Bestimmung des Beladungszustands und auch im Hinblick auf die Fragestellungen zur Erfassung der wissenschaftlichen Grundlagen zum Bau und Betrieb von Latentspeichern gewonnen werden. Letztere resultieren in den diesem Abschnitt beschriebenen Optimierungsmaßnahmen und stellen wichtige Aspekte für die zukünftige Realisierung von Einspeichern dar.

Mit diesen Erkenntnissen und den identifizierten Optimierungsmaßnahmen ist offensichtlich, dass die Ziele von AP2.6 mit den umfangreichen Untersuchungen an nur einem Labormuster bzw. Versuchseisspeicher vollumfänglich erreicht werden und somit keine weiteren zwei Labormuster für Versuchseisspeicher am IGTE installiert und untersucht werden müssen.

Wie in den vorangehenden Abbildungen zu erkennen, ist durch das bildgebende Verfahren der Inspektionskamera die Eisgrenze meist deutlich zu erkennen. Im weiteren Verlauf des Vorhabens soll daher untersucht werden, ob eine digitale Auswertung der Fotografien besser als die bisher eingesetzten Messsensoren geeignet ist, um den Vereisungszustand zu bestimmen. Unabhängig davon helfen die mit der Inspektionskamera angefertigten Fotografien, um für die bisher eingesetzten Messsensoren geeignete Positionen innerhalb des Eisspeichers zu bestimmen.

2.6.3.5 Materialuntersuchungen

Ergänzend zu den im Forschungsvorhaben Sol4City hauptsächlich untersuchten Latentspeichern mit Wasser als ökologisches und preiswertes Speichermedium, mit einer hohen spezifischen Wärmekapazität, wurde der Einsatz von alternativen Phasenwechselmaterialien (engl. Phase Change Materials – PCM) mit Schmelztemperaturen zwischen + 3 °C bis + 15 °C und

dem technisch relevanten Phasenwechsel fest-flüssig untersucht. Eine schematische Darstellung dieser Untersuchung ist in Abbildung 2-169 dargestellt.

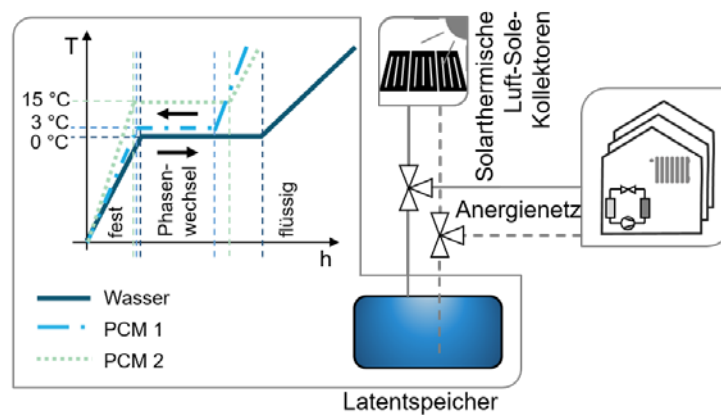


Abbildung 2-169: Schematische Darstellung der Materialuntersuchungen

Schwerpunkt der Untersuchung war es dabei, die Auswirkung der alternativen PCM im Latentspeicher auf die Effizienz des in [67] beschriebenen Gesamtsystems einer Versuchsanlage in Jahressystemsimulationen beschreiben zu können.

Dazu wurden in einem ersten Schritt mittels einer Literaturrecherche, am Markt und theoretisch verfügbare, PCM im entsprechenden Temperaturbereich identifiziert. Basis für diese Literaturrecherche war es, dass sich der Latentspeicher mit alternativem PCM sowohl im Aufbau als auch in der Betriebsweise nicht von dem Eisspeicher unterscheidet. So besteht das Behälterkonzept aus einem ungedämmten Betonbehälter mit je einem Wärmeübertrager zur Vereisung bzw. Entladung (Entzug) und einem zur Enteisung bzw. Beladung (Regeneration). Das Speichermedium umgibt die Kunststoff-Wärmeübertragerrohre, welche mit einem 33 % - Wasser-Glykol-Gemisch durchströmt werden, direkt. Ausgewählt wurden daher nur unverkapselte PCM. Die Betriebsweise des Gesamtsystems und damit des Latentspeichers basiert hauptsächlich auf Regelungsabfragen in Abhängigkeit des Beladungszustands des Latentspeichers (vgl. [67]).

Der Beladungszustand des Latentspeichers beschreibt dabei das Verhältnis der momentanen gespeicherten Wärmemenge zur gesamten speicherbaren Wärmemenge im Nutztemperaturbereich. Die speicherbare Wärmemenge und damit der Beladungszustand sind durch die thermischen Eigenschaften, spezifische Wärmekapazität und spezifische Schmelzenthalpie, des PCMs beeinflusst. Mit der Schmelzenthalpie wird dabei die latente speicherbare Wärmemenge während des Phasenwechsels bei einer idealisiert konstanten Schmelztemperatur beschrieben.

Ein Ergebnis der Literaturrecherche ist, dass die hohe speicherbare Wärmemenge von Wasser als PCM, in einer statischen Betrachtung eines Speicherzykluses von einer einmaligen Beladung von - 5 °C auf + 16 °C und unter der Annahme eines einheitlichen Latentspeichervolumens von 660 m³, nur von zwei der identifizierten PCM – Ameisensäure und Lithium-Chlorat-Trihydrat – erreicht werden kann (vgl. Abbildung 2-170). Dies ist hauptsächlich mit der ho-

hen spezifischen Schmelzenthalpie von Wasser zu begründen. Hinsichtlich der Aspekte Material- und Umweltverträglichkeit sind jedoch weder die Ameisensäure noch das Lithium-Chlorat-Trihydrat geeignete Materialien für einen erdvergrabenen, kommerziell genutzten, Latentspeicher.

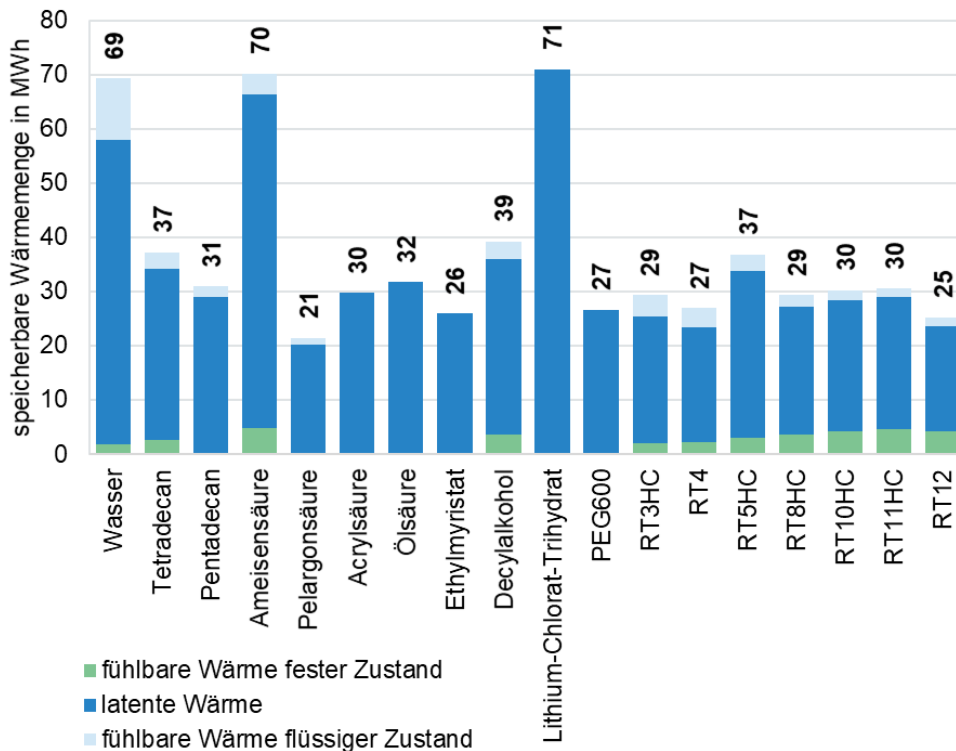


Abbildung 2-170: Speicherbare Wärmemengen in einer statischen Betrachtung eines Speicherzyklus von einer einmaligen Beladung von - 5 °C auf + 16 °C und unter der Annahme eines einheitlichen Latentspeichervolumens von 660 m³ ; RT: Hersteller Rubitherm; PEG: Polyethylenglykol; HC: Produktreihenbezeichnung für höhere Latentwärmespeicherkapazität als vergleichbares Produkt der RT-Reihe

Für einige der in Abbildung 2-170 dargestellten PCM konnten die spezifischen Wärmekapazitäten im festen und flüssigen Bereich nicht identifiziert werden. Für den Anwendungsfall im Anergienetz der Anlage 1, mit Nutzttemperaturen zwischen ca. - 5 °C und + 16 °C, ist der Anteil der latenten speicherbaren Wärme von PCM im oben genannten Schmelztemperaturbereich im Vergleich zu der fühlbaren speicherbaren Wärme dominierend. Es wird daher vermutet, dass die fühlbaren speicherbaren Wärmemengen, welche aus den nicht identifizierten, spezifischen Wärmekapazitäten berechnet werden, vernachlässigbar sind.

Bei der Betrachtung des Gesamtsystems wird durch die höheren Schmelztemperaturen der alternativen PCM im Vergleich zu Wasser während der Nutzung des Latentspeichers als Wärmequelle für das Anergienetz und damit für die dezentralen Wärmepumpen eine höhere Effizienz der dezentralen Wärmepumpen erwartet.

Um diese Erwartung, trotz der nicht verfügbaren geeigneten realen PCM zu überprüfen, wurde eine Parametervariation der Jahressystemsimulation des Gesamtsystems mit zwei fiktiven

PCM mit Schmelztemperaturen von + 7 °C und + 15 °C durchgeführt. Die spezifische Schmelzenthalpie, die Dichten, sowie die spezifischen Wärmekapazitäten im festen und im flüssigen Aggregatzustand der fiktiven PCM werden dabei mit denen von Wasser gleichgesetzt.

Ergebnis der Parametervariation ist, dass die Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpen mit steigender Schmelztemperatur um weniger als 5 % gesteigert werden können. In einer Ergebnisanalyse der Jahressystemsimulationen wurde festgestellt, dass die Steigerung der Jahresarbeitszahl jedoch weniger durch die Erhöhung der Schmelztemperatur des PCMs begründet ist. Entscheidend ist dagegen die damit in Zusammenhang stehende veränderte Wahl der Wärmequelle des Anergienetzes bzw. der Wärmepumpen durch die Betriebsweise in Abhängigkeit des Beladungszustands. So steigen in den relevanten Winter- und Übergangsmonaten mit höheren Schmelztemperaturen, aufgrund von höheren mittleren Speichertemperaturen, die Wärmeverluste des ungedämmten Latentspeichers an das Erdreich. Hierdurch sinkt der Beladungszustand des Eisspeichers und es wird mittels der Regelabfragen häufiger das solarthermische Luft-Sole-Kollektorfeld als Wärmequelle des Anergienetzes gewählt. Insbesondere in den Übergangsmonaten führt dies zu einer leichten Erhöhung der Jahresarbeitszahl. Gleichzeitig sinken jedoch die Wärmegewinne des ungedämmten Latentspeichers aus dem Erdreich in den Sommermonaten, sodass mehr Kühlenergie aus dem Latentspeicher zur Verfügung steht. Bei einer aktiven Kühlung könnte somit an dieser Stelle elektrische Energie eingespart werden. Eine Quantifizierung der eingesparten elektrischen Energie konnte mit den durchgeführten Jahressystemsimulationen, aufgrund der nicht implementierten aktiven Kühlbetriebsmodi, jedoch nicht erfolgen.

Je nach Fokus der Anlage auf die Beheizung oder die Kühlung von Quartieren oder großen Einzelobjekten, wäre es daher eine Möglichkeit den Latentspeicher wärmezudämmen, um den Betrieb des Gesamtsystems hinsichtlich der Energieeffizienz zu verbessern. Da jedoch zum Zeitpunkt der Untersuchung keine PCM mit den entsprechenden Eigenschaften identifiziert werden konnten, bleibt dies eine theoretische Überlegung.

Die beschriebenen Beobachtungen sind außerdem ausschließlich für das hier betrachtete Gesamtsystem mit der in [67] beschriebenen vereinfachten Regelung gültig. Werden sowohl die Betriebsweise des Gesamtsystems als auch die Dämmeigenschaften des Latentspeichers an andere Anforderungen angepasst, können die Beobachtungen wesentlich abweichen.

2.6.4 Validierung von Rechenmodellen für Eisspeicher

Für die Dimensionierung und für in nachfolgenden Arbeitspaketen durchgeführten Simulationsstudien der Gesamtenergieversorgungssysteme mit Eisspeicher wird ein Rechenmodell benötigt, welches das thermische Verhalten von Eisspeichern, insbesondere auch bei einer multifunktionalen Nutzung für Speichervolumen im Quartiersmaßstab, ausreichend genau abbilden kann.

Als bestehende Rechenmodelle wurden ein numerisches Modell in MATLAB/Simulink, welches von der Fa. VCS Simulationen verwendet wird und mit gleichem numerischem Aufbau in der Simulationssoftware POLYSUN in dem Modell „Eisspeicher Wendelwärmeübertrager“ hin-

terlegt ist, sowie der Nostandard-Type 343 der Simulationsumgebung TRNSYS [68] untersucht. Daneben wurde das bestehende Modell in MATLAB/Simulink in zwei verschiedenen Ausführungen, einem bereits in der CARNOT-Toolbox [69] integrierten Modell (alt) und einem darauf basierenden erweiterten Modell (neu), untersucht. Die Erweiterung des Modells in MATLAB/Simulink dient dabei hauptsächlich einer detaillierteren Modellierung des realen Aufbaus der in diesem Forschungsvorhaben eingesetzten Eisspeicher, indem sowohl der Speicherbehälterdeckel, die thermische Kapazität des gestörten Erdreichs über dem Speicherbehälterdeckel und die darunterliegende Luftschicht mit modelliert werden. Eine detaillierte Analyse der theoretischen Unterschiede der bestehenden Modelle und des erweiterten Modells, sowie deren Parametrisierung kann [70] entnommen werden.

Mit den bestehenden Modellen in den Simulationsumgebungen TRNSYS und MATLAB/Simulink kann das thermische Verhalten eines Eisspeichers mit einem Volumen von bis zu 10 m^3 gut abgebildet werden [71], [72]. Für die Wärme- und Kälteversorgung eines Quartiers sind dagegen Eisspeichervolumina im Bereich von 100 m^3 bis 10.000 m^3 erforderlich. Vor diesem Hintergrund wurden die bestehenden Modelle und das erweiterte auf ihre Eignung zur korrekten Abbildung des thermischen Verhaltens großer Eisspeichervolumina untersucht.

Nachfolgend werden ausschließlich der Vergleich der Simulationsergebnisse der Modelle für ein Eisspeichervolumen von 1.125 m^3 sowie die Vorgehensweise zur Validierung der Simulationsergebnisse anhand von Messdaten und wesentliche Schlussfolgerungen daraus beschrieben.

2.6.4.1 Vorgehen zur Validierung der Simulationsergebnisse

Mit einem Messdatensatz einer Eisspeicheranlage, welche durch den österreichischen Projektpartner AEE Intec messtechnisch begleitet wurde und im Rahmen des Förderprogramms Solarthermie - große Solaranlagen des Klima- und Energiefonds der österreichischen Bundesregierung generiert wurde, konnte eine Validierung der Simulationsergebnisse der beiden genannten Eisspeichermodelle durchgeführt werden. Die Messdaten liegen dem IGTE für einen Betrachtungszeitraum von neun Monaten, beginnend im Oktober 2020, in einer zeitlichen Auflösung von 60 Sekunden vor.

Der Messdatensatz des Wärme- und Kälteversorgungssystems beinhaltet neben den Volumenströmen und Temperaturen an definierten Wärmemengenzählern der Hydraulik auch Ventilstellungen von neun Ventilen, welche für die Regelung von sechs unterschiedlichen Betriebsweisen eingesetzt werden. Anhand der Ventilstellungen wurden in einer Datenvorverarbeitung ausschließlich die für den Entzugs- und Regenerationswärmeübertrager relevanten gemessenen Volumenströme, sowie Ein- und Austrittstemperaturen herausgefiltert. Innerhalb der Datenvorverarbeitung wurden außerdem die Volumenströme anhand der temperaturabhängigen Wärmeträgerfluideigenschaften in Massenströme umgerechnet. Den Eisspeichermodellen in den Simulationsumgebungen MATLAB/Simulink und TRNSYS wurden die gleichen vorverarbeiteten Massenströme und Eintrittstemperaturen als Eingabegrößen aufgeprägt.

Ausgabegrößen der Simulationen sind unter anderem sowohl die Austrittstemperaturen des Entzugs- und Regenerationswärmeübertragers als auch die mittlere Eisspeichertemperatur

und der Vereisungszustand (TRNSYS) oder direkt der Beladungszustand (MATLAB/Simulink) des Eisspeichers. Die simulierte und die gemessene Be- und Entladewärmeleistung wird mit dem gemessenen Massenstrom und der gemessenen Eintrittstemperatur, sowie den jeweiligen simulierten oder gemessenen Austrittstemperaturen nach Gleichung (2-28) berechnet. Die kumulierte Be- und Entladewärme beschreibt das Integral der Be- und Entladewärmeleistung über einen definierten Zeitraum.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot (\vartheta_{in} - \vartheta_{out}) \quad (2-28)$$

mit

\dot{Q}	Wärmeleistung in W
\dot{m}	Massenstrom in kg/s
c_p	spezifische Wärmekapazität Wärmeträgerfluid in J/(kg K)
ϑ_{in}	Eintrittstemperatur Wärmeübertrager in °C
ϑ_{out}	Austrittstemperatur Wärmeübertrager in °C

Um die Simulationsergebnisse der untersuchten Modelle miteinander und mit den Messdaten vergleichen zu können, entspricht die Parametrisierung der Modelle soweit möglich den realen Bedingungen. Da sich die Länge des Entzugs- und Regenerationswärmeübertragers des vermessenen Eisspeichers unterscheiden und im Simulink-Modell zwei Wärmeübertragerlängen möglich sind, kann dieser Sachverhalt relativ einfach berücksichtigt werden. Im TRNSYS-Modell kann jedoch nur eine Wärmeübertragerlänge vorgegeben werden, so dass in Abhängigkeit des aktiven Massenstroms der Be- oder Entladung die Wärmeübertragerlänge angepasst wurde.

Für den Vergleich der Modelle miteinander ist weiterhin zu beachten, dass eine Umrechnung der in den MATLAB/Simulink-Modellen verwendeten Leistungscharakteristik der Wärmeübertrager in im TRNSYS-Modell benötigte Wärmedurch- und übergangskoeffizienten und daraus abzuleitende Materialeigenschaften nicht möglich war. Daher wurde für das TRNSYS-Modell eine Wärmeleitfähigkeit, sowie ein innerer Wärmeübergangskoeffizient der Wärmeübertragerrohre, wie in [[70], Tabelle A1], entsprechend Angaben aus der Literatur für das Material der Wärmeübertragerrohre, angenommen.

Außerdem wird für die Berechnung der kumulierten Be- und Entladewärme des MATLAB/Simulink-Modells eine temperaturabhängige spezifische Wärmekapazität des Wärmeträgermediums verwendet. Diese wird auch für die entsprechende Berechnung aus den Messdaten verwendet. Für die Berechnung der Simulationsergebnisse des TRNSYS-Modells, wird jedoch eine konstante spezifische Wärmekapazität verwendet, welche dem arithmetischen Mittel der temperaturabhängigen spezifischen Wärmekapazität der Messung über den gesamten Betrachtungszeitraum entspricht. Es wird jedoch erwartet, dass der Einfluss der unterschiedlichen spezifischen Wärmekapazitäten vernachlässigt werden kann.

Zur Bewertung der Eignung der Modelle zur Abbildung des thermischen Verhaltens von großen Eisspeichervolumina sind, sowohl für Jahressystemsimulationen als auch für die Dimensionierung der Systemkomponenten, insbesondere die relativen Abweichungen der simulierten kumulierten Be- und Entladewärme über den gesamten Betrachtungszeitraum gegenüber der gemessenen relevant.

Der Messdatensatz beinhaltet weiterhin drei Temperaturen, welche im Eisspeicher in unterschiedlichen Höhen und am Rand des Eisspeichers gemessen wurden, sowie ein bereits in einen Vereisungszustand umgerechnetes Ausgabesignal eines Füllstandsensors. Da die Eisspeichertemperaturen am Rand des Eisspeichers gemessen wurden und damit die teilweise unterkühlten, vereisten Bereiche im Kern des Eisspeichers nicht ausreichend in den Messdaten widerspiegelt werden, kann die gemessene mittlere Eisspeichertemperatur nur als Anhaltspunkt für den Verlauf der realen mittleren Eisspeichertemperaturkurve dienen.

Stattdessen werden zur Validierung der simulierten mittleren Eisspeichertemperatur $\vartheta_{ice,s}$, wie bereits in [71] dokumentiert, die gemessenen Austrittstemperaturen der beiden Wärmeübertrager herangezogen. Da bei der Beladung ein Wärmestrom zugeführt wird, muss die Eintrittstemperatur des Regenerationswärmeübertragers höher sein als die mittlere Eisspeichertemperatur. Gleichzeitig würde dessen Austrittstemperatur, in Abhängigkeit von den Wärmeübertragereigenschaften und dem Massenstrom in einem unendlich langen Wärmeübertrager die mittlere Eisspeichertemperatur annehmen. In einem endlichen Wärmeübertrager kann angenommen werden, dass die Austrittstemperatur höher als die mittlere Eisspeichertemperatur ist. Sie stellt somit die obere Grenze eines Temperaturbandes dar, in welchem sich eine plausible mittlere Eisspeichertemperatur befindet. Die untere Grenze stellt mit gleicher Begründung die Austrittstemperatur des Entzugswärmeübertragers dar. Außerdem wird das arithmetische Mittel der drei gemessenen Eisspeichertemperaturen $\vartheta_{ice,m}$ gebildet und in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

Da mit der mittleren Eisspeichertemperatur keine Aussage zum Vereisungszustand bzw. dem latenten Wärmespeicherpotential getroffen werden kann, wird weiterhin der Beladungszustand, mit engl. State of Charge (S_{oc}) abgekürzt, als Bewertungsgröße verwendet. Eine Definition des S_{oc} ist in Gleichung (2-13) zu finden. Der Beladungszustand wird dabei sowohl für die Messdaten als auch für die Simulationsergebnisse aus der mittleren Eisspeichertemperatur und dem Vereisungszustand, anhand der Schmelzenthalpie, sowie der Eigenschaften des Speichermediums im flüssigen und festen Aggregatzustand, berechnet.

2.6.4.2 Vergleich der Simulationsergebnisse beider Modelle für ein Eisspeichervolumen von 1.125 m³

In Abbildung 2-171 sind die gemessene mittlere Eisspeichertemperatur, der gemessene Beladungszustand sowie die gemessenen kumulierten Be- und Entladewärme als schwarze Kurven über den gesamten Betrachtungszeitraum aufgetragen. Die jeweiligen Größen der TRN-SYS-Simulation sind in Blau, die des bestehenden MATLAB/Simulink-Modells in Grün und die des erweiterten MATLAB/Simulink-Modells in Rot dargestellt.

Im oberen Bereich der Abbildung sind die obere und untere Grenze des Temperaturbandes, in welchem die mittlere Eisspeichertemperatur plausibel ist, in hell- und dunkelgrauen Punktwolken dargestellt.

Nimmt der Beladungszustand im mittleren Bereich der Abbildung 2-171 einen Wert von über 100 % an, ist das Wasser im Eisspeicher vollständig flüssig. Eine mittlere Eisspeichertemperatur über 0 °C spiegelt sich in einem Beladungszustand von über 100 % wider. Im Bereich unter 100 % verhält sich der Beladungszustand reziprok zum Vereisungszustand.

Die relativen Abweichungen der in Abbildung 2-171 im unteren Bereich dargestellten kumulierten Be- und Entladewärme über den gesamten Betrachtungszeitraum können Tabelle 2-44 entnommen werden.

Tabelle 2-44: Relative Abweichung der mittels Simulationen berechneten kumulierten Be- und Entladewärme zu der gemessenen über den gesamten Betrachtungszeitraum

<i>Relative Abweichung Simulation zu Messung</i>	<i>BELADUNG</i>	<i>ENTLADUNG</i>
<i>MATLAB/Simulink (alt)</i>	-4,2 %	-15,1 %
<i>MATLAB/Simulink (neu)</i>	-16,3 %	-11,1 %
<i>TRNSYS</i>	+6,8 %	+9,0 %

Anhand der Kurvenverläufe in Abbildung 2-171 kann für alle drei untersuchten Modelle festgestellt werden, dass die Abweichung zwischen Simulationsergebnissen und Messdaten insbesondere im festen Aggregatzustand des Eisspeichers ansteigt.

Obwohl keine der simulierten mittleren Eisspeichertemperaturen über den gesamten Betrachtungszeitraum im erwarteten Temperaturband liegt, scheint die Eisspeichertemperatur des TRNSYS-Modells im Vergleich zu der der Simulink-Modelle eine gedämpfte Reaktion auf zu- und abgeführte Wärmeströme zu zeigen. In Verbindung mit dem Beladungszustand kann darauf geschlossen werden, dass die Eisspeichertemperatur und der zugehörige Vereisungszustand plausibler sind als die der MATLAB/Simulink-Modelle. Alle Kurven befinden sich jedoch in einem grundsätzlich plausiblen Bereich.

Mit relativen Abweichungen der durch die Simulationen berechneten kumulierten Be- und Entladewärme zu der gemessenen von minimal 4 % bis maximal 16 % wird das thermische Verhalten des realen Eisspeichers nicht optimal abgebildet.

Für Jahressystemsimulationen, bei welchen sich teilweise entsprechende Abweichungen der darin enthaltenen Komponenten-Modelle kompensieren, sind sowohl das bestehende MATLAB/Simulink-Modell als auch der TRNSYS Nostandard-Type 343 geeignet.

Die Erweiterung des MATLAB/Simulink-Modells bewirkt mit der in [[70], Tabelle A1] definierten Parametrisierung im Vergleich zum bestehenden MATLAB/Simulink-Modell höhere Wärmegewinne aus dem Erdreich, sodass insbesondere am Ende des Betrachtungszeitraums die mittlere Eisspeichertemperatur schneller ansteigt als in der Simulation mit dem bestehenden MATLAB/Simulink-Modell. Dadurch kann zwar mehr Wärme über den Entzugswärmeübertrager

entzogen werden, gleichzeitig jedoch weniger regeneriert werden. Da die gemessene kumulierte Beladewärme nur etwa 30 % der gemessenen kumulierten Entladewärme beträgt, steigt die relative Abweichung der durch die Simulation berechnete kumulierten Beladewärme zur gemessenen entsprechend stärker an als die relative Abweichung der kumulierten Entladewärme zur gemessenen sinkt.

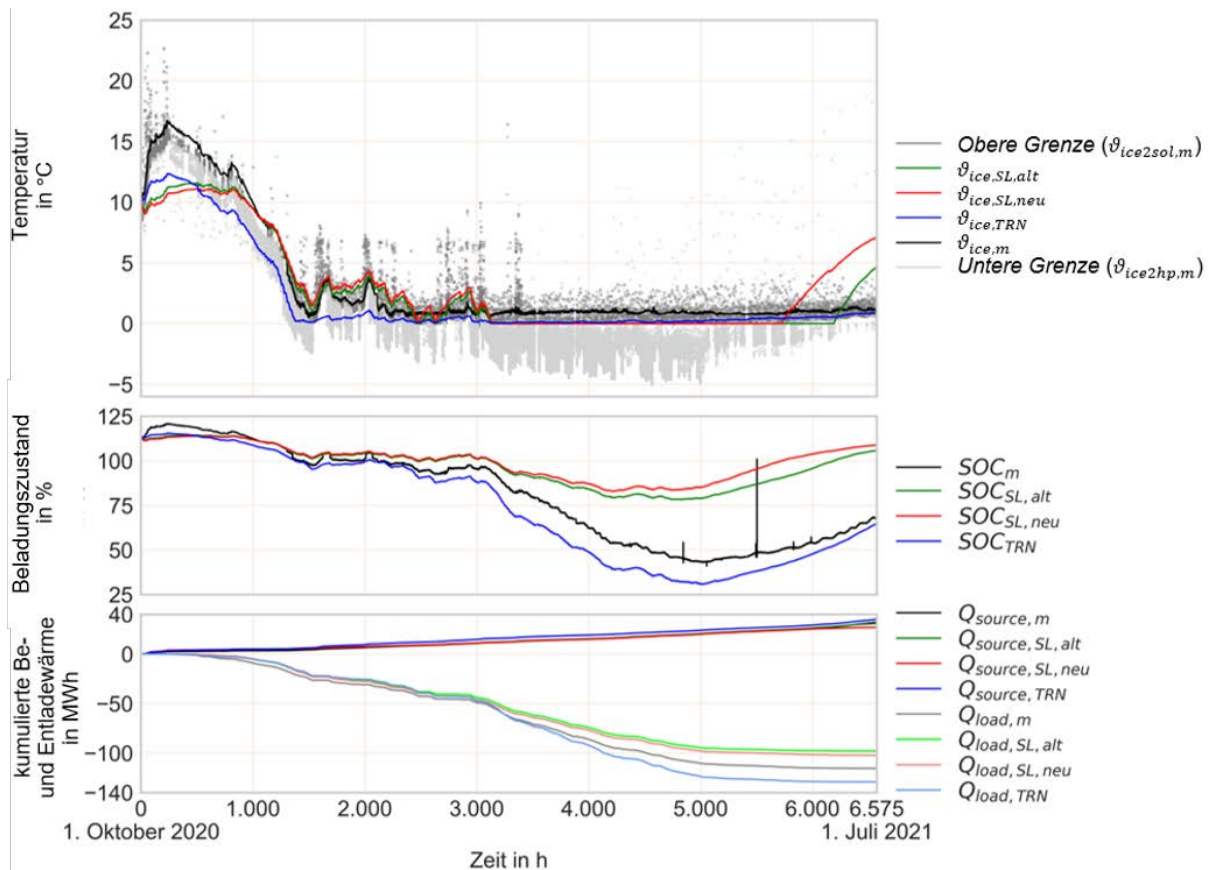


Abbildung 2-171: Zeitlicher Verlauf der mittleren Eisspeichertemperatur (ϑ_{ice}), des Beladungszustands (SoC) und der kumulierten Beladewärme (Q_{source}) und Entladewärme (Q_{load}). Vergleich der mittels Simulationen berechneten zu den gemessenen Ergebnissen.

TRN ... TRNSYS

SL ... Simulink

m ... Messdaten

ice2sol ... Austritt Regenerationswärmeübertrager (Eisspeicher zu solarth. Luft-Sole-Kollektorfeld)

ice2hp ... Austritt Entzugswärmeübertrager (Eisspeicher zu Wärmepumpen)

Auffällig ist außerdem die gegenläufige Abweichung der Modelle der unterschiedlichen Simulationsumgebungen. Während mit dem TRNSYS-Modell insbesondere die bei der Entladung des Speichers über den Wärmeübertrager entnommene Wärme überschätzt wird, wird diese mit den MATLAB/Simulink-Modellen unterschätzt. Dies kann sowohl mit der voneinander abweichenden thermischen Kopplung mit dem Erdreich als auch mit unterschiedlichen Berechnungen der Wärmeübertragung von Wärmeträgerfluid zu flüssigem Speichermedium begründet werden.

Fazit

Unter den gegebenen Mess- und Parameterunsicherheiten sind beide Modelle zur Abbildung des thermischen Verhaltens großer Eisspeichervolumina insbesondere für Jahressystemsimulationen geeignet. Während mit dem Nostandard-Type 343 in TRNSYS die Be- und Entladung über den Betrachtungszeitraum leicht überschätzt und damit sowohl die Entzugswärmeleistung als auch die Regenerationswärmeleistung über den gemessenen Wärmeleistungen liegen, wird mit den MATLAB/Simulink-Modellen die Be- und Entladung unterschätzt. Diese Beobachtung in Kombination mit dem daraus resultierenden Beladungszustand sollte insbesondere in der Dimensionierung von Komponenten wie dem Eisspeicher z. B. mit der Software POLYSUN berücksichtigt werden, um eine Unterdimensionierung zu vermeiden.

In Hinblick auf den Messdatensatz und die damit in Zusammenhang stehende Parametrisierung sind mehrere Unsicherheiten bekannt auf deren Basis Änderungen der Eignungsbewertung eintreten können. So sind sensitive Parameter der Modelle beispielsweise die Eigenschaften des Erdreichs wie z. B. die Wärmeleitfähigkeit, spez. Wärmekapazität und Dichte.

Die Validierung der Eisspeicher-Modelle bildet die Basis für ökonomische und ökologische Untersuchungen sowie für Optimierungen von Gesamtenergieversorgungssystemen mit Eisspeichern und trägt damit zur weiteren Verbreitung und effizienten Nutzung der Technologie bei.

3. Solare Umwandlungstechnologien (AP3)

Im Rahmen des Arbeitspakets solare Umwandlungstechnologien wurden drei Themen beleuchtet:

- Entwicklung eines PVT-Hybrid-Flachkollektors
- Solargenerator-Gesamtkonzepte
- Solarthermische Wärmequellen für Anergienetze

Zur Entwicklung eines PVT-Hybrid-Flachkollektors (Kapitel 3.1) wurden der Luft-Sole-Wärmeübertrager vom Typ Charger, sowie der PVT Sonnen-Luft-Kollektor (SLK) vom Typ Kraftdachregister und der PVT Sonnen-Luft-Kollektor vom Typ AluKol detailliert messtechnisch untersucht, um Kollektorkennwerte zu ermitteln.

Zudem wurden verschiedene TRNSYS-Types für PVT-Kollektoren miteinander verglichen. Im Besonderen wurde der Fokus auf die Abbildbarkeit des thermischen Verhaltens des PVT-Kollektors in Bezug auf Windgeschwindigkeit und –richtung gesetzt, welches bei unabgedeckten Absorbern eine große Rolle spielt. Als Basis für die Entwicklung von Konzepten für einen neuen PVT-Sonnen-Luft-Kollektor wurde ein Anforderungskatalog erstellt. Unterschiedliche Aufstellvarianten wurden durch CFD-Simulationen untersucht, um die Einflüsse der Luftströmungen auf den Wärmetransport zu untersuchen.

Das Subarbeitspaket Solargenerator Gesamtkonzepte (Kapitel 3.2) wurde von den österreichischen Projektpartnern bearbeitet. Ziel des Arbeitspakets war die Entwicklung eines Gesamtkonzepts für die Nutzung solarer Energie, auf Grundlage der zuvor definierten Randbedingungen hinsichtlich Lastprofilen, Flächenpotential, Speichertypen und –potentialen und unter Berücksichtigung der erarbeiteten Versorgungssysteme wurden optimale Kombinationen von Hybridkollektoren, Solarthermie und Photovoltaik. Die Forschungsergebnisse dieses Subarbeitspaketes können dem Projekt-Abschlussbericht der österreichischen Projektpartner entnommen werden.

Im Subarbeitspaket solarthermische Wärmequellen für Anergienetze (Kapitel 3.3) wurden unterschiedliche Kollektoren im Hinblick auf ihre Eignung und Integration in das Gesamtenergieversorgungssystem als Wärmequelle für Anergienetze bewertet. Hierzu wurden vergleichende TRNSYS-Jahressimulationen durchgeführt. Zudem wurde die Verfügbarkeit der solarthermischen Wärmequellen bei extremen Umweltbedingungen sowie die Reparaturanfälligkeit und Lebensdauer bewertet.

3.1 Entwicklung eines PVT-Hybrid-Flachkollektors

3.1.1 Vermessung von PVT Kollektoren

Die Herstellernamen und Produktbezeichnungen werden in diesem Kapitel im öffentlichen Teil nur dann belassen, wenn es sich um marktverfügbare Produkte handelt.

Der Fokus der beiden deutschen Projektpartner IGTE und VCS liegt auf der Bewertung der PVT-Kollektorkonzepte für den Einsatz in Anergienetzen. Aufgrund der Relevanz der in diesem Arbeitspunkt durchzuführenden Arbeiten wurde, entgegen der ursprünglichen Arbeitsplanung, bereits kurz nach Projektstart des thermischen Verhaltens von PVT-Kollektoren begonnen. Im ersten Schritt wurden vier verschiedene mathematische Modelle von PVT-Kollektoren (TRNSYS Types 50d, 560, 203, 832) miteinander verglichen, um ein geeignetes Modell für die Charakterisierung der aus den relevanten physikalischen Vorgängen im und an den PVT-Kollektoren resultierenden Auswirkungen im Hinblick auf das thermische Verhalten der PVT-Kollektoren zu identifizieren. Dazu zählt im Besonderen das thermische Verhalten des PVT-Kollektors in Bezug auf Windgeschwindigkeit und -richtung.

Die Untersuchung zeigt, dass sowohl Type 50d aus der Standardbibliothek der Simulationssoftware TRNSYS als auch Type 560 aus der TESS-Komponenten-Bibliothek (Firma TESS: Thermal Energy System Specialists) für die Abbildung der zu betrachtenden Hybrid-Kollektoren ungeeignet sind. Während mit Type 50d aufgrund fehlender Modellparameter weder ein unabgedeckter Absorber noch ein variabler Kollektoraufbau modelliert werden kann, fehlt bei der Modellierung mit Type 560 primär die Möglichkeit, die Windabhängigkeit abzubilden [73]. Type 203 und Type 832 sind speziell entwickelte mathematische Modelle für unabgedeckte PVT-Kollektoren. Sie basieren auf einer Energiebilanz am Hybrid-Kollektor, welche mit Hilfe von Kollektorkennwerten berechnet wird. Während mit Type 203 sowohl das thermische als auch das photovoltaische Verhalten des Hybrid-Kollektors modelliert werden kann, muss Type 832 mit einem Type zur Abbildung des Photovoltaik-Moduls kombiniert werden. Als Ergebnis der durchgeführten Untersuchungen wurde festgesellt, dass aufgrund der kontinuierlichen Weiterentwicklung von Type 832 diese Kombination das geeignetste mathematische Modell für dieses Forschungsvorhaben ist [74] [75] [76].

Für die Beschreibung der Wirkungsgradkennlinien werden die aufgrund von quasi-dynamischen Messungen nach EN 12975 bzw. ISO 9806 ermittelten Kollektorkennwerte benötigt [77] [78].

Im Vorhaben wurde der thermische Sonnen-Luft-Kollektor (SLK) der Fa. KRAFTWERK Solutions AG vom Typ Charger sowohl ohne (Abbildung 3-1 und Abbildung 3-2 links) als auch mit einer oben angebrachten Abdeckung (Abbildung 3-2 rechts) messtechnisch untersucht. Die Abdeckung imitiert dabei ein Photovoltaik-Modul, um so auch den PVT Sonnen-Luft-Kollektor der Fa. KRAFTWERK Solutions AG vom Typ Kraftdachregister abzubilden.

Der Sonnen-Luft-Kollektor vom Typ Charger besteht aus mehreren übereinanderliegenden Registern. Jedes Register besteht wiederum aus 25 parallel verschalteten PP-R (Polypropylen-Random-Copolymer) Rechteckkanälen (12 mm x 12 mm), welche an den Enden mit Rechteckkanälen (24 mm x 12 mm) verbunden sind. Die Register sind an einem Ende hydraulisch mit je einem Verteiler und einem Sammler verbunden.



Abbildung 3-1: Absorber vom Typ Charger in 2-lagiger Ausführung auf dem Indoor-Prüfstand für Sonnenkollektoren

Da für den im Vorhaben zu untersuchenden PVT-Kollektor und den zugehörigen Absorber keine quasi-dynamischen Messungen vorliegen, ist zuerst ein Messkonzept für die Indoor-Messungen erarbeitet worden. Auf Indoor-Messungen wurde dann jedoch verzichtet. Der Grund dafür war zum einen der schwer bewegliche volumetrische Aufbau des Luft-Sole-Wärmeübertragers, der zu einem großen Aufwand für die Installation des Luft-Sole-Wärmeübertragers im Sonnensimulator geführt hätte. Bei vollem Ausbau mit acht Registern ergibt sich für den Charger eine Gesamthöhe von 0,4 m. Insgesamt bietet der Luft-Sole-Wärmeübertrager mit den Gesamtmaßen von 4 m Länge und 1 m Breite eine Bruttokollektorfläche von 4 m². Zum anderen ist bei dem volumetrischen Aufbau insbesondere beim unabgedeckten Charger eine hohe Abhängigkeit des thermischen Verhaltens von Umgebungsbedingungen, wie Strahlungsrichtung und -intensität, Himmelstemperatur, Windgeschwindigkeit sowie Kondensations- oder Bereifungsbedingungen, zu erwarten. Bei Indoor-Messungen im Sonnensimulator steht nur eine kleine Variabilität dieser Umgebungsbedingungen zur Verfügung. Beispielfhaft bedingt eine Strahlungsintensität größer als 0 W/m² eine ansteigende Raumtemperatur im Sonnensimulator. Um reziprok die Umgebungslufttemperatur entsprechend einer Außenprüfung beizubehalten, muss der Raum mit Hilfe von kalter Luft und Ventilatoren gekühlt werden. Durch die Ventilatoren entsteht jedoch eine Windgeschwindigkeit von 2 m/s. Strahlungsintensitäten mit geringerer Windgeschwindigkeit können somit nicht gemessen werden. Für den langwelligen Strahlungsaustausch besteht weiterhin eine Diskrepanz zwischen der Spektralverteilung und Temperatur des Gegenstrahlers im Sonnensimulator und der des Himmels [79]. Eine quasi-dynamische Outdoor-Messreihe nach ISO 9806 wurde daher als geeignete Messmethode identifiziert. Die Messungen wurden im Sommer 2020 und 2021 durchgeführt.

Für die Ermittlung dieser Kennwerte wurde der in Abbildung 3-2 dargestellte Absorber der Fa. VCS vom Typ Charger sowohl ohne als auch mit einer oben angebrachten Abdeckung messtechnisch untersucht. Die Abdeckung, bestehend aus einer alukaschierten, matt schwarz beschichteten Hartschaum-Dämmplatte, imitiert dabei ein Photovoltaik-Modul. Da das Photovoltaik-Modul eine lange Lieferzeit hatte und mit den hier relevanten Messungen ausschließlich das thermische Verhalten charakterisiert werden soll, wurde durch den Einsatz der Hartschaum-Dämmplatte eine zeitliche Verzögerung der Messungen vermieden.



Abbildung 3-2: Absorber vom Typ Charger in 8-lagiger Ausführung ohne Abdeckung links, mit Abdeckung rechts auf dem Outdoor-Prüfstand für Sonnenkollektoren

Entsprechend der gewählten Messmethode wurden die horizontale hemisphärische Bestrahlungsstärke, die horizontale langwellige Bestrahlungsstärke, die Direkt-Normalstrahlung, die horizontale Windgeschwindigkeit, die Umgebungsluft-, Kollektorein- und -austrittstemperatur, sowie der Kollektorvolumenstrom messtechnisch bestimmt. Aus den gemessenen Größen werden darüber hinaus die horizontale direkte Bestrahlungsstärke, die diffuse Bestrahlungsstärke, die mittlere Temperatur des Wärmeträgerfluids und abschließend die Nutzwärmeleistung des nord-südlich ausgerichteten Luft-Sole-Wärmeübertragers berechnet.

Für die Ermittlung der Kollektorkennwerte wurden Messdaten von ganzen Tagen (0-24 Uhr) im Zeitraum von Anfang August bis Anfang Oktober 2020 verwendet, so dass mit den nachfolgenden Kennwerten auch der nächtliche Zeitraum ohne Einstrahlung abgebildet werden kann. Neben dem durch Tages- und Jahresverlauf abgedeckten Spektrum an Umgebungsbedingungen wurden weiterhin Messdaten mit variierender Kollektoreintrittstemperatur zwischen 10 °C und 30 °C und Kollektorvolumenströmen von 0,6 m³/h und 0,3 m³/h verwendet. Tabelle 3-1 stellt die ermittelten Kollektorkennwerte des Luft-Sole-Wärmeübertragers vom Typ Charger dar.

Tabelle 3-1: Kollektorkennwerte des Luft-Sole-Wärmeübertragers vom Typ Charger

Symbol	Kennwert & Einheit
$\eta_{0,b}$	0,75 -
c_1	47,30 W/(m ² K)
c_2	0,00 W/(m ² K ²)
c_3	20,20 J/(m ³ K)
c_4	0,75 -
c_5	77,49 kJ/(m ² K)
c_6	0,09 s/m

Dabei ist $\eta_{0,b}$ der einheitslose Spitzenwirkungsgrad des Kollektors, welcher die Spitzenleistung auf die direkte solare Bestrahlungsstärke bei senkrechtem Einfall der Sonnenstrahlung bezieht und bei einer Temperaturdifferenz von Null Kelvin zwischen der mittleren Temperatur des Wärmeträgerfluids und der Umgebungslufttemperatur bestimmt wird.

Mit den Wärmeverlusttermen mit den Kennwerten c_1 bis c_6 wird der Einfluss einzelner Größen auf die Wärmeverluste des Luft-Sole-Wärmeübertragers bestimmt. Der Wärmedurchgangskoeffizient des Luft-Sole-Wärmeübertragers in W/(m² K) ist durch c_1 gegeben.

Außerdem werden die Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz (c_2 in W/(m² K²)), von der Windgeschwindigkeit (c_3 in J/(m³ K)) und von der Himmels-temperatur (c_4 in -) angegeben.

Die effektive Wärmekapazität des Luft-Sole-Wärmeübertragers c_5 in J/(m² K) und der von der Windgeschwindigkeit abhängige Konversionsfaktor c_6 in s/m werden ebenfalls in Tabelle 3-1 aufgeführt [79].

Während der ungedeckte Luft-Sole-Wärmeübertrager vom Typ Charger sowohl direkte Sonnenstrahlung als auch den langwelligen Strahlungsaustausch mit dem Himmel als thermische Energiequelle nutzen kann, wird dies bei dem PVT-Kollektor vom Typ Kraftdachregister durch die Abdeckung nahezu vollständig verhindert. Daraus folgt unter anderem trotz gleichem Luft-Sole-Wärmeübertrager ein abweichendes thermisches Verhalten.

Bei der Auswertung der Messdaten werden für den ungedeckten Luft-Sole-Wärmeübertrager sowohl die Messung der hemisphärischen und langwelligen solaren Bestrahlungsstärke als auch die Berechnung der direkten solaren Bestrahlungsstärke nach ISO 9806 auf die horizontale Bruttokollektorfläche von 4 m² bezogen. Die Bruttokollektorfläche inkludiert dabei den Abstand zwischen den parallel verschalteten PP-R-Rechteckkanälen. Die horizontale strahlungsabsorbierende Oberfläche des Luft-Sole-Wärmeübertragers nimmt dadurch nur einen geringen Anteil der Bruttokollektorfläche ein. Darauf basierend ist der Spitzenwirkungsgrad mit

einem Wert von 75 % als relativ hoch einzuordnen. Dies kann jedoch durch den volumetrischen Körper und der daraus folgenden größeren strahlungsabsorbierenden Oberfläche (vertikal) des Luft-Sole-Wärmeübertragers begründet werden.

Der volumetrische Aufbau stellt ein gänzlich neues Luft-Sole-Wärmeübertrager- bzw. PVT-Kollektor-Konzept dar, wodurch jedoch weitere Fragestellungen, wie beispielsweise die korrekte Berechnung der longitudinalen Einfallswinkelkorrekturfaktoren, entstehen.

Im Sommer 2021 wurden die in Tabelle 3-2 dargestellten Modellkennwerte des PVT SLK vom Typ Kraftdachregister ermittelt, um das im Vergleich zum thermischen SLK abweichende thermische Verhalten durch die Abdeckung beschreiben zu können.

Für die Ermittlung der Modellkennwerte wurden genau wie für den thermischen SLK vom Typ Charger Messdaten von ganzen Tagen (0-24 Uhr) im Zeitraum von Anfang August bis Anfang Oktober 2020 verwendet, so dass mit den nachfolgenden Kennwerten auch der nächtliche Zeitraum ohne Einstrahlung abgebildet werden kann. Genauso wurden Messdaten mit variierender Kollektoreintrittstemperatur zwischen 10 °C und 30 °C und Kollektorvolumenströmen von 0,6 m³/h und 0,3 m³/h verwendet.

Tabelle 3-2: Modellkennwerte des PVT Sonnen-Luft-Kollektors (SLK) vom Typ Kraftdachregister

Symbol	Kennwert & Einheit
$\eta_{0,b}$	0,71 -
c_1	33,50 W/(m ² K)
c_2	0,00 W/(m ² K ²)
c_3	32,40 J/(m ³ K)
c_4	1,00 -
c_5	91,61 kJ/(m ² K)
c_6	0,04 s/m

Dabei ist $\eta_{0,b}$ der dimensionslose Spitzenwirkungsgrad des Kollektors, auch Konversionsfaktor genannt, welcher die Spitzenleistung auf die direkte solare Bestrahlungsstärke bei senkrechtem Einfall der Sonnenstrahlung bezieht und bei einer Temperaturdifferenz von null Kelvin zwischen der mittleren Temperatur des Wärmeträgerfluids und der Umgebungslufttemperatur bestimmt wird.

Mit den Wärmeverlusttermen mit den Kennwerten c_1 bis c_6 wird der Einfluss einzelner Größen auf die Wärmeverluste des SLKs bestimmt. Der Wärmedurchgangskoeffizient in W/(m² K) wird durch c_1 repräsentiert.

Außerdem werden die Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz c_2 in W/(m² K²), von der Windgeschwindigkeit (c_3 in J/(m³ K)) und von der Himmels-temperatur (c_4 , dimensionslos) angegeben.

Die effektive Wärmekapazität c_5 in J/(m² K) und der von der Windgeschwindigkeit abhängige Konversionsfaktor c_6 in s/m sind ebenfalls in Tabelle 3-2 aufgeführt [79].

Trotz desselben thermischen Sonnen-Luft-Kollektors als Basis unterscheiden sich die Varianten ohne Abdeckung und mit Abdeckung in deren Wärmeübertragungsmechanismen. Durch die Abdeckung werden beispielsweise die nach oben gerichteten Konvektionsströmungen behindert, so dass sich für den Wärmedurchgangskoeffizienten - Modellkennwert c_1 - ein geringerer Wert ergibt. Der windabhängige Wärmedurchgangskoeffizient c_3 wird dagegen durch die Abdeckung erhöht, da durch einen „Tunneleffekt“ unterhalb der Abdeckung eine erhöhte Windgeschwindigkeit gegenüber der Umgebung hervorgerufen wird. Die Wärmeverluste der volumetrischen SLK hängen nicht nur von der Windgeschwindigkeit, sondern auch von der Windrichtung ab. Die Windrichtung wurde während der Messungen am IGTE nicht erfasst, da es bisher auch noch keine Berücksichtigung der Windrichtung in Form eines entsprechenden Modellkennwertes in der Berechnung des Kollektorwirkungsgrades nach ISO 9806 gibt.

Ebenso wie bei dem thermischen SLK vom Typ Charger ist der ermittelte Spitzenwirkungsgrad des PVT SLK vom Typ Krafdachregister, unter Berücksichtigung des Anteils der horizontalen strahlungsabsorbierenden Oberfläche und dessen Anteil an der Bezugsfläche, der Bruttokollektorfläche, als hoch einzuordnen. Wird jedoch der volumetrische Aufbau mit den acht übereinander ausgerichteten Rechteckkanal-Registern (siehe Abbildung 3-2) und die dadurch um ein Vielfaches erhöhte strahlungsabsorbierende Oberfläche berücksichtigt, ist der Spitzenwirkungsgrad selbst für den SLK mit Abdeckung (PVT SLK) plausibel.

Da der Spitzenwirkungsgrad auf die senkrechte Sonneneinstrahlung bezogen wird, beschreiben Einfallswinkelkorrekturfaktoren den Zusammenhang zwischen dem tatsächlichen Einfallswinkel der Sonnenstrahlung und dem dadurch notwendigen Korrekturfaktor des Spitzenwirkungsgrades. Neben den Modellkennwerten müssen an dieser Stelle daher auch die Einfallswinkelkorrekturfaktoren (englisch Incidence Angle Modifier - IAM) der direkten K_b und diffusen K_d Bestrahlungsstärke berücksichtigt werden.

Während der Einfallswinkelkorrekturfaktor der diffusen Bestrahlungsstärke idealisiert über alle Einfallswinkel konstant bleibt, weist der der direkten Bestrahlungsstärke eine ausgeprägte Winkelabhängigkeit auf. Dabei wird der Einfallswinkelkorrekturfaktor der direkten Bestrahlungsstärke in zwei Richtungen des Einfallswinkels θ der Sonnenstrahlung eingeteilt. So unterscheidet sich der transversale Einfallswinkelkorrekturfaktor $K_b(0, \theta_T)$, welcher durch die Tageszeit und dem damit in Zusammenhang stehenden Sonnenstand beeinflusst wird, von dem longitudinalen Einfallswinkelkorrekturfaktor $K_b(\theta_L, 0)$, welcher durch die Jahreszeit und den dieser entsprechenden Sonnenstand beeinflusst wird. Das Produkt der Korrekturfaktoren ergibt den Einfallswinkelkorrekturfaktor der direkten Bestrahlungsstärke $K_b(\theta_L, \theta_T)$.

Während der transversale Einfallswinkelkorrekturfaktor durch mehrere Tagesgänge innerhalb des Messzeitraums messtechnisch bestimmt werden konnte, wurde der longitudinale Einfallswinkelkorrekturfaktor aufgrund des nur zweimonatigen Messzeitraums analytisch bestimmt. Letzterer wird beeinflusst durch die nach Duffie und Beckmann [80] bestimmten Absorptions-

eigenschaften der SLK-Oberfläche sowie durch die Geometrie des SLK und die daraus resultierende Verschattung [81]. Die analytische Bestimmung des longitudinalen Einfallswinkelkorrekturfaktors berücksichtigt beide Einflüsse.

Die Einfallswinkelkorrekturfaktoren wurden sowohl für den thermischen als auch für den PVT SLK bestimmt und sind Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 zu entnehmen. Hierbei entspricht ein Einfallswinkel von 0 ° einer senkrechten und ein Einfallswinkel von 90 ° einer horizontalen Sonneneinstrahlung.

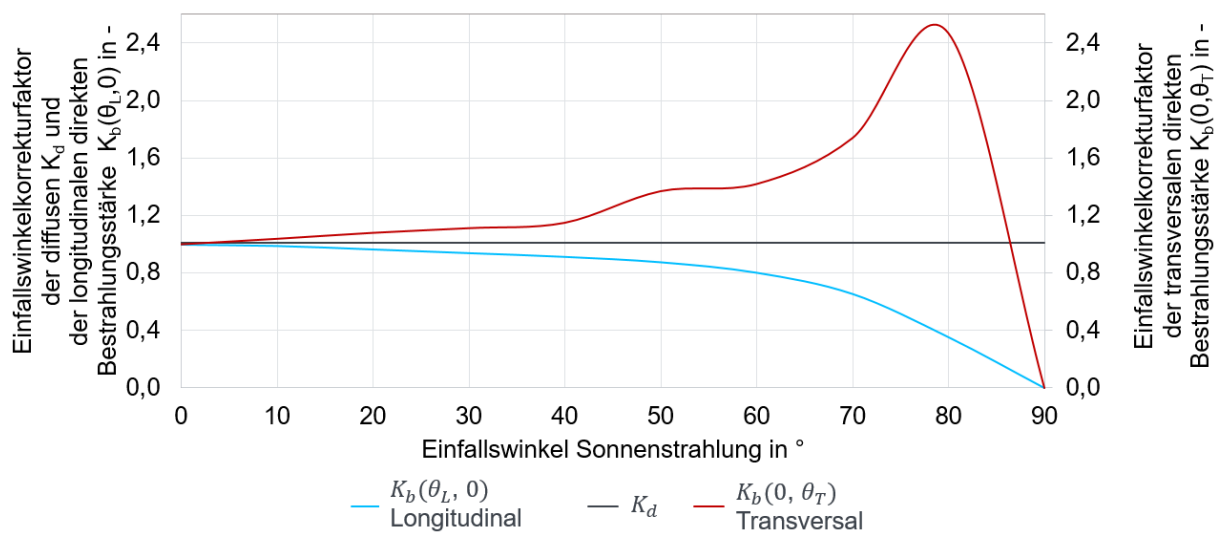


Abbildung 3-3: Einfallswinkelkorrekturfaktoren der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke des thermischen Sonnen-Luft-Kollektors vom Typ Charger

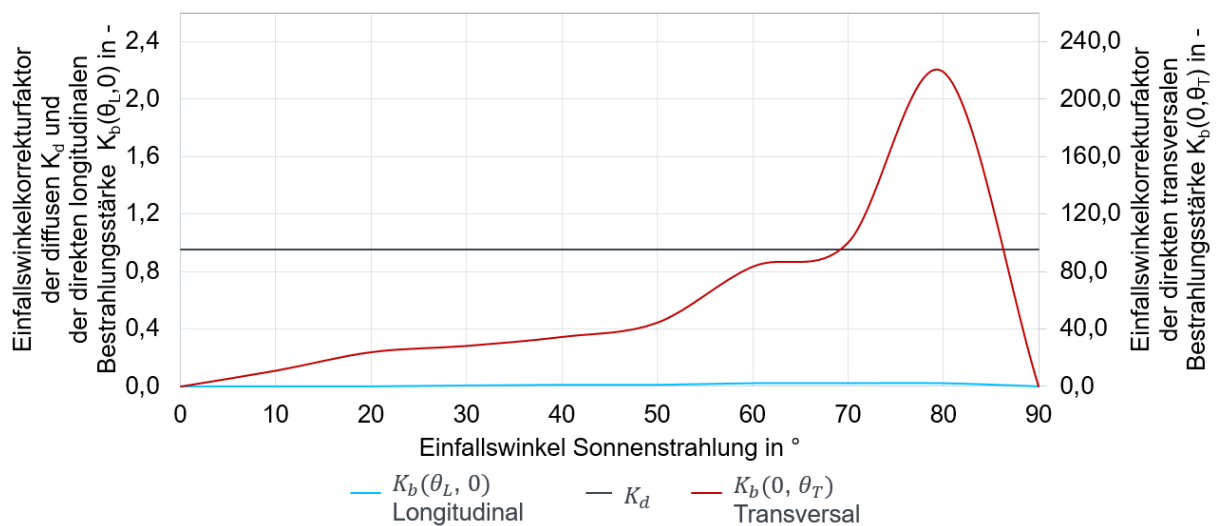


Abbildung 3-4: Einfallswinkelkorrekturfaktoren der direkten und der diffusen Bestrahlungsstärke des PVT Sonnen-Luft-Kollektors vom Typ Kraftdachregister

In Abbildung 3-3 und Abbildung 3-4 ist insbesondere der longitudinale Einfallswinkelkorrekturfaktor des PVT SLK auffällig, welcher aufgrund der Abdeckung und entsprechend hoher Verschattung nicht der üblichen Definition des Einfallswinkelkorrekturfaktors mit dem Wert 1

bei senkrechter Sonneneinstrahlung entspricht. Um weiterhin die gemessenen Kollektorleistungen aus den bestimmten Modellkennwerten und Einfallswinkelkorrekturfaktoren zu erhalten, müssen die Werte des transversalen Einfallswinkelkorrekturfaktors entsprechend hoch sein. Diese sind in Abbildung 3-4 auf der rechten Y-Achse aufgetragen.

Die für die Simulation benötigten Parameter der beiden SLK sowie die ermittelten Modellkennwerte wurden in dem ausgewählten numerischen Kollektormodell, TRNSYS Type 832, hinterlegt. Für die Charakterisierung der Einfallswinkelkorrekturfaktoren werden hier sogenannte IAM-Dateien verwendet.

Um das thermische Verhalten der beiden vermessenen SLK miteinander und mit anderen Kollektorkonzepten vergleichbar zu machen und um eine Bewertung der Kollektorkonzepte für den Einsatz in Anergienetzen (Vgl. AP 3.3, Kapitel 3.3) vornehmen zu können, wurde außerdem ein Gesamtenergieversorgungskonzept der Anlage 1 (Vgl. AP 4.5, Kapitel 0) in der Simulationsumgebung TRNSYS modelliert und zunächst mit einer vereinfachten Regelung simuliert. Für das simulierte Gesamtenergieversorgungskonzept mit vereinfachter Regelung sind beide Kollektorkonzepte mit einer relativen Abweichung der jährlichen solarthermischen Nutzenergie von 3 % als Wärmequelle für Anergienetze geeignet. Weitere Details zur Messung, sowie zu den Simulationsergebnissen und entsprechender Kollektorkonzept-Bewertung sind in Kapitel 3.3 zu finden.

Im Vorhaben wurde ein weiterer PVT Sonnen-Luft-Kollektor mittels einer stationären Messung im dynamischen Sonnensimulator des IGTE, d. h. einer Innen-Messung nach ISO 9806:2017 ermittelt. Der vermessene PVT Sonnen-Luft-Kollektor besteht aus einer Lage eines thermischen Sonnen-Luft-Kollektors und einem darüber angeordneten Photovoltaik-Modul. Insgesamt waren im dynamischen Sonnensimulator drei der PVT Sonnen-Luft-Kollektoren, fortan ebenfalls mit Typ AluKol bezeichnet, nebeneinander aufgebaut. Der PVT Sonnen-Luft-Kollektor des gesamten Prüfaufbaus hat eine Länge von 1,7 m, eine Breite von 3,0 m und eine Höhe von 0,1 m. In Abbildung 3-5 ist der Prüfaufbau als aufgeständerte Flachdachmontagesituation, d.h. ohne rückseitige Plane, im dynamischen Sonnensimulator am IGTE dargestellt.

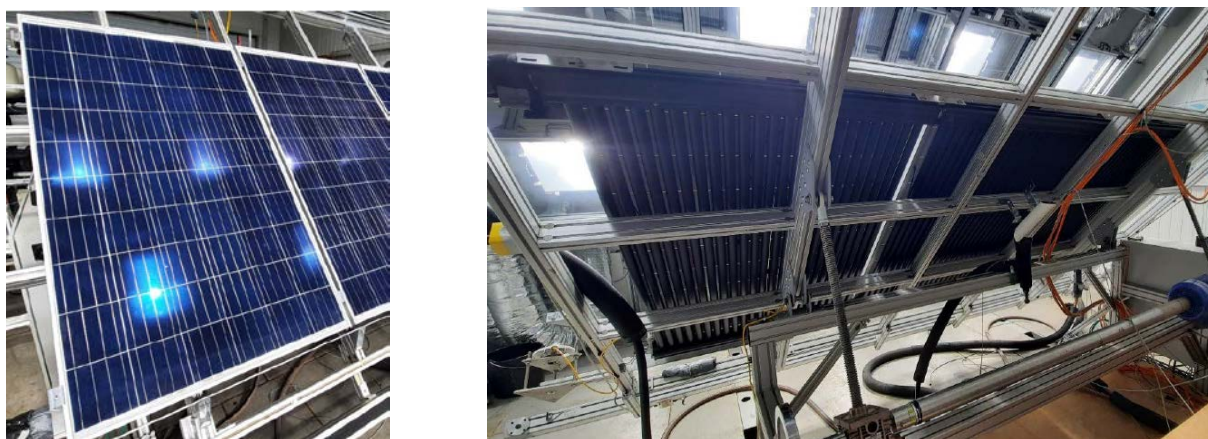


Abbildung 3-5: Front- und Rückseite des PVT Sonnen-Luft-Kollektors vom Typ AluKol im dynamischen Sonnensimulator am IGTE

Der thermische Sonnen-Luft-Kollektor vom Typ AluKol ist in Form einer Harfe, mit 24 schwarz pulverisierten Aluminiumrohren (32 mm Außendurchmesser) und verbindenden quadratischen Sammlerkanälen (70 mm x 70 mm) aufgebaut.

Die Bestimmung der Wärmeleistung fand unter verschiedenen stationären Umgebungsbedingungen und bei unterschiedlichen Kollektoreintrittstemperaturen statt. So wurden die messtechnischen Untersuchungen zunächst bei einer Bestrahlungsstärke von ca. 1.000 W/m², einer Umgebungsbedingung von ca. 25 °C und unterschiedlichen Eintrittstemperaturen von ca. 10 bis 60 °C durchgeführt. Im Anschluss wurden Messungen ohne Bestrahlungsstärke, bei einer Umgebungsbedingung von ca. 25 °C und unterschiedlichen Eintrittstemperaturen von ca. 10 bis 40 °C durchgeführt, so dass sowohl die Bedingungen für einen exemplarischen Tag als auch die für eine exemplarische Nacht abgebildet werden können. Die mittlere Windgeschwindigkeit betrug für alle Messungen 1,8 m/s. Die elektrische Energie der PV-Module wurde nicht abgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3-7 (Gegenüberstellung der Wärmedurchgangskoeffizient α_1 verschiedener Kollektorausführungen.) gelistet.

Aus Untersuchungen innerhalb dieses Forschungsprojektes und den Erfahrungen der Firma VCS ist weiterhin bekannt, dass der Einfluss der Konvektion auf die Wärmeleistung von PVT-Sonnen-Luft-Kollektoren nicht vernachlässigbar ist. Aus diesem Grund wurde der Prüfaufbau einmal freistehend, zur Abbildung einer aufgeständerten Flachdachmontage und einmal mit dahinter angebrachter Plane, zur Abbildung einer Aufdachmontage, vermessen. Der Neigungswinkel des PVT-Sonnen-Luft-Kollektoren betrug für beide Fälle 45 °.

Da die ermittelten Wärmeleistungen aus einer stationären Innen-Messungen nach ISO 9806 und nicht aus einer quasi-dynamischen Außen-Messungen nach EN 12975 resultieren, können daraus keine Modellkennwerte, für den TRNSYS Type zur Modellierung von ungedeckten PVT-Sonnen-Luft-Kollektoren, abgeleitet werden. Die aus der Messung gewonnenen Erkenntnisse bilden jedoch die Basis für die Entwicklung eines PVT-Sonnen-Luft-Kollektors, für welchen der nachfolgend beschriebene Anforderungskatalog erstellt wurde.

3.1.2 Anforderungskatalog für einen neuen PVT Sonnen-Luft-Kollektor

Einsatzbereich:

- als Wärmequelle für Wärmepumpen,
- zur Beheizung (Regeneration) von Eisspeichern
- oder zur Regeneration von Erdwärmesonden.

PVT-Sonnen-Luft-Kollektoren bieten Potenzial für eine maximierte Energieerzeugung auf begrenzten Flächen, insbesondere Dachflächen. Eingesetzt als Wärmequelle für eine Wärmepumpe können sie mit einem verhältnismäßig niedrigen Kollektortemperaturniveau zu einem erhöhten elektrischen Ertrag führen. Weiterhin können sie insbesondere in Kombination mit Eisspeichern oder Erdwärmesonden zu einem ganzjährig sicheren und energie-effizienten Wärmepumpenbetrieb führen.

Im Anforderungskatalog werden Kundenanforderungen den technischen Anforderungen vorrangestellt, um davon die technischen Anforderungen ableiten zu können. Solche Kundenanforderungen sind beispielsweise:

- Als Anlagenbetreiber erwarte ich eine lange Lebensdauer des Kollektors, um teure Wartungs- und Austauscharbeiten zu vermeiden.
- Als Anlagenbetreiber erwarte ich einen hohen elektrischen Jahresertrag, um hier eine hohe Wirtschaftlichkeit durch Einspeisevergütung oder vermiedenen Netzbezug zu erreichen.
- Als Planer erwarte ich, dass der Kollektor sich hydraulisch einfach an eine Wärmepumpe anbinden lässt, um aufwendige Übergabestellen wie Pufferspeicher oder Wärmeübertrager zu vermeiden.
- Als Planer möchte ich eine hohe Flächeneffizienz, um benötigten Aufstellplatz für die Kollektoren zu sparen.
- Als Planer möchte ich eine klare Planungs- und Betriebsanleitung aus der hervorgeht, welche Eigenschaften sich abhängig von der Aufstellungssituation ergeben und wie dies in der Auslegung zu berücksichtigen ist.
- Als Planer möchte ich die Kollektoren sowohl auf einem Flachdach als auch auf einem Schrägdach einsetzen können, wünschenswerterweise auch an Fassaden oder frei aufgestellt, um unabhängig vom Gebäude die Planung der Anlagen durchzuführen.
- Als Installateur möchte ich eine handhabbare Größe der Kollektoren, um bei Bedarf auch ohne Hilfsgeräte wie Kran die Montage mit 2 Personen durchführen zu können.
- Als Planer möchte ich Montagezubehör für alle Dacheindeckungen, um bei der Anlagenplanung unabhängig von der Ausführung des Dachs zu sein.
- Als Architekt möchte ich ein „unsichtbares“ Produkt für die Flachdachmontage, um den Anblick störender Aufbauten zu vermeiden.
- Als Planer möchte ich den Kollektor unabhängig von der Gebäudehöhe einsetzen können, um sämtliche Gebäudetypen damit ausrüsten zu können.
- Als Planer möchte ich die Vorschriften, Normen und gesetzliche Anforderungen bei allen Montagearten des Kollektorfeldes einfach erfüllen können, um für den Kunden keine Mehrkosten bei der Installation zu verursachen.
- Als Installateur möchte ich vorgefertigtes Zubehör für die Montage, um Arbeitszeit auf der Baustelle zu sparen.
- Als Installateur möchte ich am höchsten Punkt entlüften können, um das Spülen und Befüllen zu erleichtern.
- Als Installateur möchte ich eine definierte ggf. vorgefertigte Position für Messtechnik (z. B. Blindstutzen für Tauchhülse) haben, um bei der Installation nicht improvisieren zu müssen.

Diese technischen Anforderungen werden nun in einzelne Sachbereiche mit konkreten Anforderungen untergliedert, die später am entwickelten PVT-Hybrid-Kollektor überprüft werden können. Mechanische Eigenschaften und thermische Eigenschaften werden im Folgenden etwas ausführlicher erläutert, einerseits zur Darstellung der Formulierung und andererseits zur Verdeutlichung des Unterschiedes von Anforderungen, welche auf einem breiten Erfahrungsschatz beruhen oder auch nicht. Insbesondere bei der Einordnung von Einzelkomponenten in ein Gesamtkonzept ergeben sich teilweise die genauen Anforderungen erst aus einem größeren Erfahrungsschatz in realen Anlagen oder aus der Abbildung eines Gesamtsystems in einer Simulation.

So sind typische mechanische Eigenschaften, welche basierend auf weitreichenden Erfahrungen mit Solarkollektoren sehr konkret formuliert werden können, beispielsweise:

- Das maximale Gewicht des Kollektors bzw. der Einzelteile für die Montage muss unter 40 kg liegen.
- Die maximalen Abmessungen des Kollektors bzw. der Einzelteile für die Montage müssen kleiner als 1,5 m x 3 m x 0,5 m sein.
- Die maximale Abmessung des Kollektors inkl. Verpackung für den Transport dürfen 2,3 m x 3,3 m x 1 m nicht überschreiten.
- Das maximale Gewicht der verpackten Einheit für den Transport muss unter 100 kg liegen.
- Auf dem Flachdach darf die maximale Aufbauhöhe des Kollektors maximal 0,5 m über der Dachhaut betragen.

Die thermischen Eigenschaften hingegen ergeben sich aus den noch relativ neuen Anwendungsbereichen und basieren noch nicht auf einem solch breiten Erfahrungsschatz beim Einsatz in einer Gesamtanlage. Daher sind diese Anforderungen noch weniger konkret und gegebenenfalls einer weiteren Entwicklung mit der fortschreitenden Anwendung unterworfen.

Eine vorhergehende Analyse hat gezeigt, dass für einen Sonnen-Luft-Kollektor als Wärmequelle für eine Wärmepumpe vorwiegend die konvektiven Wärmegewinne relevant sind und bei Konzepten ohne Ventilator die freie Windanströmung für die Verfügbarkeit der Wärmequelle Luft wichtig ist. Pro 1 kW Heizleistung sollte ein konvektiver UA-Wert der Kollektorfläche (hier die auf dem Dach benötigte Bruttofläche) von 250 W/K erreicht werden.

Während abgedeckte PVT-Sonnen-Luft-Kollektoren aufgrund ihres geringen Wärmeübergangs nicht als Quelle für eine Wärmepumpe geeignet sind, können optimierte ungedeckte PVT Sonnen-Luft-Kollektoren bei einer fünffachen Fläche (50 m²) gegenüber einem optimierten Luft/Sole-Absorber (10 m²) UA-Werte erreichen, welche vergleichbar sind mit dem Wärmeübertrager einer handelsüblichen Luft/Wasser-Wärmepumpe mit einer thermischen Leistung von 6 kW. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Umwälzpumpe für die Quellenseite einer solchen Anlage weniger Strom benötigt als der Ventilator einer vergleichbaren Luft/Wasser-Wärmepumpe.

Hemmende Faktoren für Sonnen-Luft-Kollektor-Systeme sind die zurzeit hohen Installationskosten sowie der vergleichsweise hohe Flächenbedarf, welcher der ursprünglichen Motivation der effizienten Nutzung eines begrenzten Flächenangebots widerspricht.

Ergänzend wurden weitere technische Anforderungen für folgende Sachbereiche formuliert:

- hydraulische Eigenschaften
- elektrische Eigenschaften
- Einsatzbedingungen
- Werkstoffe
- Lebensdauer
- Zuverlässigkeit
- Kosten

Das Kollektorfeld muss, ergänzend zu den Anforderungen an den Wärmetransport im einzelnen Kollektor, folgende weitere Anforderungen erfüllen:

- Einfache Hydraulik für eine typische thermische Leistung, d. h. zwei bis maximal fünf parallel geschaltete Teilfelder bei einer Gesamtleistung von 100 kW
- Druckverlust über das gesamte Kollektorfeld inkl. Armaturen für den hydraulischen Abgleich, unter 500 mbar
- Druckverlust über den Einzelkollektor zwischen 50 und 150 mbar

Basierend auf diesen Anforderungen erfolgt die Ausarbeitung von Konzepten. Hierbei ist vor allem das thermische Lösungskonzept von Interesse, wohingegen beispielsweise das elektrische Konzept auf die Nutzung von marktgängigen PV-Modulen eingeschränkt wird.

Eine erste Konzeptidee, den thermischen Wärmeübergang durch eine Zwangsströmung auf der Luftseite zu verbessern, wurde verworfen. Bei dieser Idee wird der Luftstrom durch einen Kanal unterhalb der PV-Module geführt und anschließend an einen zentralen Luft-Wasser-Wärmeübertrager klassischer Bauart (Lamellen-Wärmeübertrager) geleitet. Bei geringeren thermischen Leistungen von 1 bis 10 kW erscheint die Idee zielführend, sie scheitert aber bei den hier geforderten größeren Leistungen: Es müssen zu viele, kleine Einheiten von wenigen kW zu dem Gesamtfeld verschaltet werden. Die Verbesserung beim Wärmeübergang muss durch erhebliche Mehrkosten für Mechanik, Lüfter, Verkabelung und weiterhin aufwendige Hydraulik bezahlt werden.

Es bleibt daher für den hier zu entwickelnden PVT-Hybridkollektor bei einer passiven Anströmung durch freie Konvektion und Wind. Es wurden mehrere Installationen mit PVT-Kollektoren hinsichtlich der Baukosten analysiert. Um einen realistischen Vergleich zu bekommen, wurden nur Anlagen mit Bauformen basierend auf dem thermischen Register des Solar-Luft-Kollektors „Alukol“ ausgewertet, konkret mit Längen des Registers von 3 m und 1,5 m. Umgerechnet auf eine gleiche Kollektorfläche liegen die Montagekosten bei der kleinen Variante um 50 % höher, verursacht durch die doppelte Anzahl der hydraulischen Anschlüsse.

Eine Konstruktionsart dieses PVT-Kollektors mit dem 1,5 m langen Register ist in der folgenden Abbildung 3-6 dargestellt.

Bei einer genaueren Betrachtung des Wärmetransports hat sich gezeigt, dass an folgenden Punkten eine Verbesserung nötig ist:

- Gleichverteilung der Strömung im Kollektorfeld, basierend auf den Untersuchungsergebnissen der 4 parallel geschalteten Felder der Versuchsanlage 2
- Gleichverteilung der Strömung im Kollektor (siehe Ergebnisse unten)
- Luftseitige Anströmung des thermischen Registers beim Einbau des Kollektors in ein Gesamtfeld, da der PVT-Kollektor der Anlage 2 hier ein unerwartet schlechtes Verhalten aufwies

Im Projektteam wurde entschieden, dies entgegen der Planung dies ausschließlich durch CFD-Simulationen zu untersuchen. Die Vielzahl von Varianten ließen sich nur mit erheblichem Aufwand als Prototypen bauen und vermessen. Die Übereinstimmung der Simulationen mit den Messungen am Typ Alukol diente zur ersten Validierung. Die CFD-Simulationen wurden firmenintern von VCS durchgeführt. Untersucht wurden die beiden in Abbildung 3-7 dargestellten Aufstellvarianten.

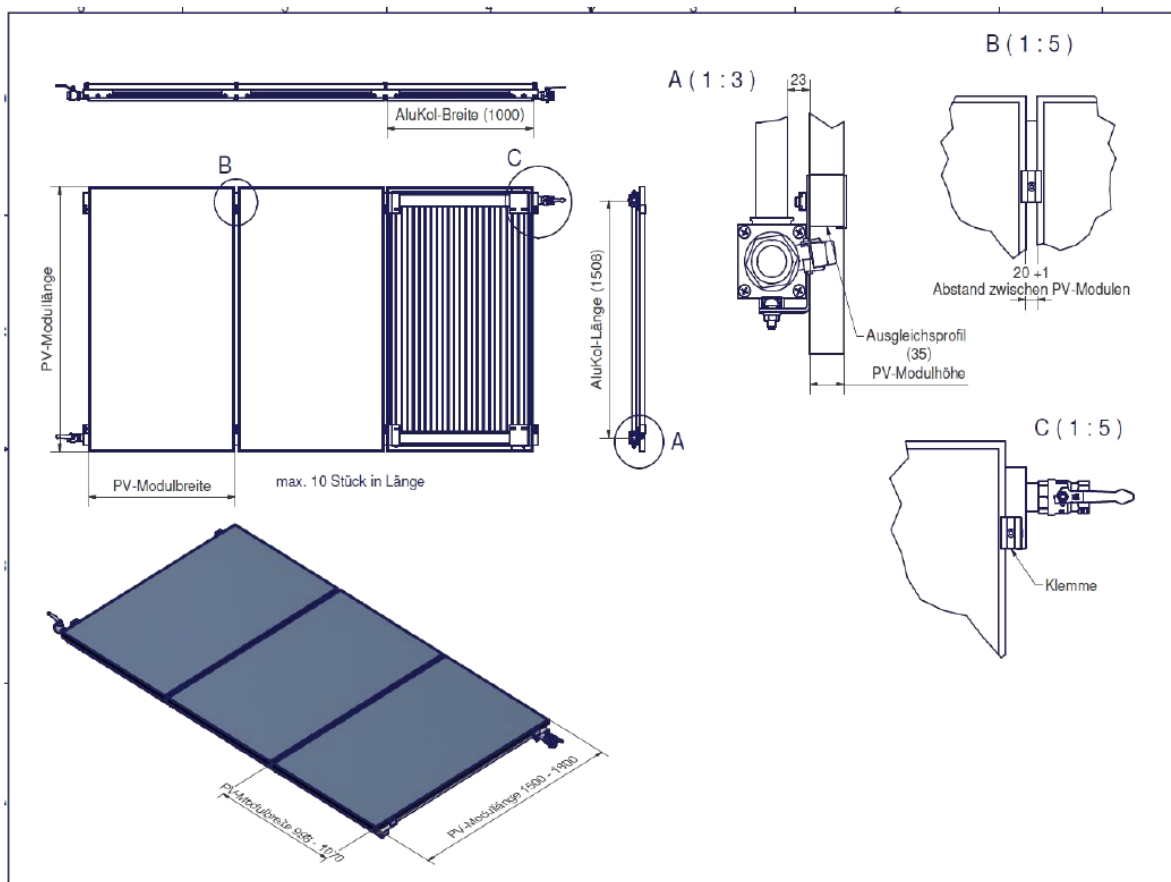


Abbildung 3-6: Konstruktionsentwurf des PVT-Moduls.

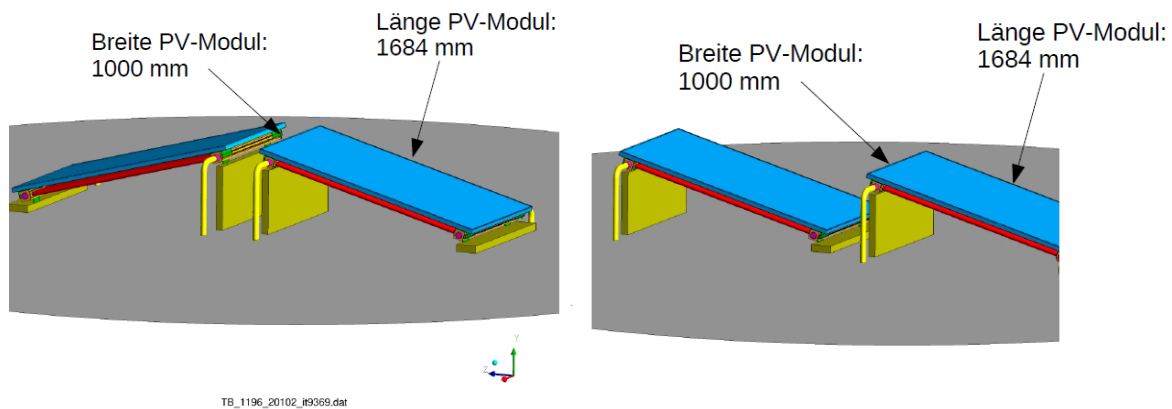


Abbildung 3-7: PVT-Module in den beiden untersuchten Aufstellvarianten „Dachaufstellung“ (links) und „gleichgerichtete Aufstellung“ (rechts). In dieser Konzeptidee werden Betonsteine, dargestellt als flache gelbe Bauteile, sowohl als nötige Beschwerung der Module als auch als Statik der Aufständering genutzt.

Die Randbedingungen für die Ermittlung der thermischen Leistung sind:

- Wind:
 - 0 m/s
 - 1,8 m/s in positive z-Richtung
 - 1,8 m/s in negative z-Richtung
 - 1,8 m/s in x-Richtung
- Volumenstrom des Fluids (Wasser) pro Register mit 1,5 m² Fläche: 225 l/h

Die Ergebnisse der CFD-Simulationen der in Abbildung 3-2 dargestellten Aufstellvarianten sind in Abbildung 3-8 und Abbildung 3-9 dargestellt.

Hierbei sind die Ergebnisse der Windströmung in x-Richtung, also quer zum Register, nur informativ. Die Aufstellung des PVT-Kollektors wird selten nur aus einzelnen Modulen bestehen, sondern meist aus langen Reihen, so dass eine Windströmung in x-Richtung nur am Rand ihre volle Wirkung entfalten kann.

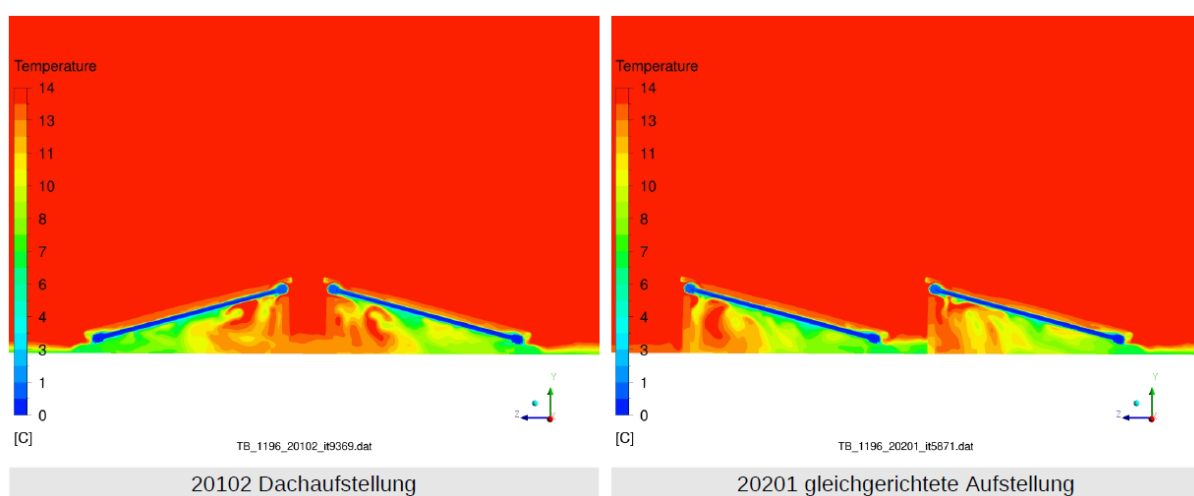


Abbildung 3-8: Temperaturverteilung ohne Wind für beide Aufstellarten. Deutlich ist der entstehende „Kaltluftsee“ unterhalb der Module zu erkennen

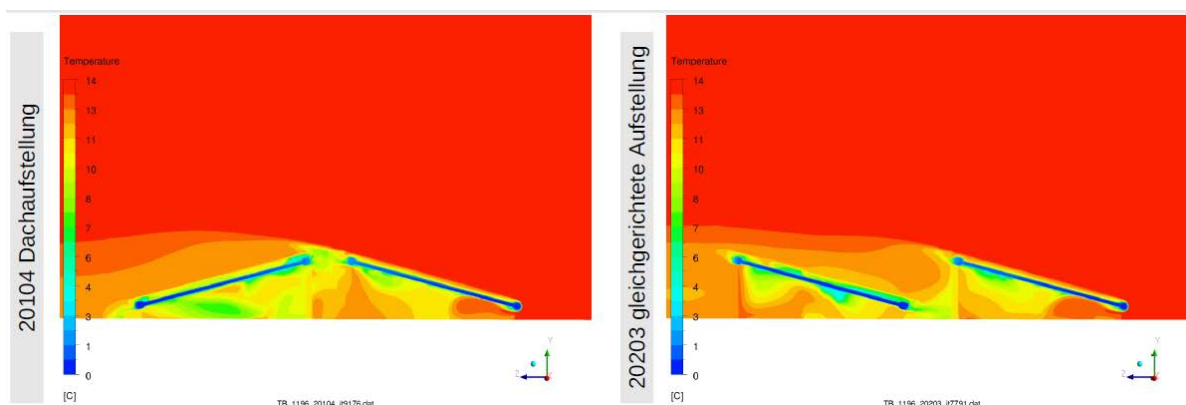


Abbildung 3-9: Temperaturverteilung bei Wind mit einer Geschwindigkeit von 1,8 m/s in positiver z-Richtung d. h. „Wind von rechts nach links“ für beide Aufstellarten.

Der nachteilige Einfluss der Betonsteine wird deutlich, da die kalte Luft trotz Wind unter dem Kollektor stehen bleibt. Der in Tabelle 3-3 dargestellte Vergleich der thermischen Leistung der beiden Aufstellarten bei weiteren Situationen zeigt, dass keine der Aufstellarten einen entscheidenden Vorteil bietet:

Tabelle 3-3: Vergleich der thermischen Leistung bzw. der übertragenen Wärme bei unterschiedlichen Aufstellvarianten mit Betonsteinen

Nr.	Variante	Wind	Übertragene Wärme		
			links	rechts	gesamt
		[m/s]	[W]	[W]	
20102	Dachaufstellung	0	213	213	426
20103	Dachaufstellung	$v_x = 1,8$	557	564	1121
20104	Dachaufstellung	$v_z = 1,8$	376	453	829
20201	gleichgerichtet	0	211	212	423
20202	gleichgerichtet	$v_x = 1,8$	542	548	1090
20203	gleichgerichtet	$v_z = 1,8$	396	443	839
20204	gleichgerichtet	$v_z = -1,8$	480	367	847

In einem nächsten Schritt wurden die Betonsteine aus dem Rechenmodell entfernt. In Abbildung 3-10 sind die beiden untersuchten Varianten dargestellt.

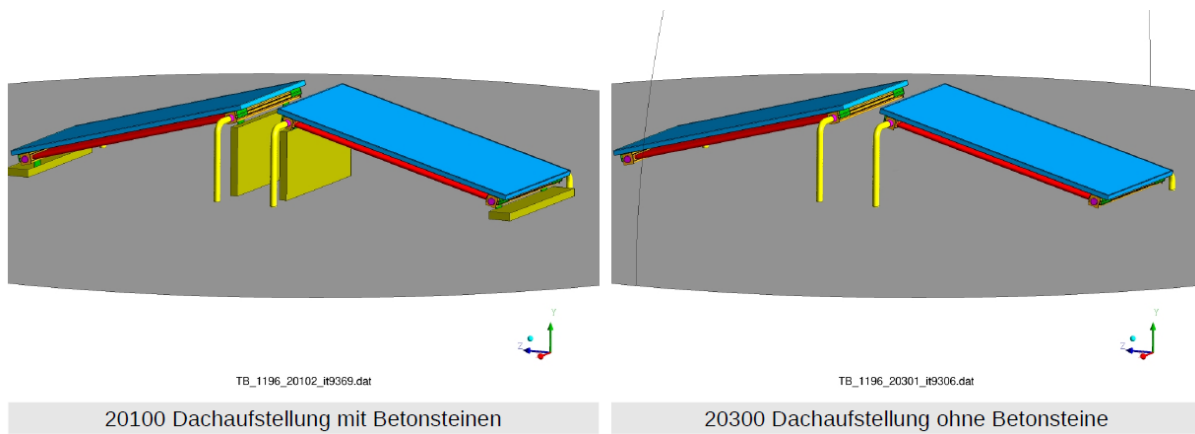


Abbildung 3-10: PVT-Module in „Dachaufstellung“ mit (links) und ohne Betonsteine (rechts).

Die Ergebnisse der CFD-Simulationen mit einer Windgeschwindigkeit von 1,8 m/s zeigt Abbildung 3-11. Es ist ersichtlich, dass das Weglassen der Betonsteine zu deutlich veränderten Strömungsverhältnissen führt.

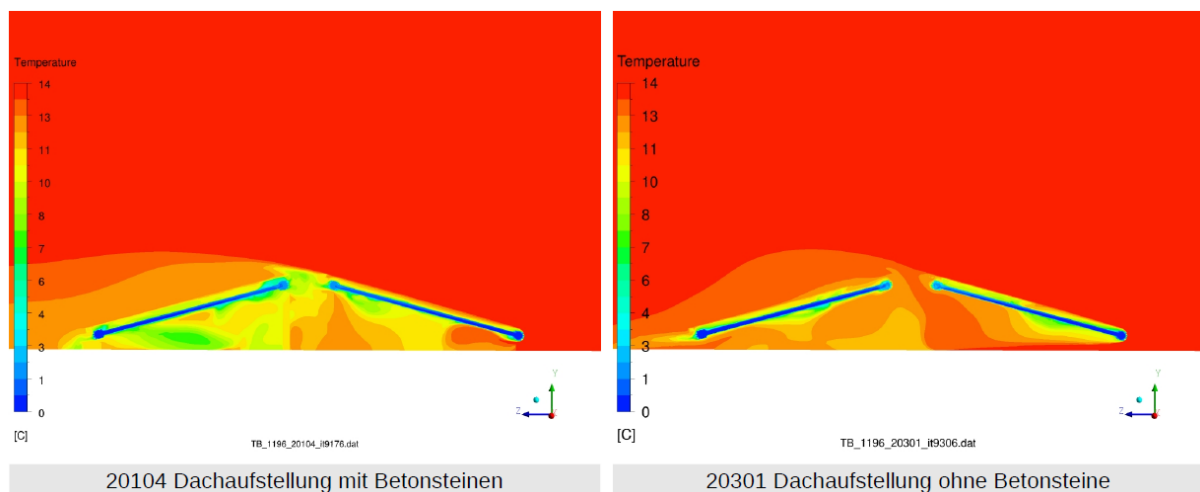


Abbildung 3-11: Temperaturverteilung für die Dachaufstellung mit und ohne Betonsteine bei 1,8 m/s Windgeschwindigkeit

In der Tabelle 3-4 sind die Ergebnisse der CFD-Simulationen im Hinblick auf die thermische Leistung bzw. die übertragene Wärme für die Dachaufstellung mit und ohne Betonsteinen zusammengefasst.

Tabelle 3-4: Vergleich der thermischen Leistung bzw. der übertragenen Wärme mit und ohne Betonsteine

Nr.	Variante	Wind	Übertragene Wärme		
			links	rechts	gesamt
		[m/s]	[W]	[W]	
20102	Dachaufstellung	0	213	213	426
20104	Dachaufstellung	vz = 1,8	376	453	829
20302	Dachaufstellung ohne Beton	0	212	215	427
20301	Dachaufstellung ohne Beton	vz = 1,8	522	502	1024

In einem weiteren Schritt wurde der Abstand zwischen PV-Modul und thermischem Register variiert. Als Grenze wurde eine Variante ohne PV-Modul, d. h. „unendlicher Abstand“, berechnet. In Abbildung 3-12 sind die drei berechneten Konfigurationen mit unterschiedlichen Abständen zwischen PV-Modul und thermischem Register dargestellt. In der Tabelle 3-5 ist die thermischen Leistung bzw. die übertragene Wärme für unterschiedliche Abstände zwischen PV-Modul und thermischem aufgelistet.

Es zeigt sich, dass der Abstand einen relativ geringen Einfluss auf die thermische Leistung aufweist. Nur bei der Variante ohne PV ergibt sich eine signifikant höhere thermische Leistung bzw. übertragene Wärme.

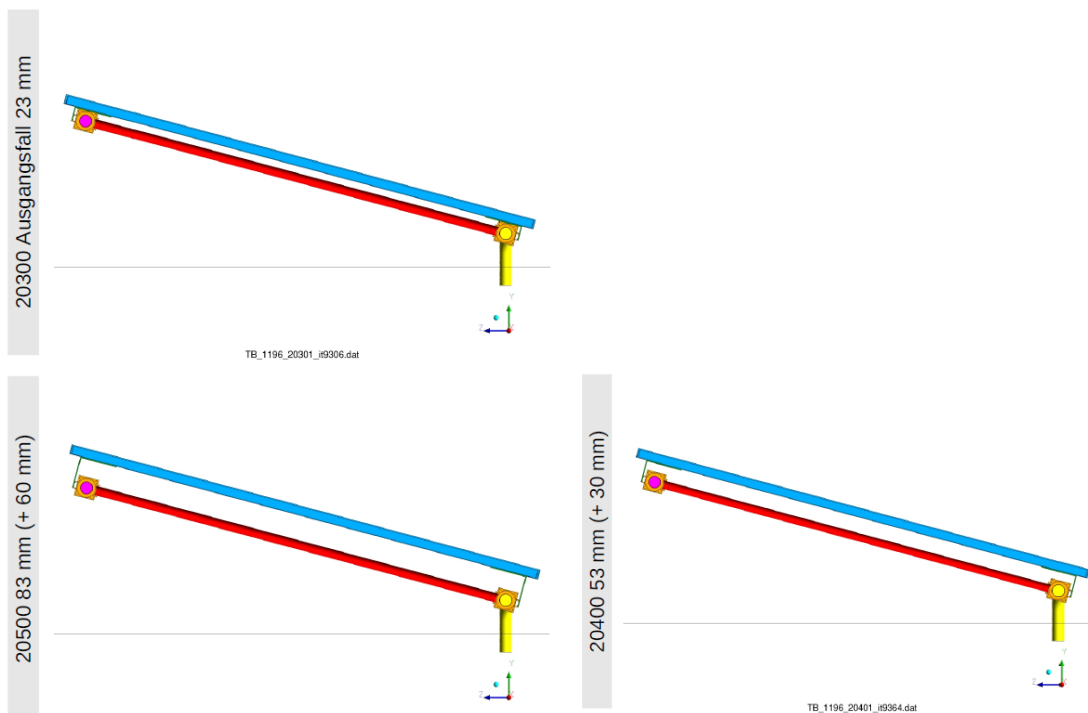


Abbildung 3-12: Variation des Abstands zwischen PV-Modul und thermischem Register.

Tabelle 3-5: Vergleich der thermischen Leistung bzw. der übertragenen Wärme für unterschiedliche Abstände zwischen PV-Modul und thermischem Register

Nr.	Variante	Wind	Übertragene Wärme		
			links	rechts	gesamt
		[m/s]	[W]	[W]	
20301	Dachaufstellung ohne Beton	vz = 1,8	522	502	1024
20401	Dachaufstellung ohne Beton, +30mm	vz = 1,8	624	498	1122
20501	Dachaufstellung ohne Beton, +60mm	vz = 1,8	712	514	1226
20601	Dachaufstellung, ohne Beton, ohne PV	vz = 1,8	804	805	1609

Um die Anzahl der hydraulischen Anschlüsse zu reduzieren, wurde in einem weiteren Schritt statt der beiden Rohrregister unter den PV-Modulen ein Modell mit einem größeren horizontal angeordneten Register und darüber aufgestellten PV-Module betrachtet (vgl. Abbildung 3-13) Die Ergebnisse der CFD-Simulationen im Hinblick auf die sich einstellende Temperaturverteilung sind für das horizontale und das schräge Register sind in Abbildung 3-14 dargestellt.

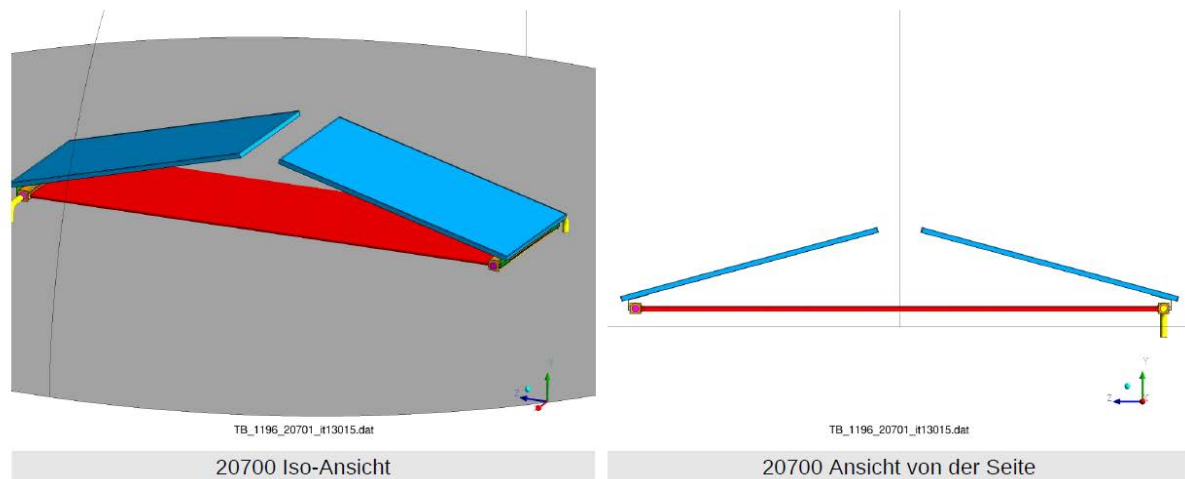


Abbildung 3-13: Variante mit einem horizontalem Rohrregister unter den Modulen.

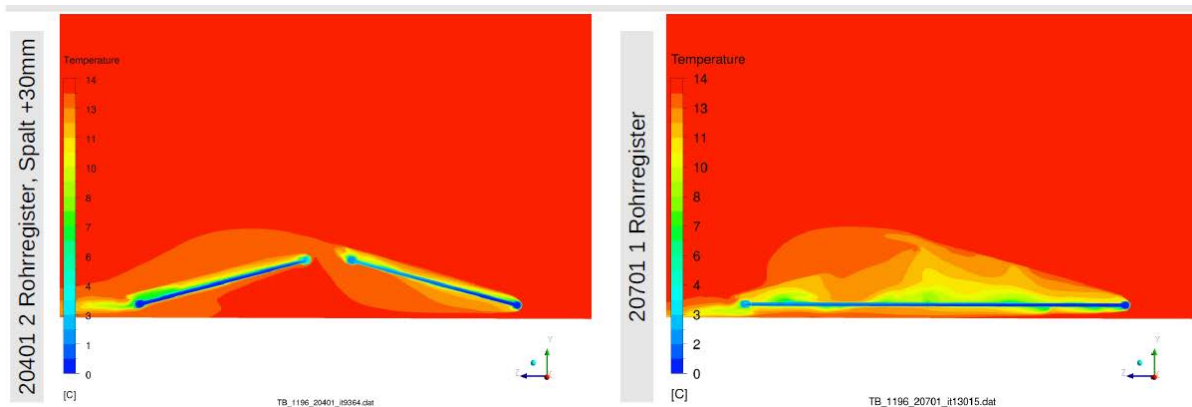


Abbildung 3-14: Temperaturverteilung bei Windgeschwindigkeit 1,8 m/s (z-Richtung) bei zwei Varianten des PVT-Kollektors: links mit schrägem Register und einem PV-Modul im Abstand von 53 mm (23+30 mm) nach Abb. 1.3.1.5, rechts des horizontalen Registers nach Abb. 1.3.1.6. Deutlich zu erkennen ist die geringe Lufttemperatur bei der horizontalen Variante, die trotz Wind auftritt.

In der Tabelle 3-6 sind die Randbedingungen, d. h. Eingangsgrößen bzw. Parameter sowie die aus den Berechnungen resultierende thermischen Leistung bzw. die übertragene Wärme für sämtliche durchgeführten CFD-Simulationen zusammengefasst.

Aus den bisher durchgeführten Untersuchungen lassen folgende Schlüsse ziehen:

- Die Montageart „Dachaufstellung“ oder „gleichgerichtete Aufstellung“ haben wenig Einfluss auf das wärmetechnische Verhalten
- Eine bodennahe, horizontale Anordnung des thermischen Registers ist nachteilig.
- Zwischen thermischem Register und PV-Modul muss ausreichend Platz für die Luftströmung sein.

Tabelle 3-6: Zusammenstellung der Randbedingungen und Ergebnisse sämtlicher durchgeführter CFD-Simulationen

Nr.	Variante	Wind	Übertragene Wärme		
			links	rechts	gesamt
		[m/s]	[W]	[W]	
20102	Dachaufstellung	0	213	213	426
20103	Dachaufstellung	vx = 1,8	557	564	1121
20104	Dachaufstellung	vz = 1,8	376	453	829
20201	gleichgerichtet	0	211	212	423
20202	gleichgerichtet	vx = 1,8	542	548	1090
20203	gleichgerichtet	vz = 1,8	396	443	839
20204	gleichgerichtet	vz = -1,8	480	367	847
20302	Dachaufstellung ohne Beton	0	212	215	427
20301	Dachaufstellung ohne Beton	vz = 1,8	522	502	1024
20401	Dachaufstellung ohne Beton, +30mm	vz = 1,8	624	498	1122
20501	Dachaufstellung ohne Beton, +60mm	vz = 1,8	712	514	1226
20601	Dachaufstellung, ohne Beton, ohne PV	vz = 1,8	804	805	1609
20701	PV Dach, rohre waagrecht	vz = 1,8	-	-	991
20801	PV Dach, rohre waagrecht, +30mm	vz = 1,8	-	-	1007

Zusätzlich zum Wärmeübergang und der Temperatur der Luft wurde die Strömung auf der Fluidseite (Wasser) im Register untersucht. Für beiden Varianten mit 1,5 m und 3 m Registerlänge zeigt sich eine extrem ungleichmäßige Verteilung der Strömung, wie in Abbildung 3-15 an den Temperaturen des Fluids im Register zu erkennen ist.

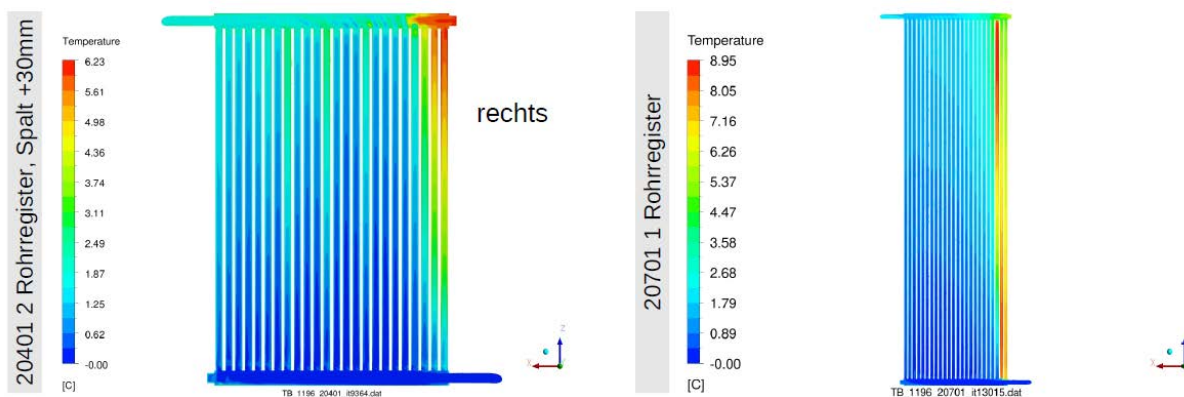


Abbildung 3-15: Temperaturen im Register, bei 1,5 m Länge (links) und bei 3 m Länge (rechts)

Die schlechte Temperaturverteilung zeigt, dass hier ein deutliches Optimierungspotential besteht. Dies soll in weiteren Betrachtungen durch Variation des Rohrdurchmessers, der Anzahl der Rohre im Register und der Anordnung von Rippen außen an den Rohren verbessert werden.

Im nächsten Schritt wurden die Messungen der verschiedenen Varianten von PVT-Hybridkollektoren zusammengetragen und durch das IGTE mittels einer Umrechnung der aus verschiedenen Messverfahren resultierenden Kennwerte auf einen einheitlichen, vergleichbaren Stand gebracht. Für PVT-Hybridkollektoren, die als Quelle in Eisspeicheranlagen eingesetzt werden, ist ein möglichst hoher Wärmedurchgangskoeffizient a_1 an die Umgebungsluft zu erreichen. Der Anteil der solaren Wärmegewinne ist für diese Anwendung untergeordnet, so dass den entsprechenden optischen Eigenschaften des PVT-Hybridkollektoren eine untergeordnete Bedeutung zukommt.

Die für die verschiedenen Kollektorausführungen für den Wärmedurchgangskoeffizient a_1 ermittelten Werte sind in Tabelle 3-7 aufgeführt.

Tabelle 3-7: Gegenüberstellung der Wärmedurchgangskoeffizient a_1 verschiedener Kollektorausführungen. Die Prüfungen der Kollektoren ohne Angabe einer externen Referenz wurden vom IGTE durchgeführt.

Typ	Prüfberichtsnr.:	a_1 W/(m²K)
SLK Solar-Luftabsorberzaun	18SU089	59
SLK-600	16COL1347	110
Solarabsorber aquatherm black-system Heiz-/Kühlregister	18SU088	70
Kraftdachregister	17SU085	18
Roth Solarabsorber	17SU085	15
Isocal SLK-S (mit Bewicklung parallel zur Absorberfläche)	TÜV 21221391	58
AluKol mit PV	21SU124	30
AluKol mit PV mit "Rückwand"	21SU124	26
Alukol 2xquer	19SU91	59
Charger 8-lagig	(sol4city)	47
Charger 8-lagig abgedeckt (PVT)	(sol4city)	34

Die Ergebnisse aus den CFD-Rechnungen stimmen gut mit den Messungen am Typ AluKol überein. Für die weitere Entwicklung wird jedoch aufgrund der besseren Ergebnisse der Messungen, d. h. der höheren Werte des Wärmedurchgangskoeffizienten a_1 , die Geometrie des SLK-600 verwendet. Für den Alukol mit PV-Abdeckung und einer Fläche von 5 m² ergibt aus

Prüfbericht 21SU124 des IGTE folgende Leistungswerte ohne solare Einstrahlung bei einer Windgeschwindigkeit von 1,8 m/s eine thermische Leistung von ca. 1800 W bei -9,4 K mittlerer Temperaturdifferenz Kollektor-Umgebung, das entspricht einem Wärmedurchgangskoeffizient von 38,3 W/m²/K.

Aus den CFD-Rechnungen ergibt sich für eine Absorberfläche von 1,5 m² und etwa 60 mm Abstand PV-Modul zu Absorber eine Leistung von 710 W bei 1,8 m/s Wind und einer mittleren Temperaturdifferenz von etwa 12,6 K. Umgerechnet auf eine Wärmeübergang entspricht dies (= 37,6 W/m²/K).

Bei größeren Feldern von Kollektoren muss deren gegenseitige Beeinflussung berücksichtigt werden. Dies Aspekt soll mittels weiter CFD-Rechnungen untersucht werden, bei denen das Kollektorfeld optimiert wird. Es wurden zunächst weitere Szenarien in CFD-Simulationen untersucht. Dabei wurden bislang zu wenig beachtete Effekte erkannt, die zu Kaltluftseen unterhalb der Kollektoren führen. Sie entstehen durch ein strömungsdynamisches Zusammenspiel von Wind, Attika sowie Kollektor und machen die Kollektoren am Dachrand ineffizient. Entgegen dem ursprünglichen Plan wurde vom Prototypenbau abgesehen und dieser Effekt weiter im CFD untersucht sowie der Aufbau der Kollektoren optimiert.

Bei größeren Feldern von Kollektoren muss deren gegenseitige Beeinflussung berücksichtigt werden. Dies Aspekt soll mittels weiter CFD-Rechnungen untersucht werden, bei denen das Kollektorfeld optimiert wird. Es wurden zunächst weitere Szenarien in CFD-Simulationen untersucht. Dabei wurden bislang zu wenig beachtete Effekte erkannt, die zu Kaltluftseen unterhalb der Kollektoren führen. Sie entstehen durch ein strömungsdynamisches Zusammenspiel von Wind, Attika sowie Kollektor und machen die Kollektoren am Dachrand ineffizient. Entgegen dem ursprünglichen Plan wurde vom Prototypenbau abgesehen und dieser Effekt weiter im CFD untersucht sowie der Aufbau der Kollektoren optimiert.

Im ersten Schritt wurde eine Geometrie der Absorberrohre unter dem Kollektor entworfen und schrittweise optimiert. Basis der Geometrie ist ein Kollektorfeld des SLK 600.



Abbildung 3-16: Kollektorfeld des SLK 600

Über den Kollektoren werden in leicht geneigter Aufständering die PV-Module montiert. Der Raum unter den Modulen wird möglichst optimal mit Wärmeübertragerrohren belegt.

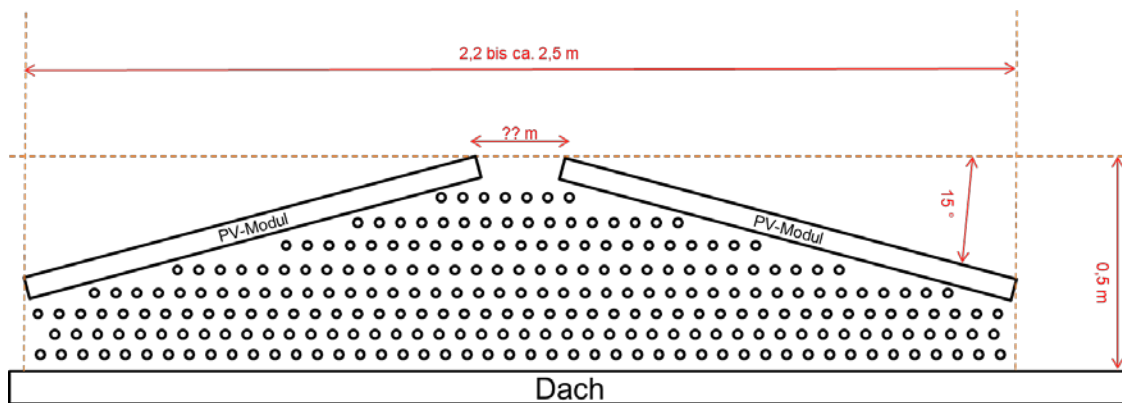


Abbildung 3-17: Querschnitt durch ein PVT Kollektoraufbau mit beispielhafter Anordnung der Wärmeübertragerrohre. Letztendlich werden die dachförmigen Aufbauten zu einem gesamten PV-Generator und Solar-Luft-Kollektor zusammengeschaltet.

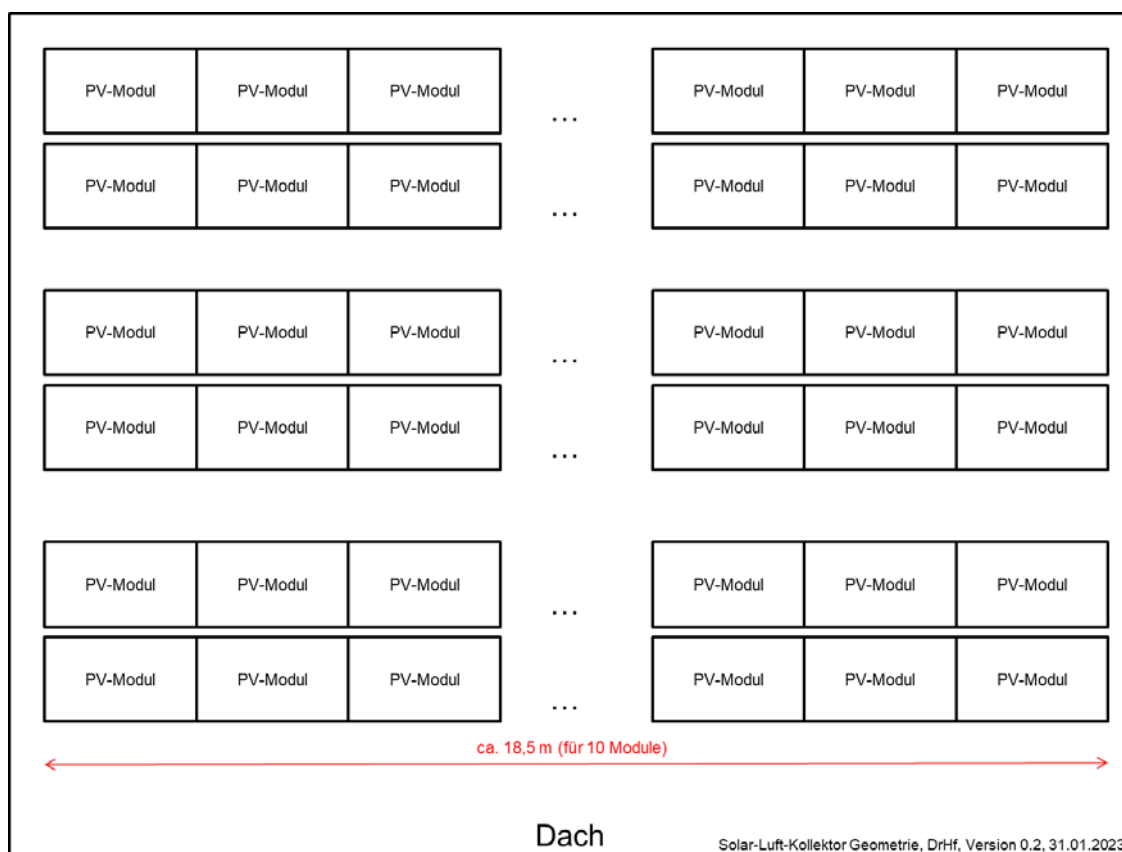
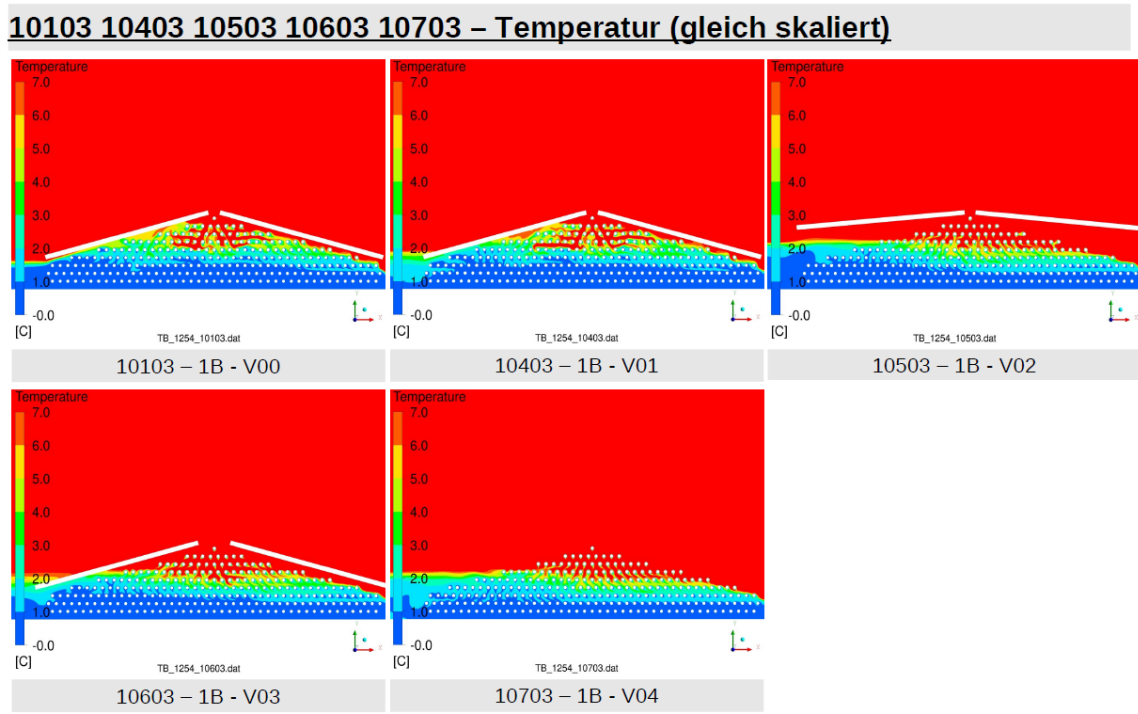


Abbildung 3-18: Aufsicht eine PVT Solar-Luftkollektor-Aufbaus auf einem Flachdach.

Die CFD-Simulationen zeigen, dass eine enge Belegung mit Absorberrohren in der Nähe der Dachhaut durch den entstehenden Kaltluftsee keinen nennenswerten Beitrag zum Wärmetransport leistet. Unterschiedliche Abstände des PV-Moduls oder sogar das Weglassen des PV-Moduls ändern an diesem Bild nichts.



TB 1254-2 PVT Kollektor CFD - Stand 1
 Seite 27 30.03.2023 TB / AnV © Viessmann Werke

Abbildung 3-19: Temperaturverteilung im Schnittbild des PVT Solar-Luft-Kollektors bei unterschiedlicher Anordnung der PV-Module.

Das Weglassen der unteren Rohrreihen brachte eine Steigerung des Wärmeübergangs von 15 % (Variante V03 zu Variante V08 in folgender Abbildung 3-20) siehe auch Daten in der Tabelle Tabelle 3-8).

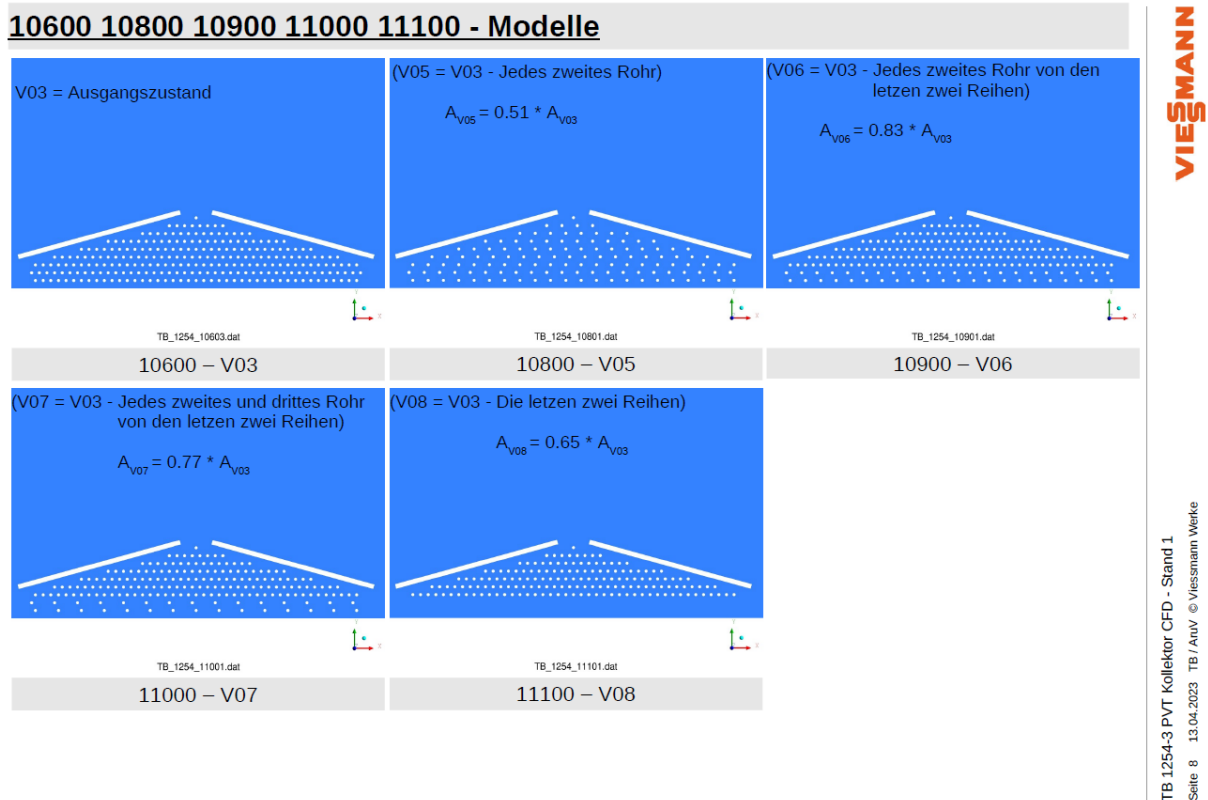


Abbildung 3-20: Ergebnisse bei Weglassen der unteren Rohrreihen (Variante V04 zu Variante V08)

Tabelle 3-8: Ausführung ausgewählter Varianten des PVT-Luft-Sole-Kollektors und Wärme-Leistung bei Windstille. Abmessungen des Kollektors: die Breite entspricht der Schnittebene der vorangehenden Abbildungen (ca. 2,5 m) sowie einer Länge des Kollektors von einem Meter.

Version	Attika	PV-Module Abstand am "Dachfirst"	Rohrreihen	Fläche	Fläche Relative zur V03	Wärme	Relative zur V03
	[-]	[mm]	[-]	[m ²]	[%]	[W]	[%]
V03	✓	200	9	15,5		369	
V05	✓	200	9	7,9	-49%	309	-16%
V06	✓	200	9	12,8	-17%	385	4%
V07	✓	200	9	11,92	-23%	396	7%
V08	✓	200	7	10,04	-35%	424	15%

Werden nun mehrere Kollektorreihen auf dem Dach betrachtet, so entsteht durch die gegenseitige Wind-Abschattung und Beeinflussung wieder ein Kaltluftsee unter den Kollektoren. Schrittweise wird dazu die Anzahl der Kollektorreihen von eins („1-er Block“) auf zwei („2-er Block“) und drei („3-er Block“) erhöht.

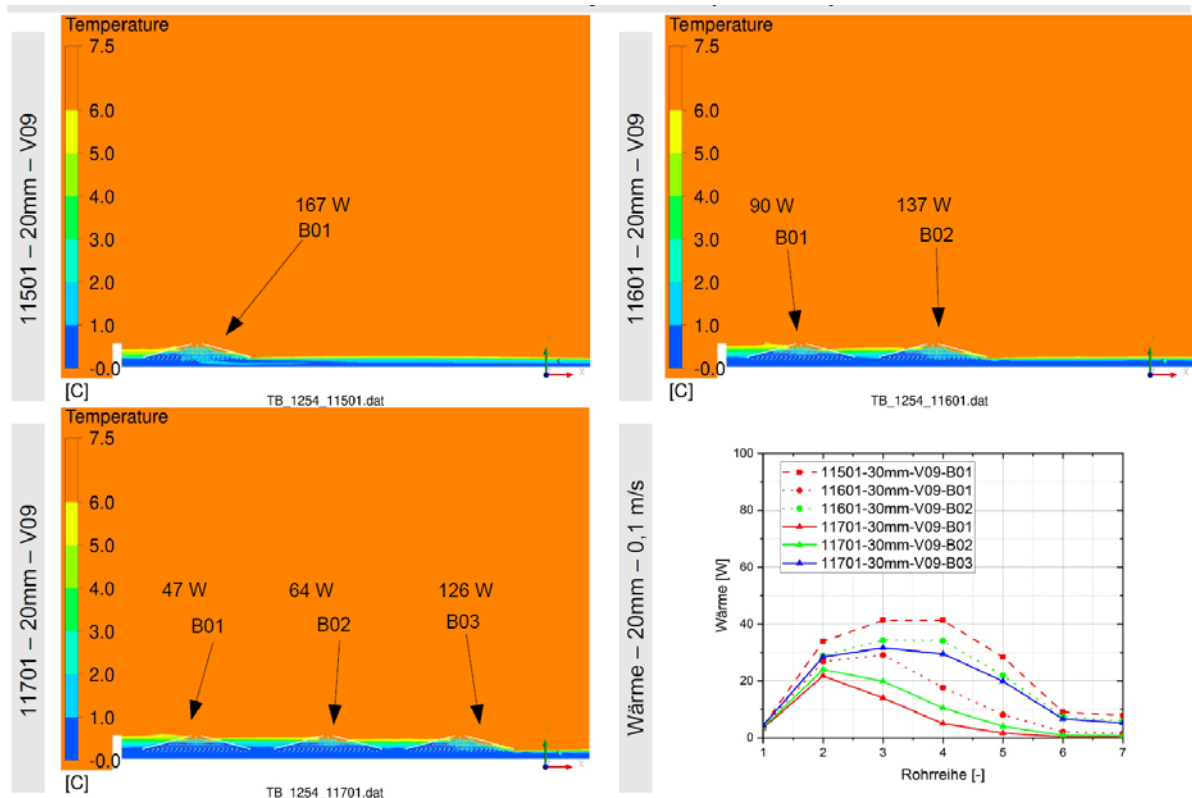


Abbildung 3-21: Lufttemperatur im Schnittbild bei der Betrachtung von einer, zwei oder drei Kollektorreihen bei 0,1 m/s Windgeschwindigkeit.

Das Ergebnis ist in Abbildung 3-22 zusammengefasst. Hier ist außerdem dargestellt, welchen Einfluss die Veränderung des Durchmessers der Wärmeübertragerrohre von 10 mm auf 20 mm oder 30 mm hat. Während der Rohrdurchmesser quasi keinen Einfluss hat, zeigt sich, dass benachbarte Kollektorreihen den Wärmetransport erheblich nach unten drücken. Immer nur die letzte, auf einer Seite freie Kollektorreihe erreicht die hohen Werte einer einzelnen Reihe.

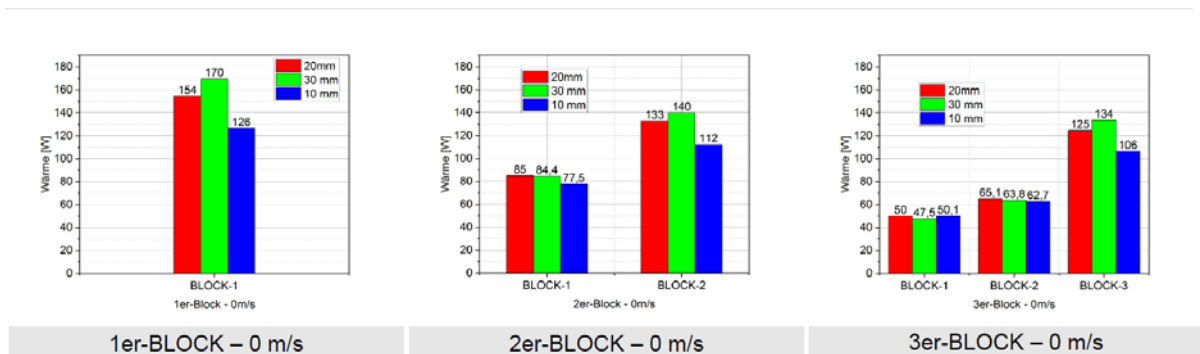


Abbildung 3-22: Rückgang der Wärmeübertragung bei steigender Anzahl von Kollektorreihen, verglichen mit einer Änderung des Durchmessers der Wärmeübertragerrohre. Die Betrachtung erfolgt bei 0,1 m/s Windgeschwindigkeit.

Eine Verbesserung der Situation ergibt sich erst bei höherer Windgeschwindigkeit. Über 1 m/s verschwindet der Kaltluftsee und alle Kollektorreihen haben eine etwa gleichmäßige Leistung.

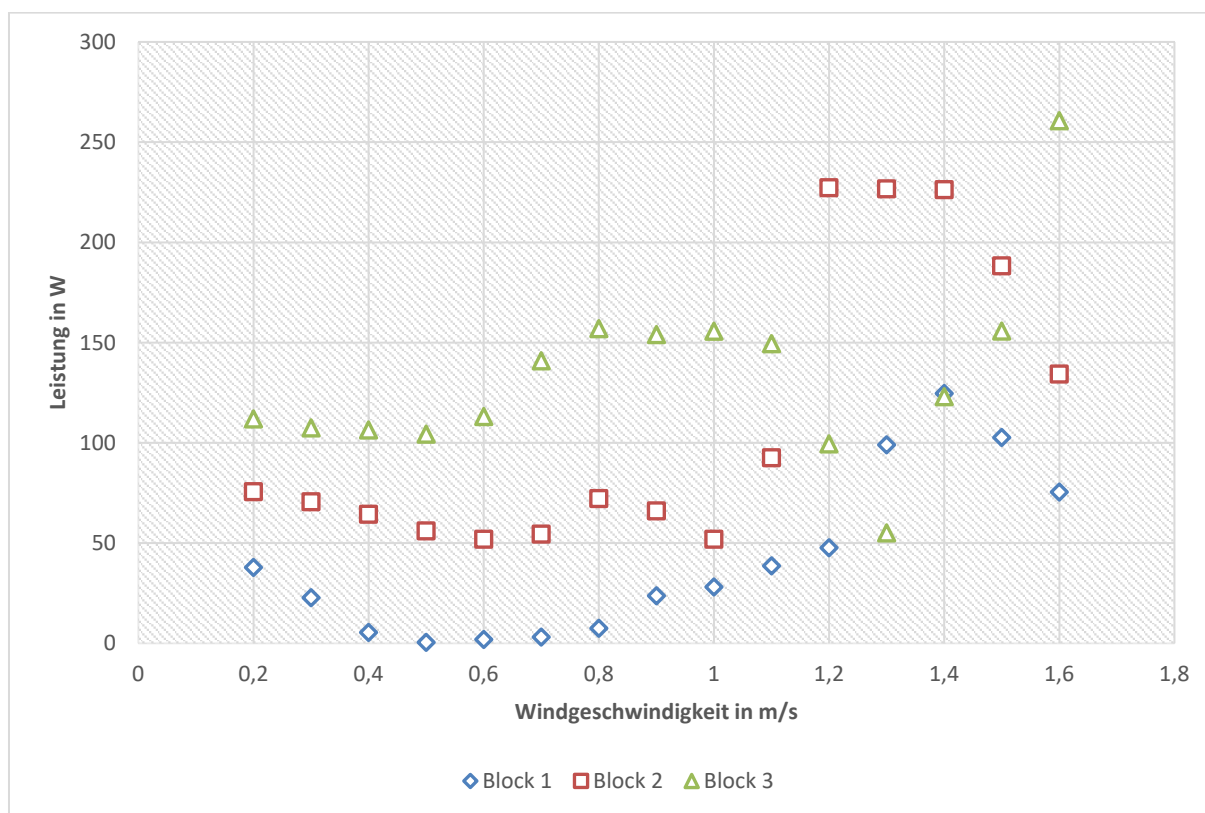


Abbildung 3-23: Leistung in Abhängigkeit von der Windgeschwindigkeit.

Kriterien für ein gutes Design eines PV Luft- Sole-Kollektors für größere Flachdächer (mit Attika):

- Ausreichender Bodenabstand, um eine freie Abströmung der abgekühlten Luft zu ermöglichen.
- Möglichst gute Durchströmung der Rohrbündel für freie Konvektion, auch bei Windstille.
- Ausreichender Abstand zwischen und in den Modulreihe („am Dachfirst“), um eine freie Konvektion der Luft zu erlauben.
- Der Durchmesser der Wärmeübertragerrohre hat einen untergeordneten Einfluss auf die thermische Leistung des Kollektors. Der Durchmesser kann aufgrund anderer Kriterien, beispielsweise dem Druckverlust auf der Flüssigkeitsseite, optimiert werden.

3.2 Solargenerator-Gesamtkonzepte

Dieser Arbeitspunkt wird ausschließlich von den österreichischen Projektpartnern bearbeitet.

3.3 Solarthermische Wärmequellen für Anergienetze

In diesem Subarbeitspaket wurden unterschiedliche Kollektoren im Hinblick auf ihre Eignung und Integration in das Gesamtenergieversorgungssystem als Wärmequelle für Anergienetze bewertet.

Untersucht wurden vier verschiedene Typen von solarthermischen und PVT (Luft-Sole-) Kollektoren (vgl. Abbildung 3-24). Neben den Luft-Sole-Kollektoren vom Typ Charger und vom Typ Kraftdachregister (Charger mit Abdeckung), welche innerhalb des Forschungsvorhabens Sol4City mittels quasi-dynamischen Außenmessungen nach ISO 9806 charakterisiert wurden [67], wurde der PVT Kollektor vom Typ Spring der Firma DualSun sowie der solarthermische Luft-Sole-Kollektor vom Typ SLK 600 der Firma VCS bewertet.



Abbildung 3-24: PVT Luft-Sole-Kollektor vom Typ Kraftdachregister der Firma Kraftwerk Solutions AG links oben, solarthermischer Luft-Sole-Kollektor vom Typ Charger der Firma Kraftwerk Solutions AG rechts oben, PVT Kollektor vom Typ Spring 225M bis 280M - 60 - 2BBPI der Firma DualSun links unten, solarthermischer Luft-Sole-Kollektor vom Typ SLK 600 der Firma VCS rechts unten

Die Abdeckung des Luft-Sole-Kollektors vom Typ Kraftdachregister imitiert dabei ein Photovoltaik-Modul, um so auch den PVT Luft-Sole-Kollektor thermisch charakterisieren zu können. Während der PVT Kollektor vom Typ Spring in Anlage 3 des Projektes Sol4City zum Einsatz kommt, wurde der solarthermische Luft-Sole-Kollektor vom Typ SLK 600 in Anlage 1 installiert. Eine Modifikation mit nur einer wärmeübertragenden Lagen des PVT Luft-Sole-Kollektors vom Typ Kraftdachregister wurde in Anlage 2 eingesetzt.

Die Grundlage für die Berechnung der jährlichen solarthermischen Nutzenergie sowie des unten definierten solarthermischen Deckungsanteils zur Bewertung der Anlageneffizienz der Luft-Sole-Kollektoren als Wärmequelle von Anergienetzen, war eine Jahressystemsimulation

des Gesamtenergieversorgungskonzeptes der Anlage 1 (vgl. Kapitel 0) in der Simulationsumgebung TRNSYS. Die detaillierte Beschreibung der Modellierung des kalten Nahwärmenetzes sowie der vereinfachten Regelung der zentralen Komponenten Eisspeicher, vakuumgedämmte Warmwasserspeicher, Wärmepumpen und Luft-Sole-Kollektoren sind [67] zu entnehmen.

Unter gleichbleibendem hydraulischem Aufbau und festgelegter Anlagengröße, welche sowohl den Heiz- und Kühlenergiebedarf bzw. die Lastprofile als auch die Speichervolumina und die Kollektorfläche implizieren, sowie unter konstanten Anfangs- und Randbedingungen, wurden ausschließlich die in Tabelle 3-9 und Tabelle 3-10 beschriebenen Modellkennwerte und Einfallswinkelkorrekturfaktoren der solarthermischen und PVT Luft-Sole-Kollektoren variiert. Dies erfolgte über die Definition der Parameter sowie der IAM-Datei des numerischen Kollektormodells, dem TRNSYS Type 832.

Tabelle 3-9: Modellkennwerte der vier untersuchten Kollektortypen

Kennwert	Einheit	Charger ohne Abdeckung (ChoA)	Charger mit Abdeckung (ChmA)	Spring	SLK 600
$\eta_{0,b}$	-	0,75	0,71	0,48	0,49
c_1	W/(m ² K)	47,30	33,50	7,41	110,60
c_2	W/(m ² K ²)	0,00	0,00	0,00	0,00
c_3	J/(m ³ K)	20,20	32,40	1,70	19,29
c_4	-	0,75	1,00	0,00	2,41
c_5	kJ/(m ² K)	77,49	91,61	42,20	135,60
c_6	s/m	0,090	0,040	0,003	0,023
K_d	-	1,01	0,95	1,00	2,11

Tabelle 3-10: Einfallswinkelkorrekturfaktoren der direkten Bestrahlungsstärke der vier untersuchten Kollektortypen

Typ	Einfallswinkel θ	0 °	10 °	20 °	30 °	40 °	50 °	60 °	70 °	80 °	90 °
ChoA	$K_b(\theta_L, 0)$:	1,00	0,99	0,97	0,94	0,92	0,88	0,80	0,66	0,35	0,00
	$K_b(0, \theta_T)$:	1,00	1,04	1,08	1,11	1,15	1,37	1,42	1,74	2,47	0,00
ChmA	$K_b(\theta_L, 0)$:	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,00
	$K_b(0, \theta_T)$:	0,0	11,0	23,9	28,3	34,5	44,4	83,4	100,0	219,0	0,00
Spring	$K_b(\theta_L, 0)$:	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,96	0,92	0,46	0,00
	$K_b(0, \theta_T)$:	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,98	0,96	0,92	0,46	0,00
SLK 600	$K_b(\theta_L, 0)$:	1,00	1,13	1,25	1,37	1,49	2,24	2,47	3,19	1,60	0,00
	$K_b(0, \theta_T)$:	1,00	1,13	1,25	1,37	1,49	2,24	2,47	3,19	1,60	0,00

Der in Abbildung 3-25 dargestellte solarthermische Deckungsanteil wurde nach Gleichung (3-1) berechnet. Da die Bewertung der Anlageneffizienz für solarthermische Wärmequellen in Anergienetzen erfolgen soll, wird hier ausschließlich der solarthermische Deckungsanteil beschrieben. Der solarelektrische Deckungsanteil wird an dieser Stelle nicht berücksichtigt.

$$f_{sol,th} = \left(\frac{Q_{sol}}{Q_{bed}} \right) \cdot 100\% \quad (3-1)$$

mit

$f_{sol,th}$	solarthermischer Deckungsanteil in %
Q_{sol}	monatliche solarthermische Nutzenergie in kWh
Q_{bed}	monatlicher Heizwärmebedarf in kWh

Dabei wird die monatliche solarthermische Nutzenergie der verschiedenen Kollektortypen im Verhältnis zu dem monatlichen Heizwärmebedarf für die Raumheizung betrachtet. Der Betriebsmodus „Regeneration“ also die Nutzung des Kollektors als direkte Wärmequelle des Eisspeichers, wird zu keinem Zeitpunkt der Jahressystemsimulation verwendet. Die Kollektoren werden daher in dem simulierten Gesamtenergieversorgungssystem ausschließlich im Betriebsmodus „Absorber-Direktbetrieb“ genutzt. Im Absorber-Direktbetrieb ist die solarthermische Nutzenergie auf einem so niedrigen Temperaturniveau, dass sie nicht direkt zur Beheizung verwendet werden kann, sondern als verdampferseitige Wärmequelle der Wärmepumpe bzw. des zu betrachtenden Anergienetzes dient.

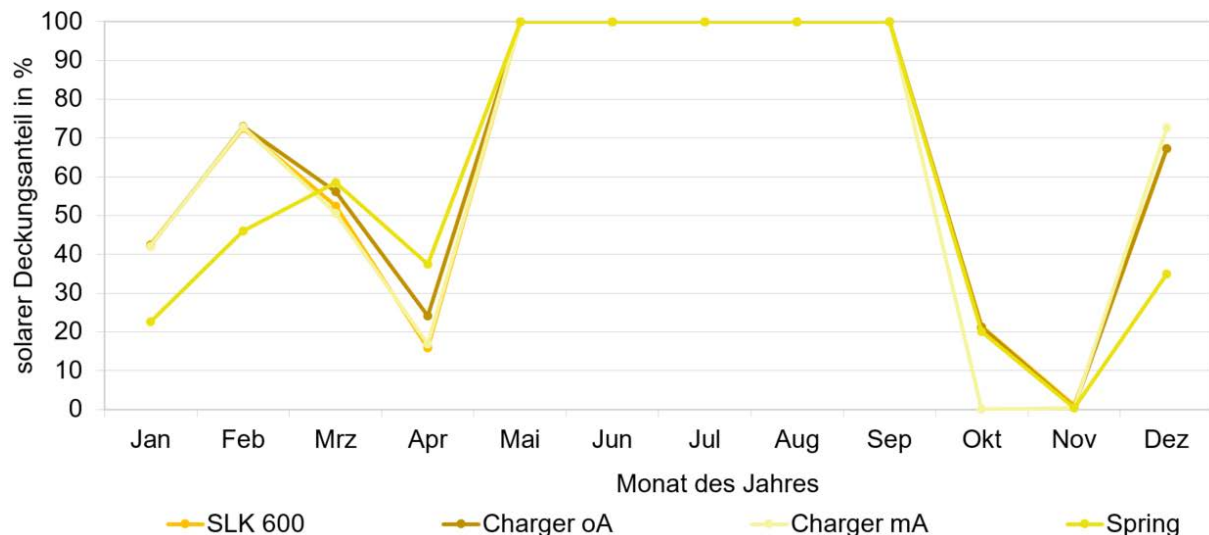


Abbildung 3-25: Monatlicher solarer Deckungsanteil der vier untersuchten Kollektortypen

Die Orangetöne in Abbildung 3-25 zeigen die solarthermischen Deckungsanteile der solarthermischen Luft-Sole-Kollektoren, die Gelbtöne die der PVT (Luft-Sole-) Kollektoren. In den Monaten Mai bis September findet kein Heizbetrieb statt, sodass der Heizenergiebedarf einen Wert von 0 kWh/Monat annimmt und der solarthermische Deckungsanteil dadurch für alle Luft-Sole-Kollektoren mit einem Wert von 100 % definiert wird.

Da die Luft-Sole-Kollektoren zum einen ausschließlich als Wärmequelle des betrachteten Anergienetzes fungieren und zum anderen parallel bzw. zeitlich versetzt zum Eisspeicher als Wärmequelle betrieben werden, ist der Verlauf des solarthermischen Deckungsanteils nicht mit dem von beispielsweise Flachkollektoren vergleichbar und stark abhängig von der Betriebsweise des Gesamtenergieversorgungskonzeptes. Daher können nur die hier dargestellten Verläufe miteinander verglichen werden.

Während die solarthermischen Luft-Sole-Kollektoren und der PVT Luft-Sole-Kollektor vom Typ Kraftdachregister (Charger mit Abdeckung) innerhalb der gegebenen Modell- und Messunsicherheit näherungsweise gleiche monatliche solarthermische Deckungsanteile aufweisen, weicht der PVT Kollektor vom Typ Spring insbesondere in den relevanten Wintermonaten um etwa 50 % davon ab. Begründet werden kann diese Beobachtung durch den kompakten Aufbau des PVT Kollektors vom Typ Spring, welcher dadurch ausschließlich Wärmegewinne aus der Wärmeleitung über die PV-Modul-Oberfläche nutzt. Die Wärmegewinne über die Umgebung welche, beispielsweise bei Wind durch erzwungene Konvektion erhöht werden, entfallen für dieses Kollektorkonzept nahezu komplett. Ursache hierfür ist die Tatsache, dass der solarthermische Absorber durch das PV-Modul auf seiner Oberseite und durch das Gehäuse an den restlichen Seiten weitgehend von direkten Windeinflüssen abgeschirmt ist und so nur ein relativ schwach ausgeprägter thermischer Kontakt zur Umgebung besteht. Auch die strahlungsabsorbierende Oberfläche und die Wärmespeicherkapazität sind gegenüber den volumetrisch aufgebauten der Luft-Sole-Kollektoren deutlich reduziert.

Abbildung 3-26 stellt den Heizenergiebedarf des simulierten Quartiers sowie die Zusammensetzung der Heizwärmebereitstellung im Gesamtenergieversorgungssystem für die vier betrachteten Kollektortypen dar.

Wie in Abbildung 3-26 dargestellt, kann der jährliche Heizwärmebedarf des Quartiers im simulierten Gesamtenergieversorgungssystem mit den drei verschiedenen Typen der Luft-Sole-Kollektoren in Kombination mit der Wärmequelle Eisspeicher und den dezentralen Sole-Wasser-Wärmepumpen, welche die Wärmequellen über ein Anergienetz nutzen, jeweils zu 100 % gedeckt werden. Zusätzliche Wärmeerzeuger werden an dieser Stelle nicht benötigt.

Im gleichen Gesamtenergieversorgungssystem führt der abweichende Verlauf des solarthermischen Deckungsanteils des PVT Kollektors vom Typ Spring unter den gegebenen Anfangs- und Randbedingungen dazu, dass der jährliche Heizwärmebedarf des Quartiers nur zu 77 % mit dem Gesamtenergieversorgungskonzept gedeckt werden kann. Der übrige Heizwärmebedarf von 117 MWh/a muss in diesem Fall durch zusätzliche Wärmeerzeuger gedeckt werden.

Der Grund hierfür ist, dass die zur Verfügung stehende Entzugsenergie des Eisspeichers, welche ebenfalls als Quellenergie der Wärmepumpen dient, bei der angenommenen anfänglichen Vereisung von 40 % (siehe [67]) bereits im Monat Januar nicht ausreicht, um die fehlende solarthermische Nutzenergie des PVT Kollektors vom Typ Spring im Vergleich zu den drei Typen der Luft-Sole-Kollektoren zu kompensieren. Der Eisspeicher hat somit bereits im Januar die maximale Vereisung erreicht, wodurch auch im Februar die Differenz der solarthermischen Nutzenergie nicht durch Energie aus dem Eisspeicher ausgeglichen werden kann. Nachdem der Eisspeicher über die Sommermonate wieder den vollständig flüssigen Zustand erreicht,

wird er in den Monaten Oktober und November bereits wieder bis zu über 80 % vereist, sodass auch im Dezember zu wenig solarthermische Nutzenergie aus dem PVT Kollektor vom Typ Spring zur Verfügung gestellt werden kann.

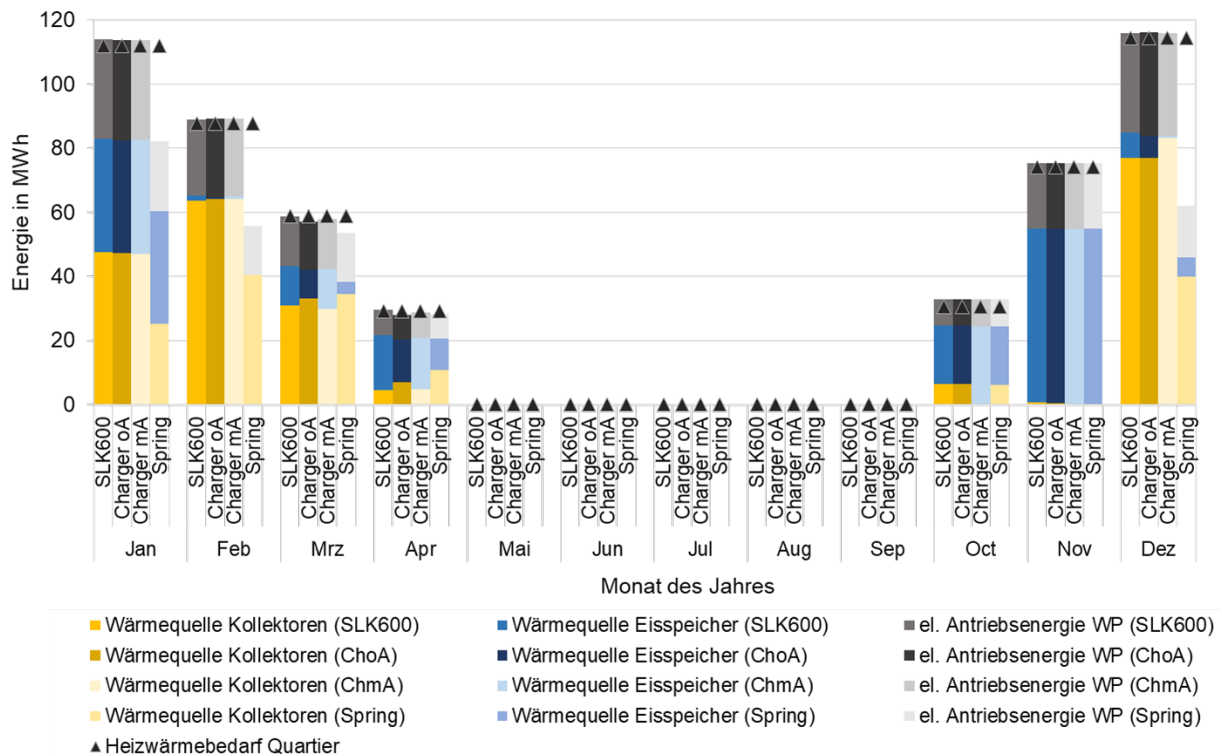


Abbildung 3-26: Monatlicher Heizwärmebedarf und Zusammensetzung der Heizwärmebereitstellung für die vier untersuchten Kollektortypen

Hinsichtlich der Anlageneffizienz sind demnach die untersuchten Luft-Sole-Kollektoren vom Typ SLK 600, Charger und Kraftdachregister, Technologien welche besser als Wärmequelle für Anergienetze geeignet sind als der PVT-Kollektor vom Typ Spring. Diese Aussage gilt ausschließlich in dem hier untersuchten Gesamtenergieversorgungssystem, das heißt im Zusammenhang mit dem Eisspeicher, unter Berücksichtigung der betrachteten vereinfachten Regelstrategie sowie den angenommenen Anfangs- und Randbedingungen in [67].

Neben der Anlageneffizienz werden die vier untersuchten Kollektortypen außerdem im Hinblick auf die Verfügbarkeit der solarthermischen Wärmequellen bei extremen Umweltbedingungen sowie die Reparaturanfälligkeit und Lebensdauer bewertet.

Für die Verfügbarkeit der solarthermischen Wärmequellen werden verschiedene extreme Umweltbedingungen betrachtet. Als erste extreme Umweltbedingung wird dazu eine sogenannte **Dunkel-Flaute** betrachtet, in welcher die direkte und indirekte Sonneneinstrahlung sowie jegliches Windaufkommen ausbleibt. In Abbildung 3-27 sind die nach ISO 9806 berechneten solarthermischen Nutzleistungen der vier Kollektortypen für einen stationären Fall und zwei klimatische Bedingungen dargestellt. Die langwellige Netto-Bestrahlungsstärke beträgt 100 W/m^2 und die Umgebungslufttemperatur ϑ_a beträgt $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

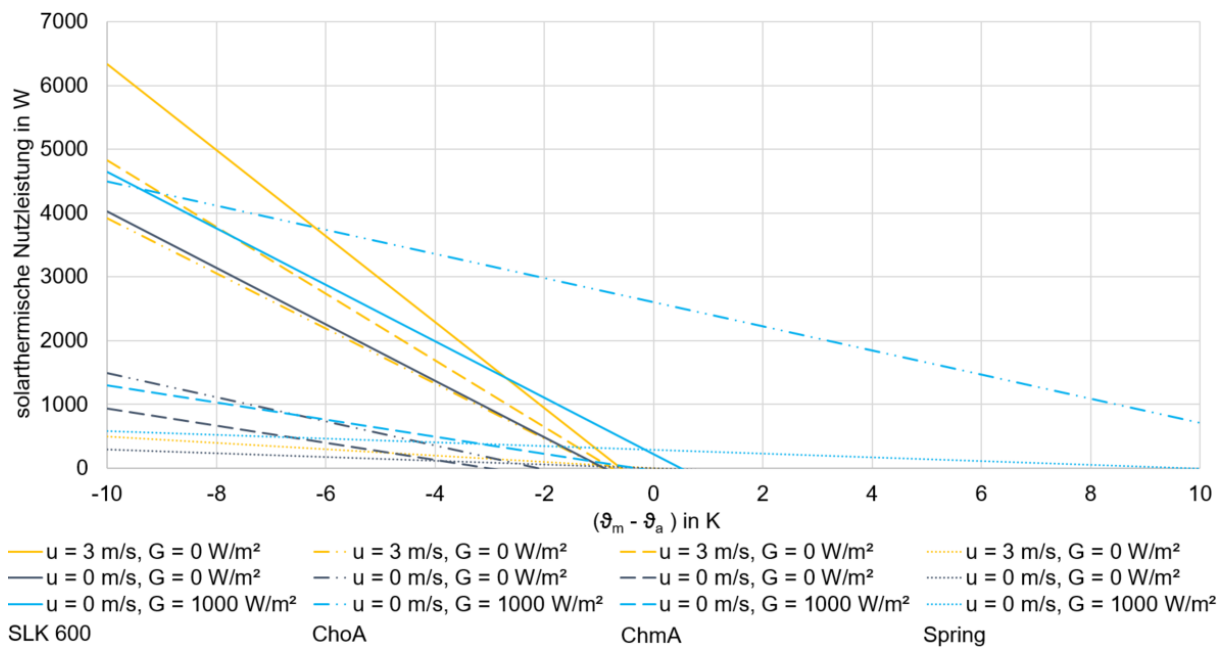


Abbildung 3-27: Solarthermische Nutzleistung der vier Kollektortypen für unterschiedliche Windgeschwindigkeiten u und zwei Bestrahlungsstärken G

Um den Einfluss des Windes auf die solarthermische Nutzleistung abschätzen zu können, sind in Abbildung 3-27 Kurven mit zwei verschiedenen Windgeschwindigkeiten u und gleicher Bestrahlungsstärke G abgebildet.

Um gleichermaßen den Einfluss der Sonneneinstrahlung abschätzen zu können sind weiterhin Kurven mit zwei verschiedenen Bestrahlungsstärken G und gleicher Windgeschwindigkeit u abgebildet. Die dunkelblauen Kurven stellen den Fall der Dunkelflaute ($u = 0$ m/s und $G = 0$ W/m²) dar. Während die drei Luft-Sole-Kollektoren für ein hohes Windaufkommen ähnliche solarthermische Nutzleistung aufweisen, zeigt der PVT-Kollektor vom Typ Spring für alle dargestellten Umgebungsbedingungen die geringsten solarthermischen Nutzleistungen. Der Einfluss des Windaufkommens ist insbesondere bei niedrigen mittleren Fluidtemperaturen im Vergleich zur Umgebungslufttemperatur zu beobachten, der Einfluss der Bestrahlungsstärke dagegen verstärkt bei hohen mittleren Fluidtemperaturen ϑ_m im Vergleich zur Umgebungslufttemperatur.

So ist die solarthermische Nutzleistung in Dunkel-Flauten für alle vier Kollektortypen, gegenüber einem Fall mit Bestrahlungsstärke oder mit Windaufkommen, deutlich reduziert. Unterschreitet die mittlere Fluidtemperatur die Umgebungslufttemperatur ϑ_a stehen jedoch alle hier betrachteten solarthermischen Wärmequellen auch in Dunkel-Flauten zur Verfügung.

Als weitere extreme Umweltbedingung wird die Vereisung des Kollektors untersucht. Vereisen die Kollektoren, würde sich der Wärmeübergang von Umgebungsluft zu Wärmeträgerfluid über die Kollektoroberfläche mit der Eisschichtdicke verändern. Die volumetrischen Luft-Sole-Kollektoren zeichnen sich im Vergleich zu dem PVT Kollektor vom Typ Spring durch ihre um ein Vielfaches erhöhte Kollektoroberfläche aus. Findet eine Vereisung statt so kann angenommen werden, dass der Einfluss auf die Luft-Sole-Kollektoren daher höher als auf den PVT Kollektor vom Typ Spring.

Insbesondere aufgrund der geringen Betriebstemperaturen und -drücke wird die Reparaturanfälligkeit für alle vier betrachteten Kollektortypen als gering eingestuft. Zusätzlich weist das als Wärmeträgerfluid verwendete 33-%ige Wasser-Glykol-Gemisch eine geringe Aggressivität auf und bewegte Teile sind keine vorhanden, so dass auch unter diesen Aspekten eine geringe Reparaturanfälligkeit erwartet werden kann.

Die verbauten Materialien wie beispielsweise die PP-R (Polypropylen-Random-Copolymer) Rechteckkanäle des Luft-Sole-Kollektors vom Typ Charger und andere Kunststoffe, sind auch in anderen Anwendungen, wie beispielsweise als Rohrleitungssystem für die Fußboden- und Flächenheizung, gängig. Gleiches gilt für die Fügetechnik der Kunststoffmaterialien. Unter diesen Aspekten ist daher ebenfalls eine geringe Reparaturanfälligkeit und lange Nutzungsdauer zu erwarten. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist, jedoch, dass die Kunststoffe entweder ausreichend vor UV-Strahlung geschützt werden oder mit entsprechenden chemischen Stabilisatoren versehen sind. Weshalb für die Ausführung als PVT Luft-Sole-Kollektor eine höhere Lebensdauer erwartet werden kann.

4. Gesamtenergieversorgungskonzepte (AP4)

Das Ziel des vierten Arbeitspaketes ist die Entwicklung und Optimierung verschiedener Systemansätze für Gesamtenergieversorgungskonzepte. Der Schwerpunkt der Arbeiten von Deutschland (VCS + IGTE) stellt die Entwicklung und Optimierung eines Gesamtenergieversorgungssystems für Mehrfamilienhäuser und Quartiere sowohl für Neubauten als auch für den Gebäudebestand dar. Die zentralen Komponenten des neu zu entwickelnden Gesamtwärmeversorgungssystems sind Anergienetz, Latentspeicher, Wärmepumpe sowie Technologien zur energetischen Nutzung der Solarstrahlung und der Umgebungswärme. Wichtige Aspekte stellen in diesem Zusammenhang auch die Speicherung der Wärme auf Nutztemperaturniveau sowie die Entwicklung einer integralen, adaptiven und prädiktiven Systemregelung dar.

Diese integrale Systemregelung steuert und optimiert die Versorgung des Gebäudes bzw. Quartiers sowohl mit thermischer als auch elektrischer Energie. Die hierbei möglichen Quellen der elektrischen Energie sind PVT-Kollektoren, BHKWs sowie das elektrische Netz: Als Wärmequellen dienen die Solarstrahlung, die Umgebungswärme sowie die von Wärmepumpen und BHKWs erzeugte Wärme.

Wichtige Kriterien bei der Entwicklung der Gesamtenergieversorgungskonzepte sind:

- Ein ausfallsicherer, stabiler Betrieb unter unterschiedlichen Lastbedingungen
- Eine ökonomisch und ökologisch optimale Kombination der Wärme- und ggf. Stromquellen für das Anergienetz im Hinblick auf Investitionskosten und Betriebskosten (LCoH: Levelized Cost of Heat)

Ein weiteres wichtiges Ergebnis dieses APs ist die Erstellung von Referenzsystemen aus den in Kapitel 4.1 genannten zentralen Komponenten, um sowohl für das Gesamtsystem als auch für die Komponenten Optimierungspotentiale ableiten zu können.

4.1 Definition und Anforderungen an das Gebäude

Die Anforderungen an den Gebäudekörper selbst, im Zusammenhang mit Wärmeversorgungsanlagen insbesondere der Heizwärmebedarf, sind über entsprechende gesetzliche Regelungen erfasst (EnEV, GEG). Im Zusammenhang mit dem Vorhaben werden die Eigenschaften beschrieben, die Gebäude für eine Ausstattung mit einem kalten Wärmenetz besser geeignet machen.

Weiterhin wurden Rahmenbedingungen für die zu betrachtenden Gebäude mit den österreichischen Projektpartnern abgestimmt.

4.1.1 Auswertung der von VCS realisierten Anlagen

Zur Festlegung der Anforderungen an das Gebäude führte VCS zu Beginn des Vorhabens eine Auswertung der Eisspeicher-Projekte durch, in denen VCS als Lieferant des Eisspeichers angefragt oder beauftragt wurde (ca. 1.038 Anfragen, ca. 300 umgesetzte Projekte). Hierbei

stellt sich die zeitliche Entwicklung wie folgt dar, wobei bei den umgesetzten Projekten die Inbetriebnahme 1-3 Jahre nach der Anfrage erfolgt.

2013: 6 Anlagen	2014: 29 Anlagen	2015: 78 Anlagen
2016: 93 Anlagen	2017: 164 Anlagen	2018: 158 Anlagen
2019: 141 Anlagen	2020: 368 Anlagen	

Anmerkung: Die hier dargestellte Auswertung gibt nur Tendenzen an, da die Analyse teils inkonsistente Daten aufgedeckt hat. Eine genaue Aufteilung nach Anwendungsbereich ist nicht möglich, da viele Anfragen ohne konkrete Gebäudedaten bearbeitet werden.

Anwendungsbereich

- Wohnbau (MFH, EFH): ~ 42 %
- Öffentliche Gebäude der Stadt: ~ 10 %
- Gewerbe (Büro, Industrie): ~ 30 %
- Bildung (Hochschule, Schule, Kita): ~ 15 %
- Hotel: ~ 3 %

Art der Wärmeverteilung

- Warmes Verteilnetz: ~ 89 %
- Anergienetz: ~ 11 %

Art der regenerativen Energiequelle

- Solarabsorber: ~ 81 %
- PVT-Kollektor: ~ 11 %
- Rückkühler: ~ 8 %

Eckdaten der Projekte:

Gebäudeheizung und Warmwasser

- Heizlast des Gebäudes von 20 bis 180 kW, Einzelanlagen bis 2 MW
- Heizsysteme, die von den Wärmepumpen versorgt werden, sind mit maximaler Vorlauftemperatur zwischen 40 °C und 50 °C geplant
- Heizsysteme, die eine höhere Temperatur bis 80 °C erfordern, werden separat über einen Gaskessel versorgt
- Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe bei kleineren Leistungen (< 80 kW) häufiger als bei großen Leistungen
- Warmwasserbereitung mit Wärmepumpe aus dem warmen Teil der ersten Wärmepumpe (spezielle Hochtemperatur-Wärmepumpe) in einzelnen Großanlagen (> 500 kW)
- Warmwasserbereitung erfolgt mit Gaskessel (wenn vorhanden)
- Warmwasserbereitung bevorzugt mit Frischwasserstationen
- Warmwasserbereitung mit elektrischem Durchlauferhitzer selten

Gebäudekühlung

- Kühlung meist gewünscht, Details siehe folgendes Kapitel 4.2

Anlagentechnik

- Eisspeicher-Volumen von 100 bis 800 m³, einzelne darüber (1800 m³ einmalig, 2.200 m³ einmalig)
- 80 % mit (thermisch günstigeren) zylindrischen Eisspeicher-Behältern
- 20 % mit quaderförmigen Eisspeicher-Behältern (bessere Integrierbarkeit in Gebäudegrundriss)
- 80 % der Eisspeicher neben dem Gebäude im Untergrund positioniert
- 20% der Eisspeicher in den Bauwerken integriert (Überbauung durch das Gebäude selbst oder unbeheizte Nebengebäude wie Garagen)
- Betriebsweise bei kleinen Leistungen (< 80 kW) ist vorwiegend monovalent (nur Wärmepumpe)
- Monoenergetisch (Wärmepumpe mit Backup durch Elektro-Direktheizung) ist selten
- Bivalenten Anlagen (2 Energieträger) meist mit Gaskessel ausgeführt
- Backup bei der Kälteversorgung ist selten
- Backup der Kälteversorgung erfolgt mit Kaltwassersatz (auch hier basiert die Kälteerzeugung auf elektrischer Energie)
- Eisspeicher für monovalente Projekte sind ca. 5-10 % größer (Auslegungskriterium: Speicherladezustand nicht unter 30 %)

Regenerative Wärmequelle

- Regenerative Wärmequelle ist bei 81 % der Anlagen ein Solar-Luft-Kollektor
- Fläche des Solar-Luft-Kollektors zwischen 1 und 4 m² je kW Heizleistung der Wärmepumpe
- Solar-Luft-Kollektoren sind vorwiegend auf dem Dach des Gebäudes installiert. Eine Freifeld-Aufstellung ist denkbar, wurde bislang jedoch nicht umgesetzt.
- 10 % der Anlagen nutzen Abwärme (Server-Kühlung, Abwasser)
- Einzelne Anlagen ohne regenerative Wärmequelle (Eisspeicher dient ausschließlich der Kälteversorgung).
- Bei 80 % der Projekte wird der Solarabsorber auf einem Flachdach installiert.

4.1.2 Anforderungen an das Gebäude

Die Lösungen mit Eisspeicher stellen an die Gebäude und das umliegende Terrain folgende Anforderungen:

- Der Eisspeicher wird erdvergraben gebaut, die minimale Erdreichüberdeckung nach Fertigstellung ist 1 m.
- Der Eisspeicher benötigt eine gute thermische Anbindung an das Erdreich, Keller oder andere Gebäudeteile dürfen nur 30 % der Seitenwand des Eisspeichers abdecken.
- Angrenzende Gebäudeteile müssen diffusions- und frostsicher gedämmt vom Eisspeicher abgegrenzt werden.
- Die Anschlussleitungen des Eisspeichers müssen diffusions- und frostgeschützt gedämmt werden, da das Wasser-Glykol Gemisch bis auf -15 °C abgekühlt wird.
- Für den Solarabsorber müssen je nach Typ 1 bis 4 m² Dachfläche je 1 kW Heizleistung der Wärmepumpe zur Verfügung stehen. Wartungs- und Zugangswege sind ergänzend zu berücksichtigen.
- Es gelten die üblichen Anforderungen für die Technikzentrale, u.a. aus der EN 378 für die Aufstellung von Wärmepumpen
- Die Wärmeabgabesysteme erscheinen mit 40 °C bis 50 °C Auslegungstemperatur sinnvoll dimensioniert. In einer Sensitivitätsanalyse zum Ende des Forschungsvorhabens wird ermittelt, welchen Einfluss eine Absenkung der Auslegungstemperatur auf die Effizienz der Gesamtanlage hat.
- Die unterschiedlichen Verfahren der Warmwasserbereitung müssen im Forschungsvorhaben in Simulationsstudien bewertet werden. Erst anschließend kann hier eine Empfehlung gegeben werden.
- Eine Anforderung an die Gebäudehülle hinsichtlich maximaler Heiz- oder Kühllast wird nicht gestellt.
- Der Einfluss von Heizwärmebedarf und Kältebedarf in ihrem Jahreswert, ihrer saisonalen Verteilung und ihrem Verhältnis zueinander auf die Anlageneffizienz ist bisher nicht bekannt. Für das zu entwickelnde Versorgungskonzept wird dieser Zusammenhang ausgearbeitet und steht als Information für die Gebäudeplanung zum Projektende zur Verfügung.

4.1.3 Anforderungen an die Planung der Anlagen

Ein Aspekt der Anforderungen betrifft den Prozess der Planung und des Baus einer Anlage. Der bisher etablierte Prozess ist für das zu entwickelnde Versorgungskonzept nicht optimal.

Der Prozess zu Beginn des Vorhabens besteht aus den folgenden Schritten:

1. Der Bauherr beauftragt einen Architekten, einen TGA-Planer oder einen Generalunternehmer mit der Durchführung des Projekts.

2. Dem TGA-Planer werden die Pläne des oder der Gebäude zur Verfügung gestellt.
3. Die Wärmebedarfsberechnung und Berechnung der Heiz- und Kühllasten werden vom Planer durchgeführt, wenn die Daten nicht bereits vorliegen.
4. Auf Basis des Wärme- und Kältebedarfs, des Lüftungsbedarfs und gesetzlicher Randbedingungen wählt der Planer unter Berücksichtigung der Wünsche des Bauherrn eine Ausstattung mit Wärme- und Kälteerzeugern.
5. Der Planer erstellt ein Hydraulikschema entsprechend seinen Erfahrungen und den örtlichen Randbedingungen (Aufstellorte der Geräte, Verteilung von Wärme und Kälte, Bebauungsplan). Dabei fließen implizit schon Ideen und Vorgaben an die Regelung der Gesamtanlage mit ein, wie z. B. „der Gaskessel soll möglichst nicht eingesetzt werden, muss aber die komplette Warmwasserbereitung jederzeit übernehmen“. Die impliziten Ideen werden selten dokumentiert, sondern müssen in späteren Bearbeitungsschritten mühsam und lückenhaft erfragt werden.
6. Zusammen mit dem Schaltschrankbauer und Regelungstechniker wird das Hydraulikschema um nötige Sensorik und Aktorik zu einem kompletten Rohrleitungs- und Instrumentenfließschema („RI-Schema“) ergänzt. Im Vordergrund dieser Ergänzungen steht die Steuer- und Regelbarkeit von einzelnen Komponenten, wie z. B. „Der Wärmeerzeuger muss einschalten, wenn an jener Stelle eine Temperatur unterschritten ist.“, „Die Pumpe wird so geregelt, dass sich zwischen folgenden Messpositionen eine bestimmte Temperaturdifferenz einstellt“.

Diese Schritte und die Bearbeitungsreihenfolge führen bei einfachen Anlagen wie beispielsweise Wärmeerzeugung mit Gaskessel oder Kälteerzeugung mit Kaltwassersatz in der Regel zum gewünschten Ergebnis: eine effiziente Anlage mit geringen Betriebskosten. Es liegen genügend Erfahrungswerte bei den Projektdurchführenden vor und die Wechselwirkung zwischen den Komponenten ist überschaubar.

Je komplexer die Anlagen werden, desto öfter führt der Prozess jedoch zu nicht zufriedenstellenden Ergebnissen, welche nach der Inbetriebnahme der Anlage erst detektiert und dann soweit möglich behoben werden müssen. Selbst sehr komplexe Anlagen werden in der Regel nicht mit Unterstützung von Simulationsprogrammen geplant, sondern auf Basis von stationären Auslegungen, meist bei maximaler Last. Eigentlich erwartbare Betriebssituationen werden in der Planung nicht beachtet, was oft zu einem unzulänglichen, ineffizienten Betrieb führt.

Für Eisspeicher-Anlagen für einzelne Gebäude führten erst 2018/2019 eine Vereinheitlichung der Hydraulik und Regelungsfunktionen als Firmenstandard (siehe AP 5.2) sowie detaillierte Vorgaben an die Ausführung der Anlage zu einem bewertbaren Systemverhalten. Um diese Standardisierung auch für die im Vorhaben „Sol4City“ zu entwickelnden Versorgungskonzepte zu erreichen, wurden die Daten realisierter Projekte zusammengestellt und analysiert.

4.1.4 Anforderungen an die Versuchsanlagen

Vor Start des Vorhabens, im Jahr 2018, wurden von VCS die ersten Regelungsfunktionen für Eisspeicheranlagen (Einzelanlage ohne kalte Nahwärme) entwickelt. Die Hardware-Basis ist eine SPS (Speicher-Programmierbare Steuerung) in einen Schaltschrank. Seitdem wird diese Steuerung (Produktname „Vitocontrol“) in immer mehr Projekten eingesetzt.

Aus der Datenbasis der 300 Anlagen wurden 28 identifiziert, die sich mit den vorgesehenen Anwendungsbereichen des Forschungsvorhabens, d. h. Mehrfamilienhäuser und Quartiere, decken und bei denen VCS nicht nur den Eisspeicher geliefert hat, sondern die komplette Anlage, d. h. Eisspeicher, Wärmepumpe, Solarabsorber, Gaskessel und Regelung.

4.1.5 Abstimmung der Anforderungen mit den österreichischen Partnern

Die ursprünglich geplante Unterstützung der von den österreichischen Partnern organisierten Workshops mit den assoziierten Partnern inklusive einer eventuellen Teilnahme konnte durch die Corona-Einschränkungen nur sehr eingeschränkt stattfinden. Meist fand der Austausch in Webmeetings statt.

Referenzgebäude und Lastprofile für den Vergleich der Gesamtenergieversorgungskonzepte

Es wurde mit AEE Intec eine gemeinsame Basis für den Vergleich der Gesamtenergieversorgungskonzepte geschaffen.

Die wichtigsten Rahmendaten sind:

Als Gebäude wurde ein Mehrfamilienhaus gewählt, welches bereits von den österreichischen Partnern im Forschungsprojekt „Vorgefertigte Fassadenelemente mit maximal integrierten HVAC-Komponenten und –Systemen zur Bestandssanierung“ [82] untersucht wurde (vgl. Abbildung 4-1, Tabelle 4-1). Dadurch liegen detaillierte Bauteildaten und Referenzsimulationen für dieses Objekt vor.

Auszug aus dem Endbericht [82]: *Aus der Bauepoche „1961 bis 1980“ wurde ein dreigeschossiges Mehrfamilienhaus (Baujahr in den 60er Jahren), in dem sich 12 Wohnungen mit einer Gesamtwohnnutzfläche von ca. 603 m² (Gesamtbruttogeschoßfläche von 687 m²) befinden, ausgewählt. Im gegenständlichen Projekt wurden grundsätzlich nur hochwertige thermische Gebäudesanierungen mit einem sehr guten energetischen Standard betrachtet. Zum einen wurde der Standard eines guten Niedrigenergiehauses (spezifischer Heizwärmebedarf von 30 kWh pro m² Bruttogeschoßfläche im Jahr, ohne Lüftungswärmerückgewinnung), zum anderen der eines Passivhauses (spezifischer Heizwärmebedarf von 15 kWh pro m² Bruttogeschoßfläche im Jahr, mit Lüftungswärmerückgewinnung) angesetzt.*

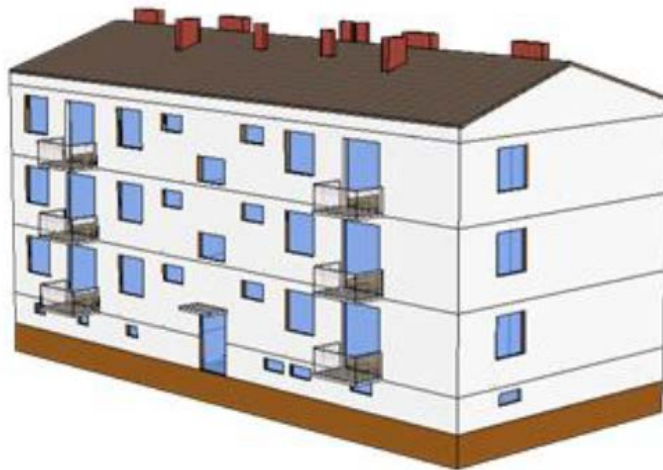


Abbildung 4-1: Referenzgebäude aus [82], ein saniertes Mehrfamilienhaus aus den 1960er Jahren

Tabelle 4-1: Ausgewählte Daten des Referenzgebäude aus [82]

		HWB 15	HWB 30
Heizgradtage	Kd	3571	3571
Kompaktheit A/V	m ⁻¹	0,47	0,47
Bauweise		schwer	schwer
spezif. Heizwärmebedarf am Standortklima	kWh/m ² BGF a	14,1	29,0
flächenbezogene Heizlastabschätzung	W/m ² BGF	14,95	20,72
Personenbelegung	P	30	30

Für das Forschungsprojekt Sol4City wurden die folgenden zwei Szenarien gewählt:

Heizung

- Szenario „MFH HWB 30“: Referenzgebäude aus [82] mit 30 kWh/m²/a (am Standort Graz)
- Szenario „MFH GEG“: Änderung (Verschlechterung) der Bauteileigenschaften bis die aktuelle Version des GEG gerade noch eingehalten wird. Das Referenz-Heizsystem für die Berechnungen ist eine Wärmepumpe die das Erdreich als Wärmequelle nutzt (Erdreich-Wärmepumpe).
- Szenario „Büro GEG“: Interne Lasten für Bürogebäude (50 W/m² zu Arbeitszeiten, siehe AP 4.2), Änderung (Verschlechterung) der Bauteileigenschaften bis die aktuelle Version des GEG gerade noch eingehalten wird. Das Referenz-Heizsystem für die Berechnungen ist eine Erdreich-Wärmepumpe.

Kühlung

- Szenario „MFH GEG“: Kühlung der Räume im Sommer auf 24 °C Raumtemperatur über Flächenheizsysteme, Kühlleistung bis 10 W/m²
- Szenario „Büro GEG“: Kühlung der Räume im Sommer auf 24 °C Raumtemperatur über Flächenheizsysteme (Kühlleistung bis 10 W/m²) und ggf. Lüftungsanlage

Klimadaten

Als Gebäudestandort wurde Graz im Vorgängerprojekt [82] festgelegt und in den durchgeführten Simulationen wurden die zugehörigen Klimadaten verwendet.

Für die Betrachtung im aktuellen Forschungsprojekt Sol4City wird zusätzlich der Referenzstandort Potsdam gewählt.

Warmwasser

Im Vorgängerprojekt [82], aus dem das Gebäude gewählt wurde, ist ein täglicher Warmwasserverbrauch von 30 l/Person/Tag bei 60 °C angenommen worden. Leider liegt für die Wohnungen nur ein Verbrauchsprofil mit der Zeitauflösung 1 h vor. Dies erscheint im aktuellen Projekt für den Vergleich von elektrischen Durchlauferhitzern mit Speicher-Warmwasserbereitern ungeeignet. Weiterhin ist das identische Profil für alle Wohnungen von den im Projekt Sol4City zu entwickelnden prädiktiven Regelverfahren (zu) einfach zu erlernen und würde in der Praxis nicht erreichbare Vorteile dieser Verfahren vorspielen.

Daher werden für das Projekt Sol4City 3 Varianten gewählt:

- EU Tapping Cycle M (entspricht mit rund 6 kWh/Tag in etwa den Daten aus [38]), Zirkulationsleitung auf 60 °C bei zentraler Warmwasserbereitung, zufällige zeitliche Verschiebung des Verbrauchsprofils je Wohnung (Vermeidung der Gleichzeitigkeit)
- Stochastischer Lastprofilgenerator dhwCalc [83] mit 30 l/Person/Tag bei 60 °C im Mehrfamilienhaus
- Kein Warmwasserbedarf im Bürogebäude

Elektrischer Energieverbrauch

Lastprofile für Haushalt und Gewerbe stellen u. a. BDEW und VDI bereit:

- BDEW Standardlastprofile [84]
- VDI 4655 [85]

Beide Lastprofile sind für die Betrachtungen im aktuellen Projekt nur bedingt geeignet, da sie statistisch aus sehr vielen gleichartigen Verbrauchsprofilen ermittelt wurden und nur 15 Minuten Mittelwerte ausweisen. Das Profil aus wenigen Typtage ist von prädiktiven Regelverfahren (zu) einfach zu erlernen und würde in der Praxis nicht erreichbare Vorteile dieser Verfahren vorspielen. Daher werden die beiden Lastprofile für spezielle Untersuchungen im Rahmen des Projekts Sol4City um ein weiteres Verfahren ergänzt:

- Stochastischer Lastprofilgenerator [86] und [87], Jahresverbrauch des Profils wie BDEW und VDI

Das Verbrauchsprofil der E-Mobilität wird von den österreichischen Partnern ermittelt und bereitgestellt. Ergänzend können die Profile aus [88] verwendet werden.

4.2 Gebäudekühlung

Die sommerliche Raumkühlung ist ein wichtiger Baustein für eine behagliche Aufenthaltsumgebung. Mit Hilfe der Systemkomponenten von Eisspeicheranlagen sind unterschiedliche Kühlkonzepte möglich.

Während im Wohnungsbau die Kühlung in Deutschland noch als Luxus eingestuft wird, ist bei der Mischnutzung in Quartieren eine Kühlung von Gebäuden mit gewerblicher Nutzung als Büro oder Geschäft eine unbedingte Anforderung. Die erforderliche Kühlleistung und auch die jährliche benötigte Kältemenge unterscheiden sich erheblich zwischen den einzelnen Projekten.

Mit dem Fokus auf die Gebäudekühlung wurden 349 Projekte ausgewertet. Die betrachteten Projekte lassen sich den folgenden Segmenten zuordnen:

- 37 % Wohnbau (Mehrfamilienhaus, Wohnquartiere)
- 27 % Verwaltung (Gewerbe-/Bürogebäude)
- 11 % Industrie (Produktion, Logistik)
- 8 % Bildung/Erziehung (Hochschulen, Schulen, Kindergärten)
- 16 % Andere

Kühlleistung

- Im Wohnbereich ist in den Sommermonaten eine moderate Temperierung über die Fußbodenheizung oder Kühldecken üblich. Die Kälteleistung ist durch das Abgabesystem begrenzt und liegt bei $\sim 10 \text{ W/m}^2$.
- In Büros sind neben dem solaren Eintrag durch die Fenster teils erhebliche interne Lasten durch Personen, Computer und Beleuchtung von bis zu 50 W/m^2 vorhanden. Ein Kältebedarf besteht fast ganzjährig.
- Einen hohen Kältebedarf haben Geschäfte. Durch Personen (Personal und Kunden) und Beleuchtung (Ladenbeleuchtung, Produktdarstellung) werden hier Werte bis 100 W/m^2 erreicht. Eine durchgehende Kälteversorgung auch im Winter ist meist gefordert.
- Den höchsten Wert mit inneren Lasten von bis zu 150 W/m^2 erreichen Restaurants bzw. Hotels in den Konferenzräumen. Eine durchgehende Kälteversorgung auch im Winter ist meist gefordert.

Anlagentechnik

- 60 % der Anlagen mit „Natural Cooling“ (NC = Kühlen aus dem Eisspeicher)
- 40 % der Anlagen zusätzlich mit „Active Cooling“ (AC = Kühlen mit der Wärmepumpe)
- 20 % der Anlagen mit (leistungsfähigerem) externem Plattenwärmeübertrager für die Kühlung, da ein in den Eisspeicher integrierter Wärmeübertrager die Kältelast des Gebäudes nicht decken kann

4.2.1 Technologie der Kälteverteilung (Lüftung, Kühldecken, Gebäudekern, Fußboden)

Eine direkte Auswertung des Kälteverteilungssystems ist nicht möglich, da die untersuchten Daten keine Informationen über die Verteilung der Kälte nach dem Kühlwärmeübertrager bzw. dem Kältepufferspeicher enthalten. Anhand der zugeordneten Gebäudesegmente und der Projekterfahrung ist es allerdings möglich, eine realistische Einschätzung zu der verwendeten Technologie vorzunehmen.

Im Wohnbau kommt im Allgemeinen eine Flächenkühlung über den Fußboden zum Einsatz. In Verwaltungs- und Industriegebäude wird der Anteil der Lüftungskühlung auf ca. 80 % geschätzt. Bei Bildungseinrichtungen liegt der Anteil der Lüftungskühlung in der Größenordnung von 50 %.

Bezogen auf die Gewichtung der verschiedenen Gebäudesegmente bedeutet dies, dass in 60 % der betrachteten Projekte eine Flächenkühlung zum Einsatz kommt und in 40 % der Projekte eine Lüftungskühlung.

4.2.2 Gefordertes Temperaturniveau und Leistung sowie Energie, Gegenüberstellung mit dem Wärmebedarf

Bei den ausgewerteten Projekten liegt die mittlere Kühllast bei 399 kW und die mittlere Heizlast bei 375 kW. Damit liegen die beiden Gebäudekennwerte auf demselben Niveau. Insbesondere im Neubau zeigt sich, dass in der Spitze der Betrag der Kühllast über dem Betrag der Heizlast liegt. Der Median der Heiz- und Kühllast der betrachteten Projekte liegt bei 140 kW. Das Temperaturniveau liegt zwischen 10 °C und 18 °C Kühlvorlauftemperatur; je nach Art der Kühlverteilung. Nur bei sehr wenigen Anlagen mit Prozesskühlung und bei Luftentfeuchtungsanlagen werden Temperaturen zwischen 4 °C und 10 °C benötigt.

4.2.3 Umsetzung im Gesamtenergieversorgungssystem

Für den Kälteversorgungsteil des Gesamtversorgungssystems ergibt sich die Anforderung eine sehr große Bandbreite der Leistung zur Verfügung stellen zu können. Das Kältesystem wird, wie auch das Heizsystem, auf den maximalen Bedarf ausgelegt. In den betrachteten Systemen sollen die Wärmepumpe und der Eisspeicher beides abdecken. Entsprechend der

Leistung müssen für den Heizbetrieb oder für den Kühlbetrieb ausreichend Speicherkapazitäten vorgesehen werden. Pufferspeicher werden typischerweise nicht nur nach der benötigten Kapazität eingeplant, sondern auch nach dem verfügbaren Platz. Eine Unterdimensionierung der Speicherkapazität ist somit fast immer gegeben. Bei Eisspeicheranlagen kann (theoretisch) der Eisspeicher selbst als weiterer Puffer dienen. Das Versorgungssystem muss diese zusätzliche Anforderung jedoch berücksichtigen.

Der Kühlbetrieb sollte bei Eisspeicheranlagen für einen energieeffizienten Betrieb soweit möglich durch das im Winter aufgebaute Eis erfolgen. Die direkte, aktive Kühlung mit der Wärmepumpe und „Entsorgung“ der Abwärme mit einem Rückkühler sollte auf den notwendigen zusätzlichen Kühlbedarf beschränkt bleiben. Abhängig vom Temperaturniveau des Kältebedarfs ist der direkten, aktiven Kühlung am Tag sogar eine Vorkühlung in der Nacht bei moderaten Außentemperaturen vorzuziehen, da hier höhere Leistungszahlen der Wärmepumpe erreicht werden. In vielen Anlagen ist ein gleichzeitiger Wärme- und Kältebedarf zu verzeichnen, so dass dieser Betriebsmodus auch berücksichtigt werden muss. Insgesamt ergeben sich somit folgende Betriebszustände:

- Natural Cooling (Kühlen mit dem Eisspeicher, kein Betrieb der Wärmepumpe)
- Kühlen bei Heizbetrieb der Wärmepumpe
- Freie Kühlung (niedrige Außentemperaturen in der Nacht werden zur Kühlung ohne Betrieb der Wärmepumpe genutzt)
- Nächtliche Vorkühlung des Eisspeichers mit Betrieb der Wärmepumpe
- Aktive Kühlung mit der Wärmepumpe

Im Abschnitt 5.2 (Systemregelung) wird eine entwickelte Lösung für eine Einzelanlage beschrieben. Die Umsetzung für ein kaltes Nahwärmenetz sowie die Optimierung der Lösungen erfolgt im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens.

4.2.4 Untersuchungen an einer der Versuchsanlagen

Im Vorhaben wurde die hydraulische Umsetzung für den Kühlbetrieb in kalten Netzen insbesondere am Beispiel einer Versuchsanlage weiter untersucht. Die Kühlung der Räume in den Mehrfamilienhäusern erfolgt klassisch über die Fußboden-Heizkreise. Wie bereits in Abschnitt 3.3 erwähnt, erfolgt die Jahressystemsimulation des Gesamtenergieversorgungskonzeptes der Anlage 1 (Vgl. AP 4.5, Kapitel 4.5) in der Simulationsumgebung TRNSYS.

Das TRNSYS-Modell der Anlage 1 wird in diesem AP dazu verwendet, das Verhalten der zentralen Systemkomponenten im Kühlfall zu analysieren. So bildet die Jahressystemsimulation neben dem Heizenergiebedarf und der Zusammensetzung der Heizenergiebereitstellung auch den in Abbildung 4-2 dargestellten Kühlenergiebedarf und die Zusammensetzung der Kühlenergiebereitstellung für die in AP 3.3 (vgl. Kapitel 3.3) betrachteten Kollektor-Typen ab.

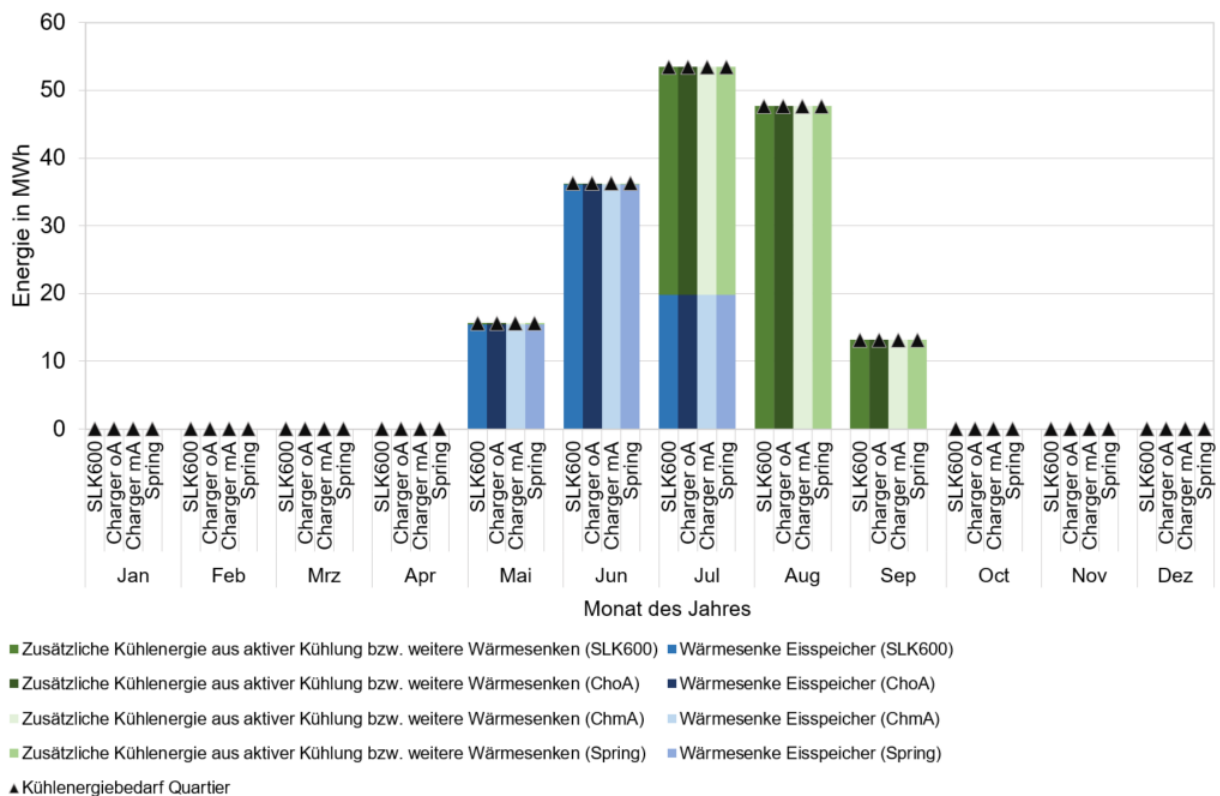


Abbildung 4-2: Monatlicher Kühlenergiebedarf und Zusammensetzung der Kühlenergiebereitstellung für vier Kollektor-Typen

Da für alle vier Kollektor-Typen unter den gegebenen Anfangs- und Randbedingungen entsprechend der Beschreibung in Anlage B am Ende des Winters eine maximale Vereisung des Eisspeichers (90 % Eis, 10 % Wasser) erreicht wird, stellen alle blauen Balken in Abbildung 4-2 die Energie dar, die aus einem maximal vereisten Eisspeicher zur Gebäudekühlung verwendet werden kann.

Der Betriebsmodus, bei welchem der Eisspeicher als Wärmesenke und die Fußbodenheizung der Gebäude des Quartiers als Wärmequelle mehrerer dezentraler Wärmeübertrager verwendet werden, wird als „Natural Cooling“ bezeichnet.

Das Volumen des Eisspeichers ist in diesem Beispiel für den jährlichen Heizenergiebedarf ausgelegt. In der Systemsimulation kann der Natural Cooling - Betriebsmodus somit nur bis Mitte Juli genutzt werden. Ab diesem Zeitpunkt liegt das Speichermedium des Eisspeichers bereits im vollständig flüssigen Zustand vor und hat eine Temperatur von 16 °C. Der Eisspeicher kann somit nicht weiter als Wärmesenke für die benötigten Netztemperaturen dienen. Die Balken in verschiedenen Grüntönen zeigen daher die Kühlenergie, die durch andere Betriebsmodi, wie beispielsweise die aktive Kühlung („Active Cooling“) mit Hilfe der Wärmepumpe, welche das Kollektorfeld als Wärmesenke nutzt, bereitgestellt werden muss.

In den Gesprächen mit dem Planungsbüro wurden bezüglich der Wärme- bzw. Kälteversorgung zwei Besonderheiten bekannt, von denen nur der erste Punkt (gebäudeweise Heizen oder Kühlen) in den TRNSYS Simulation berücksichtigt werden konnte:

- In jedem Mehrfamilienhaus wird an einer zentralen Stelle von einer Beheizung auf eine Kühlung der Fußbodenkreise umgeschaltet. Eine Anlagenhydraulik zur wohnungsweisen oder raumweisen Umschaltung von Heizen auf Kühlen ist aus Kostengründen nicht umsetzbar.
- Das kalte Nahwärmenetz muss für die Kühlung bei Temperaturen über 0 °C betrieben werden, da sonst ein Frostschaden an den Wärmeübertragern zur Trennung der Heizkreise vom kalten Nahwärmenetz droht. Aus Kostengründen wurde auf eine aufwendigere Hydraulik mit der Möglichkeit zur Temperaturanhebung am Wärmeübertrager verzichtet.

Das in Abbildung 4-3 gezeigte hydraulische Anschlussschema zeigt einen direkten Anschluss sowohl der Wärmepumpe als auch des Kühlwärmübertragers an das kalte Netz.

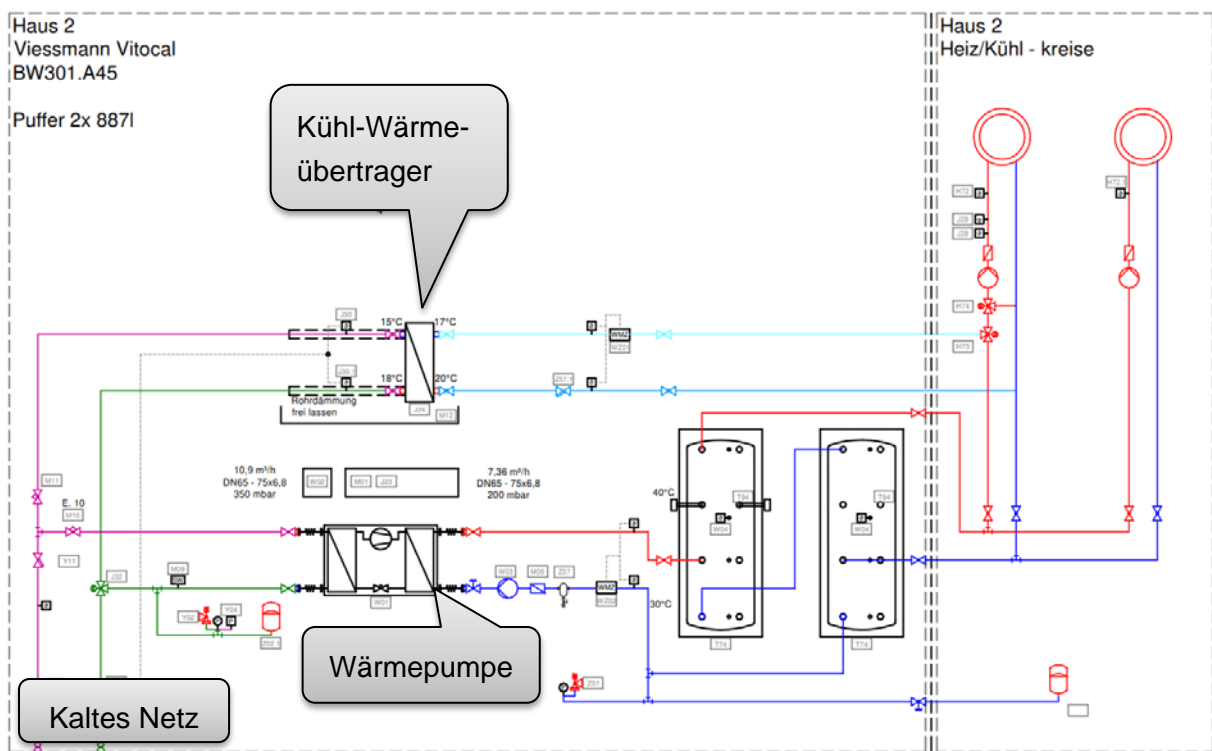


Abbildung 4-3: Hydraulikschema Mehrfamilienhäuser aus der Versuchsanlage

Die zentrale Umschaltung der Wärme- oder Kälteversorgung im Mehrfamilienhaus und unter Umständen auch die Betriebsbedingungen des kalten Netzes wirken sich direkt auf die Erfüllbarkeit der Komfortansprüche der Bewohner aus. Die Lösungsansätze für die Anlage 1 werden in Kapitel 4.5 (AP 4.5: Simulation, Erprobung und Optimierung des Gesamtsystems zur Versuchsanlage) erläutert.

4.2.5 Erfahrungen aus weiteren realisierten Projekten

Ergänzend wurden weitere rund 30 Anlagen, deren Planungsunterlagen VCS vorlagen, analysiert. Es zeigt sich, dass von den Planungsbüros sehr unterschiedliche Varianten umgesetzt werden. Teils sind diese während der Laufzeit des Vorhabens in Betrieb genommen worden.

Identifiziert wurden in einzelnen Umsetzungen folgende Nachteile:

- Schemen lassen nur alternativ Heiz- oder Kühlbetrieb zu und schließen einen gleichzeitigen, gemeinsamen Betrieb aus. Diese Eigenschaft der Anlage 1 wurde bei mehreren Anlagen identifiziert.
- Im Kühlbetrieb werden andere, teilweise parallel erwünschte Betriebsarten, wie die Nutzung des Absorbers als Quelle für die Wärmepumpe zur Warmwasserbereitung, ausgeschlossen. Die Wärmepumpe muss bei laufendem Kühlbetrieb zwangsweise auch im Sommer mit den ggf. unvorteilhaft niedrigen Temperaturen des Eisspeichers betrieben werden.
- Der Frostschutz für den Kühlwärmeübertrager ist nur schwer umsetzbar. Dieses Ergebnis aus der Versuchsanlage 1 wurde in mehreren Anlagen aufgefunden.
- Die Ausregelung einer Solltemperatur nur mit den Volumenströmen durch den Kühlwärmeübertrager und ohne einen Mischer funktioniert bei Teillast nur unzureichend. Das Problem ist dabei weniger die Ausregelung der Leistung als vielmehr die Unterschreitung des Taupunkts mit massiver Kondenswasserbildung an den Bauteilen.
- Einzelne Baugruppen werden doppelt ausgeführt, um eine Ausfallsicherheit zu erreichen. Dabei werden andere, auch leicht von einem Ausfall betroffene Bauteile oder Baugruppen übersehen. Beispiel: Zwei parallele, einzeln absperrbare Wärmeübertrager aber nur ein zentrales Umschaltventil für die gesamte Betriebsart.
- Es wurde in einem Einzelfall parallel ein kaltes und ein warmes Netz verlegt, um eine vermeintliche Redundanz und Ausfallsicherheit zu erreichen.
- Die gesetzlichen Anforderungen der AwSV an Anlagen mit Wasser-Glykol-Gemischen sind nicht beachtet [89]. Die spätere Nachrüstung erforderlicher Sensoren oder Aktoren ist schwierig, führt teilweise zu weitreichenden Änderungen und wird dadurch teuer.
- Die Befüllung und Entgasung von größeren, verteilten Hydrauliksystemen mit Wasser-Glykol-Gemisch stellen die Installationsbetriebe immer wieder vor Herausforderungen. Das erarbeitete Wissen aus Solarthermieanlagen ist offensichtlich im Bereich der Wärmepumpenanlagen noch nicht präsent [90]

4.2.6 Anforderungen an den Planungsprozess

Bezüglich der Auslegung der Anlagen hat das Monitoring gezeigt, dass bei vielen Anlagen das Eis im Eisspeicher zum Zeitpunkt der höchsten Kühllast im Sommer bereits häufig abgeschmolzen ist. Die Geschwindigkeit des Abschmelzens ist unter anderem sowohl vom Benutzerverhalten als auch, in geringerem Maße, vom Erdwärmeeintrag in den Eisspeicher abhängig. Liegt die benötigte Kühlvorlauftemperatur oberhalb der Temperatur des Erdreichs um den Behälter und den Rohrleitungen, so kann auch zu einem gewissen Grad eine passive Kühlung über das Erdreich erfolgen. Wenn die Kühlung bei Gebäuden nicht eine geschuldete Leistung des Betreibers ist, wird der Eisspeicher häufig nicht auf die Kühlung, sondern die Beheizung ausgelegt. Bei Anlagen mit hoher Priorität der Kühlung wird neben der Betriebsweise „Natural Cooling“ auch die Betriebsweise „Active Cooling“ projektiert und umgesetzt. Um die Kühlung auch im Sommer zu jedem Zeitpunkt zu gewährleisten, haben sich zwei Konzepte bei den Anlagen durchgesetzt: „Active Cooling“ mit einer nächtlichen Vorkonditionierung des Eisspeichers und Wärmeabfuhr über die Solar-Luft-Kollektoren sowie „Active Cooling“ über direkte Nutzung der Kälteleistung der Wärmepumpe und Wärmeabfuhr mit einem Rückkühler.

Die Vorkonditionierung des Eisspeichers in der Nacht ist nur dann sinnvoll, wenn die benötigte Temperatur deutlich über der unbeeinflussten Erdreichtemperatur liegt, also über ca. 10 °C. In diesem Fall und bei „geschuldeter Kühlleistung“ kann die Vorkonditionierung energetisch vorteilhaft sein, da die deutlich geringere Umgebungstemperatur in der Nacht zu einer höheren Effizienz der Wärmepumpe im Kühlbetrieb führt. Eine pauschale Aussage ist hier nicht möglich, da sich die einzelnen Projekte zu sehr in benötigtem Temperaturniveau und dem zeitlichen Auftreten des „Active Cooling“ unterscheiden. Die Kapazität der Vorkonditionierung ist begrenzt, da im Sommer nur wenige Stunden in der Nacht einem Kühlbetrieb des Tages von teilweise mehr als 12 h gegenüberstehen.

Anmerkung: Von Planungsbüros wurde vereinzelt diese Art der Kühlung als „Natürliche Kühlung“ bezeichnet, da im Moment des Kühlbetriebs tatsächlich die Kühlung als „Natural Cooling“ aus dem Eisspeicher bezogen wird. Aus Sicht der Gesamtbilanz ist das jedoch eindeutig nicht der Fall, sondern es handelt sich um ein zeitlich verschobenes Active Cooling.

Bereits oben wurde auf folgende Problematik der Anlage 1 hingewiesen: Für den Kühlbetrieb muss, aufgrund einer fehlenden Mischeinrichtung vor dem Wärmeübertrager, das mit einem Wasser-Glykol-Gemisch betriebene Netz auf eine Temperatur über 0 °C gebracht werden, um den Frostschutz des Kühl-Wärmeübertragers, der auf der Sekundärseite von Wasser durchströmt wird, sicherzustellen. Das schließt das Kühlen von einzelnen Gebäuden oder Anwendungen in vielen Betriebssituationen unnötigerweise aus. Eine hydraulische Lösung, die unabhängig von der Netztemperatur arbeiten kann, ist zu bevorzugen.

Einige Anlagen weisen selbst im Winter zu bestimmten Uhrzeiten einen sehr hohen Kühllleistungsbedarf auf, der nur durch „Active Cooling“ abgedeckt werden kann, da die Leistung des Eisspeichers bei „Natural Cooling“ durch den Regenerationswärmeübertrager begrenzt ist. Dies ist insbesondere beim Bedarf von Prozesskälte für Fertigungsprozesse der Fall. Durch den in der Nacht laufenden Heizbetrieb ist oftmals die Temperatur in Teilbereichen oder in der kompletten Primärseite der Wärmepumpe und des (kalten) Netzes so weit abgesunken, dass

bei Wechsel zum „Active Cooling“ die Sole mit unter 0°C durch den Kühlwärmeübertrager geleitet und den Frostschutzwächter auslösen würde. Die Anlage kann in diesem Fall nur mit der relativ geringeren Leistung des „Natural Cooling“ betrieben werden. Dies ist beispielsweise bei dem in Abbildung 4-4 dargestellten Standardschema für Eisspeicheranlagen in (kleineren) Einzelgebäuden der Fall.

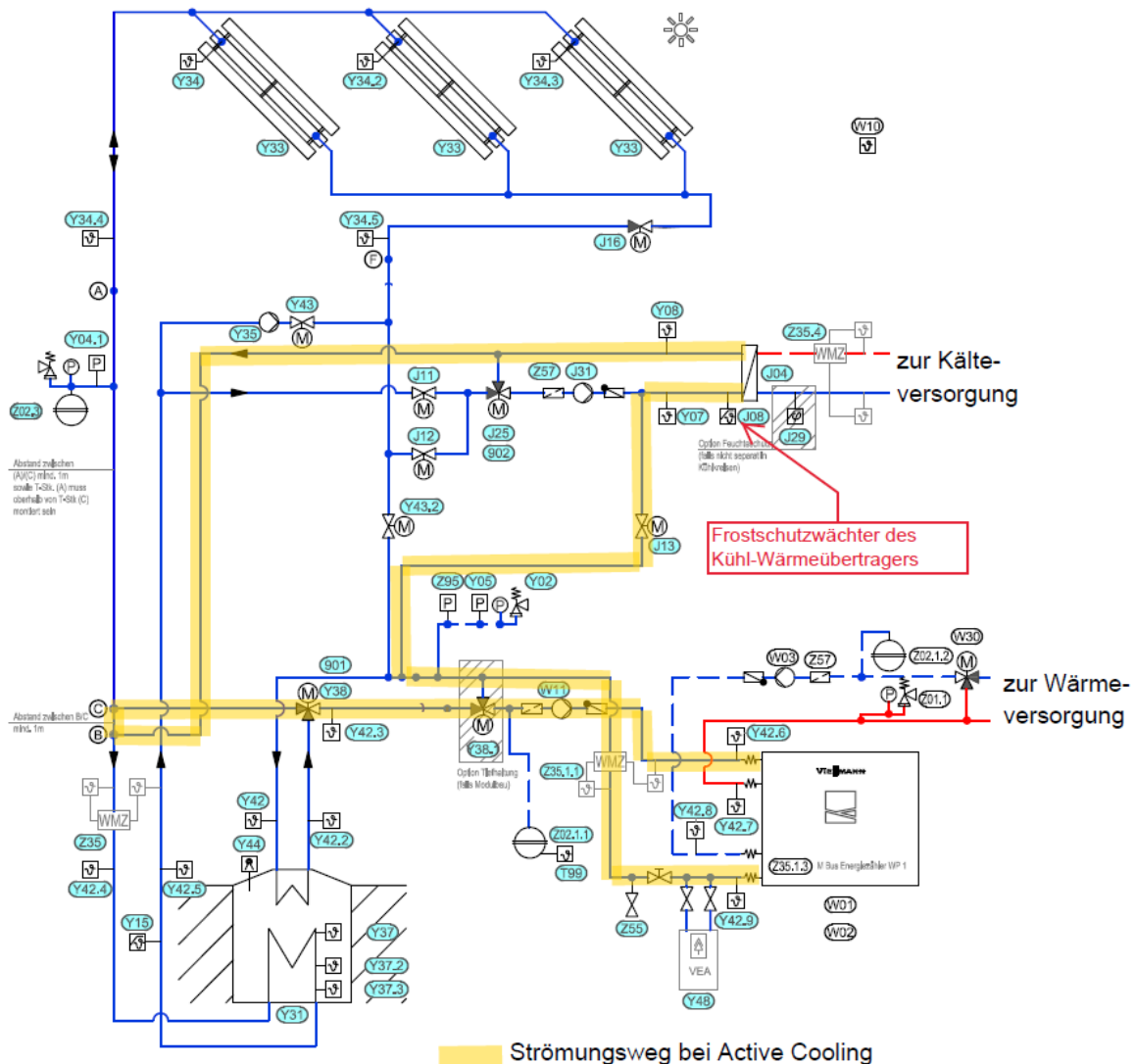


Abbildung 4-4: Strömungsweg bei „Active Cooling“ in einem Standard-Hydraulikschema. Ist durch vorangehenden Heizbetrieb die Primärseite mit Solar-Luftkollektoren und Eisspeicher bereits unter 0 °C gefallen, kann nicht auf den aktiven Kühlbetrieb, d. h. „Active Cooling“ umgeschaltet werden.

Eine technisch mögliche Anpassung könnte ein elektronischer Frostschutzthermostat mit einstellbarer Zeitverzögerung sein, womit während einer Vorspülphase die Frostschutzfunktion ausgesetzt werden kann und worüber der kalte Leitungsinhalt vorgewärmt werden könnte. Dieser Ansatz kann aber zu starken Einschränkungen des Betriebs der Anlage während dieser Phase führen, z.B. einem Unterbruch des Wärmepumpenbetriebs und damit der Heizwärmeversorgung.

In diesem Fall ist, wie bei dem oben beschriebenen Problem in den Anlagen mit kaltem Netz, eine hydraulische Lösung zu bevorzugen, die den Kühlbetrieb unabhängig von den Temperaturen auf der Primärseite der Wärmepumpe erlaubt. Eine solche hydraulische Lösung ist beispielsweise die in Abbildung 4-5 dargestellte Einbindung des Kühl-Wärmeübertragers mit einem separaten, gemischten Kreis.

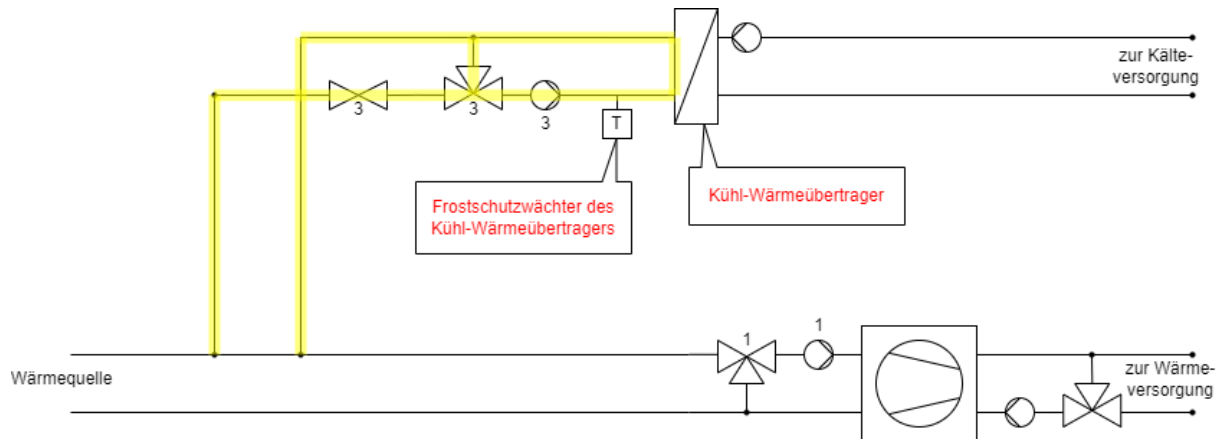


Abbildung 4-5: Einbindung des Kühl-Wärmeübertragers mit einem separaten, gemischten Kreis (gelb hinterlegter Strömungsweg).

Weiterhin hat sich insbesondere bei Anlagen mit sehr hoher Kühllast im Sommer und sehr geringem Kühlbedarf im Winter gezeigt, dass sehr geringer Kühlbedarf teilweise nur aus dem kalten Leitungsinhalt zwischen Kühlwärmeübertrager und einer Kühlquelle gedeckt wird. In einem Fall mit einer winterlichen Kühllast im niedrigen einstelligen Prozentbereich der maximalen Kühllast wurde der Kältepufferspeicher aus dem Leitungsinhalt zwischen Kühlwärmeübertrager und Kühlkreismischer geladen, ohne, dass der Kühlkreismischer öffnete. Der Kältepufferspeicher hat im Schwachlastbetrieb eine ähnliche Kapazität wie der Leitungsinhalt und verhält sich dann im Starklastbetrieb wie eine hydraulische Weiche. Eine solch geringe Kühllast lässt sich dann auch nicht in Wärmemengenzählern registrieren, welche direkt an der Kühlquelle, z.B. dem Eisspeicher, positioniert sind.

Zusammenfassend kann für den Kühlbetrieb der Anlagen folgende Liste an Anforderungen aufgestellt werden:

1. Die primärseitige Temperatur des kalten Netzes am Eintritt des Kühlwärmeübertragers muss unabhängig von allen Betriebszuständen der Anlage und des Netzes geregelt werden können. Eine Möglichkeit der Umsetzung ist ein Mischer vor dem Wärmeübertrager.
2. Der Kühlbetrieb unter Nutzung des Eisspeichers müssen unabhängig von weiteren Betriebsarten in der Anlage oder im Netz möglich sein. Einzelne Gebäude oder Wohnungen müssen unabhängig von Heizbetrieb oder Warmwasserbereitung über den Kühlbetrieb entscheiden können.
3. Die gesetzlichen Anforderungen müssen erfüllt werden. Die vorgeschriebene Sensorik und Aktorik zur Überwachung muss im Anlagenschema integriert sein.

4. Die Planung der Sensorik zur Absicherung des Anlagenbetriebs, wie z.B. Frostschutzwächter, muss die geplanten Betriebsmodi sowie Heiz- und Kühllastverhältnisse berücksichtigen.
5. Die Regeln zur Befüllung und Entgasung von Anlagen mit Wasser-Glykol-Gemisch ist zu beachten. Hierbei können die Erfahrungen aus der Solarthermie hilfreich sein.

4.2.7 Regelungsverfahren zur Bereitstellung der Kühlenergie

Wie bereits zuvor erwähnt, ist bei vielen Anlagen das zur Gebäudekühlung dienende Eis bereits lange vor dem Auftreten der höchsten Kühllast durch einen vorangegangenen Kühlbetrieb mit geringerer Kühllast geschmolzen. Eine der Gegenmaßnahmen, die im aktuellen Vorhaben entwickelt wurde, ist das zeitliche und bedarfsabhängige Management des Vereisungszustands bis hin zum gezielten Eisaufbau gegen Ende der Heizperiode (siehe AP 5, Kapitel 4.5). Die etwas geringere Effizienz der Wärmepumpe beim Eisaufbau gegenüber einem direkten Kühlbetrieb der Wärmepumpe bei bereits höheren Außentemperaturen wird bei weitem kompensiert, so dass durch diese Betriebsweise die Gesamteffizienz der Anlage über das Jahr deutlich erhöht werden kann.

Sollte es trotzdem zu Engpässen bei der Kälteversorgung im Sommer kommen, so können durch die Anlagensteuerung, bewertet durch den zeitlichen Verlauf des Vereisungszustands, in Stufen folgende Maßnahmen zur Reduzierung der Kältelast ergriffen werden:

- Es wird bewusst nicht die Solltemperatur der Kühlung bereitgestellt, sondern eine höhere Temperatur. Die Leistungsabnahme reduziert sich für alle Verbraucher.
- Verbraucher werden in ihrem „Anspruch auf Kälteversorgung“ vom Betreiber gruppiert (beispielsweise Serverräume vor Büroräumen). Verbraucher mit niedrigerem Anspruch werden bei Engpässen nicht oder mit geringerer Leistung versorgt.
- Eine Erweiterung der modellprädiktiven Regelungsverfahren auch für den Kühlbetrieb ist denkbar, bei denen angelehnt an die im Vorhaben betrachteten Verfahren für den Heizbetrieb auch die vorhandene Kälte über den Sommer verteilt wird.

4.3 Entwicklung von Konzepten für Mehrfamilienhäuser und Quartiere

Die im Vorhaben „Sol4City“ entwickelten bzw. optimierten Wärmequellen und Speicher werden in diesem AP zu Gesamtversorgungskonzepten kombiniert, um diese anschließend unter Verwendung der Lastprofile für Wärme, Haushaltsstrom und E-Mobilität zu optimieren. Betrachtet wird daher sowohl die thermische als auch die elektrische Energieversorgung. Aufgrund der großen Anzahl möglicher Kombinationen wird vorerst der Fokus auf die folgenden vier vielversprechenden Konzepte gelegt:

Systemansatz 1		Systemansatz 2	
Solartechnologie:	PVT	Solartechnologie:	Sorptionskollektor, PV
Wärmeerzeuger:	(Kleinst-)Wärmepumpe	Wärmeerzeuger:	beliebig
Speicher:	Bauteilaktivierung, vakuumgedämmter Wasserspeicher, Batterie	Speicher:	Sorptionsspeicher, vakuumwärmege- dämmter Wasserspeicher, Batterie
Kühlung:	(Kleinst-)Wärmepumpe	Kühlung:	Sorptionskühlung
<p>Bei diesem Ansatz kann die PVT-Anlage auf niedrigem Temperaturniveau betrieben werden, welches direkt in der Bauteilaktivierung genutzt wird. Dies führt gleichzeitig zu deutlich besseren PV-Erträgen. Durch die aktive Verwendung der massiven Gebäudeteile und die daraus resultierenden kapazitiven thermischen Effekte kann die normative maximale Heizlast deutlich reduziert werden, wodurch eine signifikant kleinere Leistung der Nachheizung notwendig ist. Hier kann eine Kleinst-Wärmepumpe zum Einsatz kommen. Ein hocheffizient wärmege- dämmter Wasserspeicher sowie eine Batterie runden das Konzept ab. Es wird eine solarthermische Deckung von 85% und eine solarelektrische Deckung von 60% angestrebt.</p>		<p>Systemansatz 2 nutzt Sorptionstechnologie für eine hocheffiziente, saisonale Wärmespeicherung. Ähnlich Ansatz 1 ergänzen ein hocheffizient wärmege- dämmter Wasserspeicher sowie eine Batterie das System zu einem Gesamtkonzept. Bei diesem Ansatz wird u.a. das integrale Zusammenspiel von Sorptionskollektor und PV-Anlage hinsichtlich der Ausheizung bzw. Trocknung des Haupt-Sorptionsspeichers untersucht und technisch wie wirtschaftlich bewertet. Des Weiteren wird die Möglichkeit der Gebäudekühlung mit Hilfe von Sorptionstechnologie untersucht und bewertet. Wie bei Systemansatz 1 werden eine solarthermische Deckung von 85% und eine solarelektrische Deckung von 60% angestrebt.</p>	
Systemansatz 3		Systemansatz 4	
Solartechnologie:	Sorptionskollektor, PVT	Solartechnologie:	Solarabsorber und / oder PVT
Wärmeerzeuger:	-	Wärmeerzeuger:	Wärmepumpe 4 a) zentral Wärmepumpe mit größerer Leistung 4 b) dezentrale Kleinst-Wärmepumpe
Speicher:	Bauteilaktivierung, Sorptionsspeicher, vakuumgedämmter Wasserspeicher, Batterie	Speicher:	Eisspeicher, vakuumgedämmter Wasserspeicher, Batterie
Kühlung:	Sorptionskühlung	Kühlung:	Eisspeicher
<p>Mit Systemansatz 3 soll ein hochintegriertes Versorgungssystem erarbeitet werden, welches eine vollständige solare Deckung des Wärmebedarfs ermöglicht. Neben der technischen Machbarkeit wird insbesondere der wirtschaftliche Aspekt betrachtet, um eine Konkurrenzfähigkeit mit Systemen, die eine Nachheizung benötigen, bewerten zu können. Das System benötigt exakt aufeinander abgestimmte Komponenten, um den technischen und wirtschaftlichen Aufwand möglichst gering zu halten.</p>		<p>Bei diesem auf einem Anergienetz basierenden Ansatz wird ein Systemkonzept entwickelt, das sich u. a. dadurch auszeichnet, dass mit dem Eisspeicher ein Latentspeicher zum Einsatz kommt. Aufgrund der Ausnutzung des Phasenwechsels „schmelzen und erstarren“ wird, für die Bereitstellung der gleichen thermischen Kapazität ein deutlich geringeres Volumen benötigt als beim Einsatz eines Wasserspeichers ohne Phasenwechsel. Zusätzlich ergeben sich dadurch deutliche Synergieeffekte, dass der Eisspeicher auch zur Gebäudekühlung genutzt werden kann.</p>	

Für die Weiterentwicklung der auf Sorptionsprozessen basierenden Komponenten und/oder der Bauteilaktivierung ist die Simulation der im Projektantrag genannten Systemansätze

1 bis 3 von Bedeutung. Da diese Komponenten und Systemansätze Schwerpunkte der Arbeiten der österreichischen Partner darstellen, werden sie hier nicht betrachtet.

Der Systemansatz 4 hingegen beinhaltet sämtliche derzeit auf deutscher Seite relevanten Komponenten, welche über ein Anergienetz gekoppelt werden. Schlüsselkomponenten stellen hierbei die als Wärmequelle für die Wärmepumpe sowie zur Gebäudekühlung dienenden Latentspeicher sowie PVT-Hybridkollektoren oder solarthermischen Absorber dar.

Basierend auf Systemansatz 4 konnten 16 Konzeptlösungen konkretisiert werden. Diese Konzeptlösungen unterscheiden sich durch die Kombination von zentralen oder dezentralen (Kleinst-) Wärmepumpen (WP) mit zentraler oder dezentraler Solartechnologie und mit oder ohne Latentspeicher. Die Solartechnologie kann dabei sowohl durch ein photovoltaik-thermisches (PVT-) Hybridkollektorfeld als auch durch ein solarthermisches Absorberfeld mit separierter Photovoltaik (PV-) Anlage gegeben sein kann. Abbildung 4-6 veranschaulicht die Beschreibung der verschiedenen Konzeptlösungen.

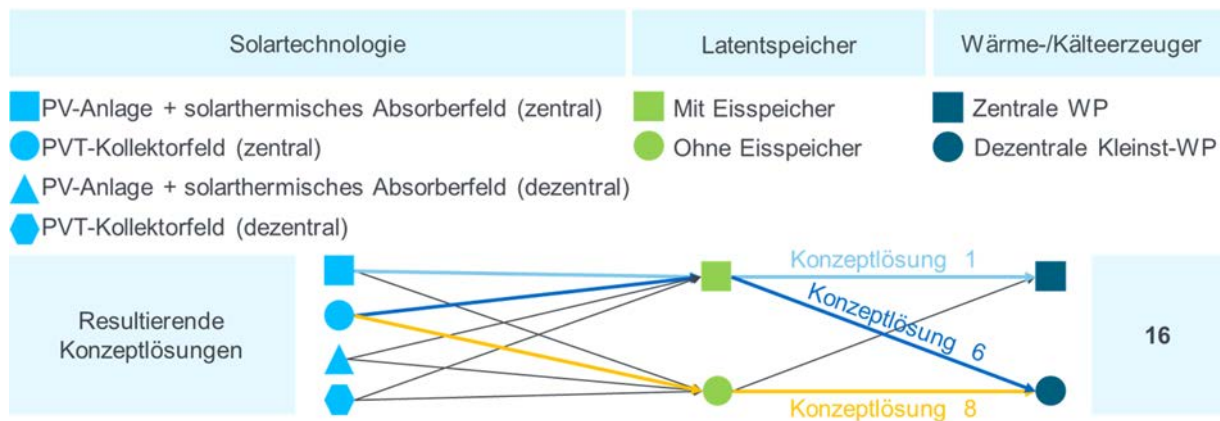


Abbildung 4-6: Zur Auswahl stehende Komponenten für eine Kombination aus Solartechnologie, Latentspeicher, Wärme-/Kälteerzeuger

Je nach hydraulischem Aufbau des Gesamtversorgungskonzeptes können ferner verschiedene Betriebsarten gewählt werden, um die Kälte- und Wärmeversorgung des Quartiers oder Mehrfamilienhauses mit einem möglichst hohen solarthermischen und/oder solarelektrischen Deckungsanteil zu gewährleisten.

Für Konzeptlösungen ohne Latentspeicher stehen dabei folgende drei Betriebsarten zur Verfügung:

- Dient die Solartechnologie als direkte Wärmequelle der Wärmepumpe wird die Betriebsart mit „Heizen mit Solartechnologie“ bezeichnet.
- Dient die Solartechnologie mit Hilfe der nächtlichen Außentemperaturabsenkung als direkte Wärmesenke der Gebäude wird die Betriebsart mit „Free Cooling“ bezeichnet.
- Kann das Temperaturniveau durch natürliche Kühlung nicht mehr erreicht werden, kann die Wärmepumpe das Gebäude als Wärmequelle nutzen und die Solartechnologie als Wärmesenke. Diese Betriebsart wird mit „Active Cooling“ bezeichnet.

Konzeptlösungen mit Latentspeicher können auf drei weitere Betriebsarten Solar- und Umweltenergie nutzen. So kann der Latentspeicher entweder als direkte Wärmequelle für die Wärmepumpe dienen („Heizen mit Latentspeicher“) oder als direkte Wärmesenke für die passive Gebäudekühlung („Natural Cooling“). Ferner kann die Solartechnologie als Wärmequelle für den Latentspeicher eingesetzt werden („Regeneration mit Solartechnologie“).

Aufgrund der großen Anzahl an Konzeptlösungen und Betriebsarten und der daraus resultierenden Komplexität dieses Arbeitspaketes wurden nur zwei der Basis-Konzeptlösungen mit den entsprechenden Betriebsarten detailliert betrachtet.

Die erste Konzeptlösung (Konzeptlösung 6) besteht aus dezentralen Wärmepumpen, welche über ein Anergienetz Wärme- und Kälte aus einem zentralen PVT-Hybridkollektorfeld und einem Eisspeicher nutzt. Es wird ein Quartier mit Flächenheizungen zur Temperierung der Gebäude, abgebildet. Die Wahl dieser Konzeptlösung ist begründet durch die messtechnische Untersuchung einer der drei Versuchsanlagen in AP 4.5 (siehe Abschnitt 4.5.2). Ein Vergleich von Messwerten und Simulationsergebnissen soll für die Anpassung und Validierung des entstehenden Modells verwendet werden. Abbildung 4-7 zeigt eine schematische Darstellung der Konzeptlösung 6. Bei der zweiten detaillierter untersuchten Konzeptlösung (Konzeptlösung 8) kommen dezentrale PVT-Luft-Sole-Kollektoren und dezentrale Wärmepumpen zum Einsatz. Bei dieser Konzeptlösung wird kein Eisspeicher berücksichtigt.

Simulationen, die für diese Konzeptlösungen mit der Software TRNSYS durchgeführt wurden, werden in Kapitel 4.5.6 vorgestellt.

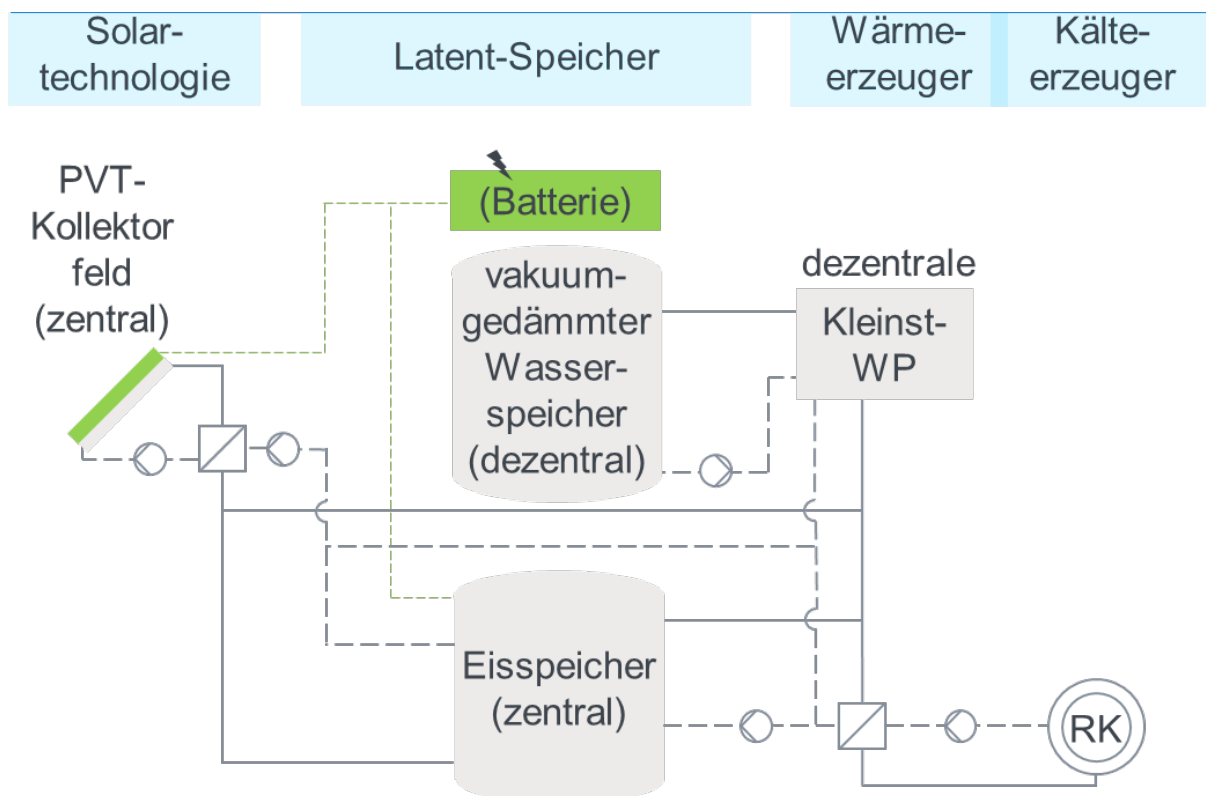


Abbildung 4-7: Schematische Darstellung Konzeptlösung 6.

4.4 Netzentlastung durch aktive Interaktion

Bei den Anlagen mit Wärmepumpen und kalten Netzen gibt es verschiedene Gründe, dass die Last nicht immer direkt bei Auftreten gedeckt werden kann, sondern eine zeitliche Diskrepanz durch lokale Speicher, d. h. Warmwasserspeicher und Heizungspufferspeicher, überbrückt werden muss. In den elektrischen Netzen ist dieser Effekt bekannt und Maßnahmen zur Behebung in Einzelanlagen sind in Wärmepumpen serienmäßig implementiert (§14a EnWG, EVU-Sperre, SG-Ready). Für kalte Netze und Eisspeicheranlagen mit Solar-Luft-Kollektoren als Wärmequelle der Wärmepumpe kommen weitere Einschränkungen hinzu: Die Kapazität von Wärmequellen und Transportwegen ist nicht unbegrenzt verfügbar. Es muss eine zeitliche Verschiebung auf der Verbraucherseite erfolgen. Dies hat nicht zuletzt auch monetäre Gründe: Eine Auslegung auf den gleichzeitigen Betrieb aller Wärmepumpen in einem Netz würde die Investitionen in die Quellenanlage, das Wärmenetz und ggf. auch in das elektrische Netz stark erhöhen.

Im Folgenden wird daher anhand eines Beispiels ein Konzept zur Netzentlastung und gleichzeitigen Verteilung des Lastganges aufgezeigt. Dabei ist es egal, ob der Engpass auf der elektrischen oder thermischen Seite entsteht. Tatsächlich ist in dem Projekt der Engpass potenziell die thermische Seite: Das kalte Netz kann in extremen Situationen nicht alle Wärmepumpen gleichzeitig versorgen. Es muss daher eine Priorität und Zuschalt-Reihenfolgen geschaffen werden. Die Verbraucherseite besteht aus dezentralen Wärmepumpen, welche ihr Lastmanagement autark regeln. Alle Wärmepumpen sind kommunikativ über einen Systembus mit der Haupttechnikzentrale verbunden. Die Lastprofile unterscheiden sich aufgrund unterschiedlicher Gebäude, passiven solaren Gewinnen und gegenseitiger Beschattung, aber auch durch das Nutzerverhalten sehr stark, da sowohl eine Kindertagesstätte als auch Wohngebäude versorgt werden.

Eine einfache Lösung ist ein Token-Ring-Verfahren: Hierbei bekommen nacheinander eine oder mehrere Wärmepumpen das „Einschaltrecht“. Die Token werden rein nach einem zeitlichen Kriterium den Wärmepumpen zugeordnet. Da die unterschiedlichen Lastprofile hierbei keinerlei Berücksichtigung finden, ist dieses Verfahren jedoch ungeeignet.

Für die Anlage 1 wurde von VCS ein Algorithmus entwickelt, welcher neben den Eigenschaften und Anforderungen der Wärmeerzeuger auch die Versorgungssituation der einzelnen Gebäude berücksichtigt. Hauptentscheidungskriterium ist die aktuell verfügbare Quellenleistung. Die physikalischen Führungsgrößen sind die aktuellen Systemtemperaturen in Abhängigkeit von den Betriebsarten der Gebäude, d. h. Heizen oder Kühlen.

Um den einzelnen Wärmepumpen den Betrieb zu erlauben bzw. diesen zu unterbinden, wurde die Funktion "Smart Grid Ready (SG-Ready)" der Wärmepumpen genutzt. Diese Schnittstelle ist als Standard bei Wärmepumpen seit vielen Jahren etabliert und bietet neben der Sperre der Wärmepumpe, um einen Verbrauch zu unterbinden, auch die Möglichkeit den Verbrauch, d. h. hier die Beladung der Speicher, durch einen Verbrauchsanreiz vorzuziehen [91].

Zur Priorisierung der Wärmepumpen werden folgende Informationen je Gebäude berücksichtigt:

- aktuelle Betriebsmeldung der Wärmepumpe, d. h. „ein“ oder „aus“
- aktueller Zustand der EVU-Sperre (durch den Energieversorger)
- aktueller, extern durch den Energieversorger vorgegebener Status der SG-Ready-Funktion (Sperre, Normal, erhöhter Verbrauch, maximaler Verbrauch)
- Beladungszustand der lokalen Speicher
- aktuelle Betriebszeit der Wärmepumpe (Verdichterlaufzeit)
- aktuelle Sperrzeit durch Netzentlastungs-Algorithmus
- Eigenschaften der Wärmepumpe wie Mindestlaufzeit, Wiedereinschalt-Sperrzeit und Kälteleistung
- Vorrangstatus: hierüber können weniger wichtige Verbraucher in der Priorität zurückgestuft werden, beispielsweise der Kindergarten in der Anlage 1 in den Ferienzeiten

Die Priorisierung der oben genannten Daten ist zur Laufzeit veränderbar.

Auf Basis der Priorisierung und der aktuell verfügbaren Systemleistung ergibt sich sowohl eine Sperre bestimmter Wärmepumpen als auch ein außerplanmäßiger, d. h. vorgezogener Betrieb anderer Wärmepumpen.

Vor der Implementierung in die Versuchsanlage wurde der Algorithmus am Systemprüfstand von VCS getestet. Im Feldtest wurde in der Anlage 1 das Verfahren zum Lastmanagement im kalten Netz bewertet: Eine Überlast des Netzes konnte vermieden werden, die Netztemperaturen wurden durch die Verschiebung der Last einzelner Gebäude im vorgesehenen Bereich gehalten. Trotz der Lastverschiebung wurde der Einsatz der elektrischen Nachheizung in den Gebäuden nicht merklich gegenüber der Planung erhöht.

Anlagenverhalten ohne Lastmanagement

In Starklastzeiten arbeiteten die Wärmepumpen gleichzeitig und unabhängig voneinander. Meist an der unteren Einsatzgrenze (-10°C) mit häufiger Selbstabschaltung. Damit konnte keine Wärmeversorgung sichergestellt werden. Die Elektroheizeinsätze mussten einspringen und eine Unterversorgung verhindern.

Anlagenverhalten mit Lastmanagement

Nachfolgend wird die Versorgung anhand der Ereignisse im Januar 2024 analysiert. Mit aktiviertem Lastmanagement gab es keine Versorgungsengpässe. Leistungsreduzierungen mussten nur stundenweise erfolgen, was zu keinen merklichen Komforteinbußen in den Verbraucherkreisen führte. Die Elektroheizeinsätze mussten nur bei Störungen der Wärmeerzeuger einspringen.

Anlagenverhalten während Eingriff durch das Lastmanagement

An dem Beispieltag 22.01.2024 liefen bis zu 9 Verdichter gleichzeitig. Durchschnittlich waren 3,2 Verdichter in Betrieb. Dabei ist der Eingriff durch das Lastmanagement berücksichtigt.

Ablauf

Um 03:30 ergab es sich (zufällig), dass kein Verdichter in Betrieb war. Alle Heizpuffer waren gefüllt. In den darauffolgenden 60 Minuten gingen nach und nach wieder bis zu 7 Wärmepumpen in den Heizbetrieb. Dies führte zu einem schnellen Absinken der Quelltemperatur bis -6,5 °C (siehe Abb. NN) und zum erfolgreichen Eingreifen des Lastmanagements (Abb. NN) ab ca. 04:30. Das Lastmanagement sorgte in den darauffolgenden 78 Minuten dafür, dass maximal 3 Verdichter gleichzeitig in Betrieb waren. Als sich die Quelle erholt hatte, wurden wieder alle Verdichter freigegeben. Dann griff der Nachholeffekt für 60 Minuten, währenddessen bis zu 9 Verdichter gleichzeitig in Betrieb waren, ohne dass das Lastmanagement erneut eingreifen musste.

Aufgrund dieses Eingriffes konnte eine Lastverschiebung ohne nennenswerte Komforteinbuße erreicht werden.

In Abbildung 4-8 bis Abbildung 4-11 sind die Eingriff-Signale, Temperaturen, Anzahl der Verdichter in Betrieb sowie die Markierungen der Ereignisse im betrachteten Zeitraum zu sehen. Die Auswirkungen in Haus 7 sind in Abbildung 4-12 dargestellt. Der Puffer-Istwert sank während der Sperre auf 27,8°C ab (Soll: 34,7°C).

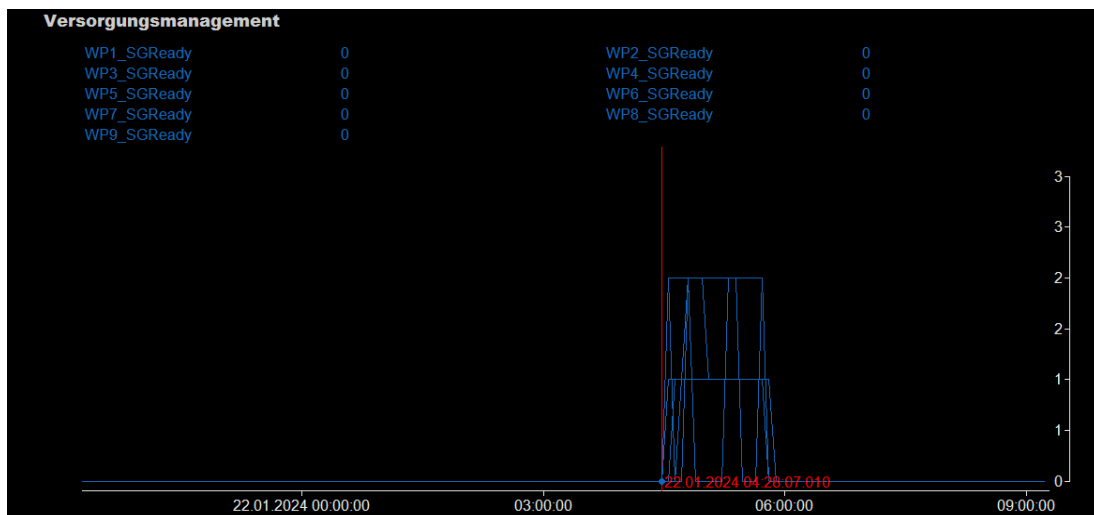


Abbildung 4-8: Eingriff-Signale; Legende: SG-Ready Stufen: 0 - Normalbetrieb, 1 - Sperre, 2 - Anlaufempfehlung, 3 – Anlaufbefehl

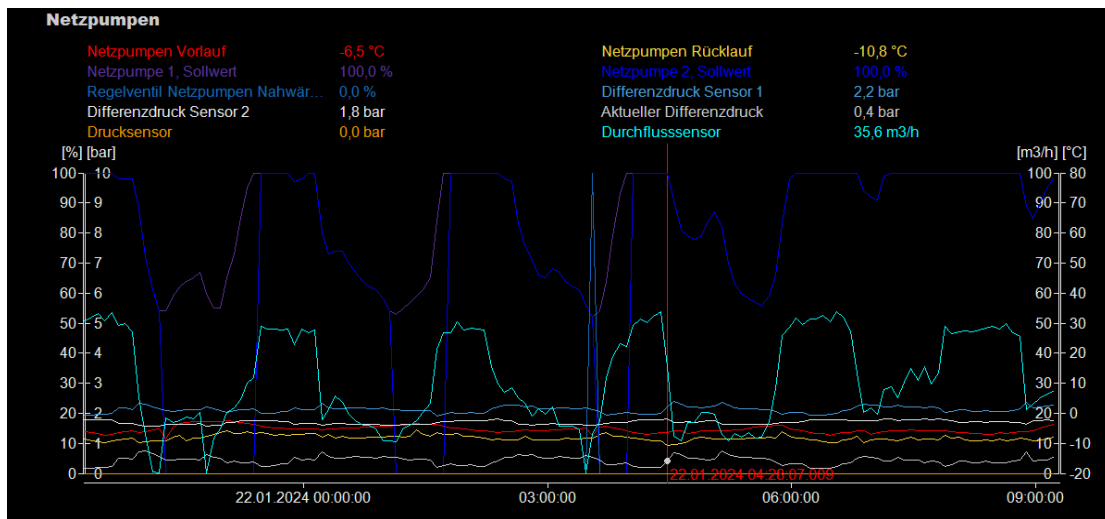


Abbildung 4-9: Messwerte der Temperaturen im Netz

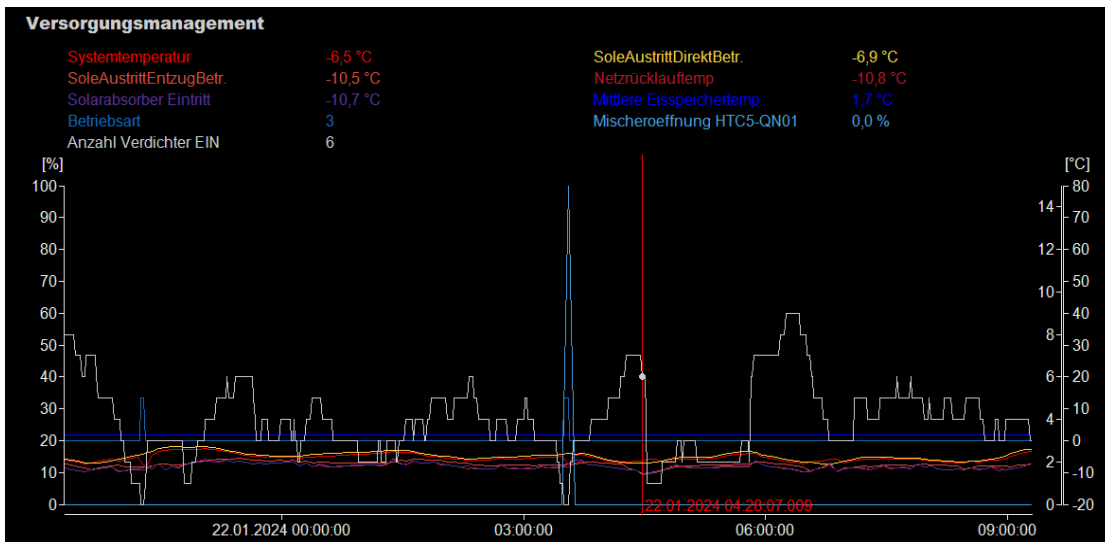


Abbildung 4-10: Anzahl der in Betrieb befindlichen Verdichter (weiße Linie)

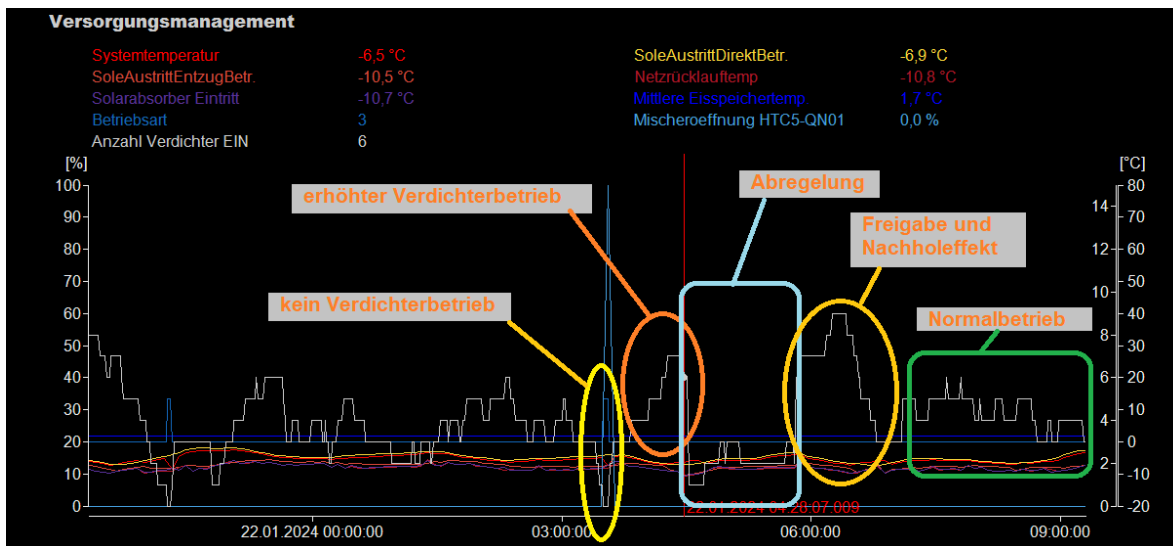


Abbildung 4-11: Markierung Ereignisse

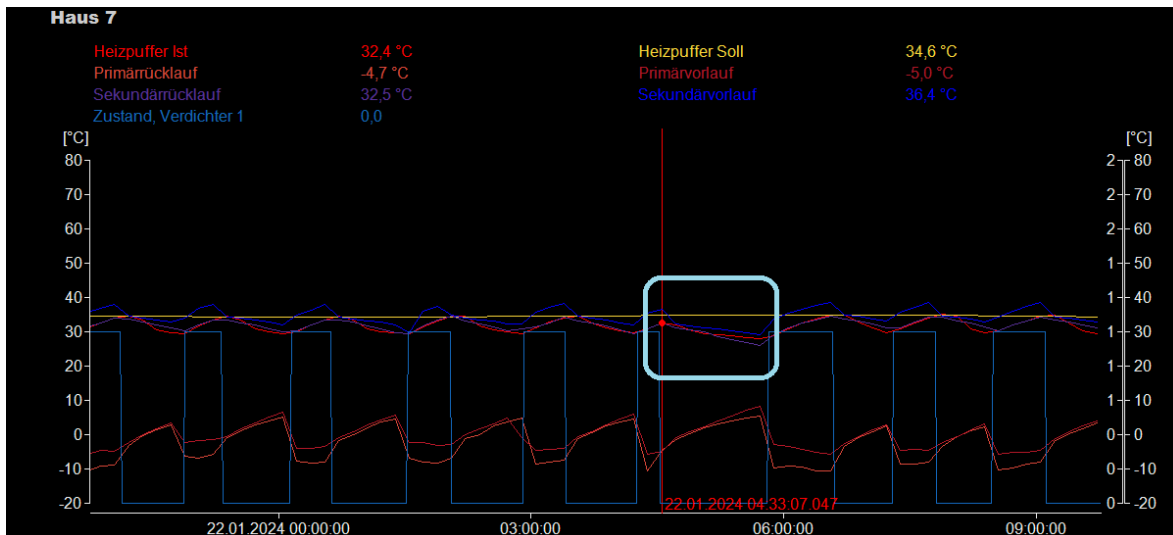


Abbildung 4-12: Hervorhebung Systemtemperaturen Haus 7

Statistik

In folgender Abbildung 4-13 bei einer kurzzeitigen Betrachtung von 5-Minuten Intervallen zeigt die obere Häufigkeitsverteilung ohne Lastmanagement, dass im mittel fast 4 Wärmepumpen gleichzeitig im Betrieb waren. Im unteren Teil ist bei aktivem Lastmanagement die maximale Anzahl der Wärmepumpen in Betrieb deutlich eingeschränkt, der Mittelwert sinkt auf etwa 3,6 Wärmepumpen in Betrieb.

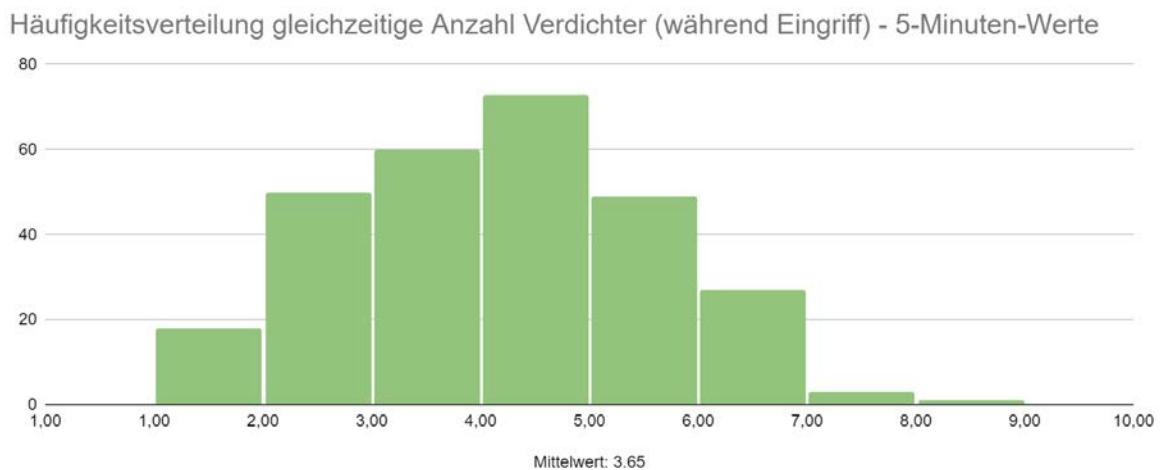
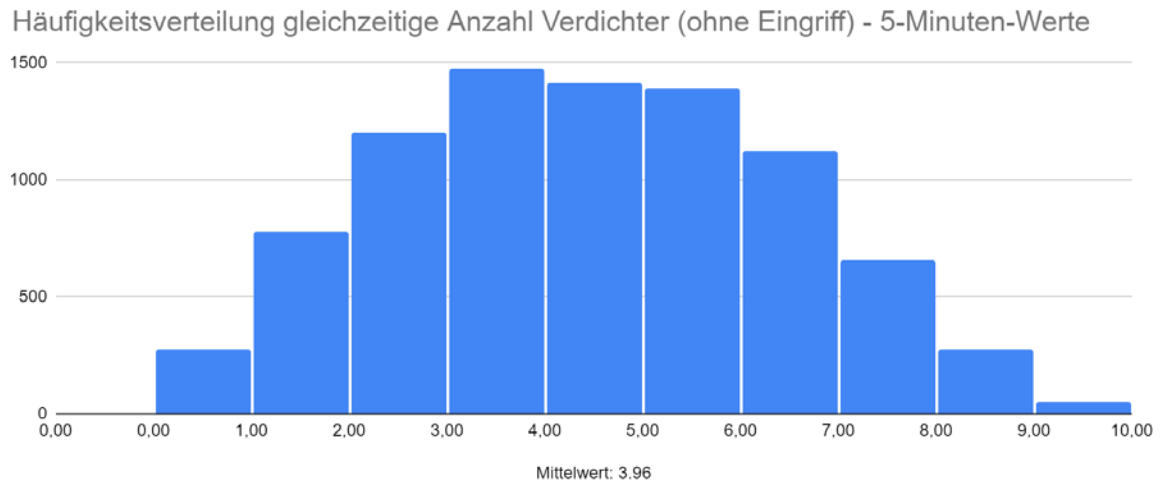
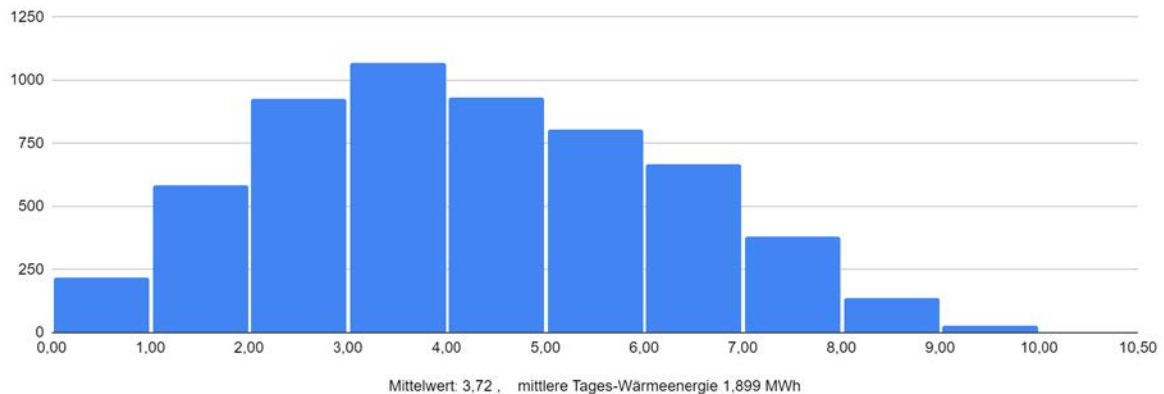


Abbildung 4-13: Durch das Lastmanagement wurde ein gleichzeitiger Betrieb aller Wärmepumpen eingeschränkt.

Betrachtet man den Eingriff des Lastmanagements über ganze Tage (siehe Abbildung 4-14), so zeigt sich die Grenze, ab der ein Lastmanagement benötigt wird. Bis etwa 2 MWh Wärme-lieferung pro Tag kommt die Anlage ohne das Lastmanagement aus. Darüber muss das Lastmanagement eingreifen, um ein zu weites Absinken der Netztemperatur zu vermeiden, und dadurch einen ineffizienten Betrieb der Wärmepumpen zu verhindern. Das Lastmanagement verschiebt dabei das Maximum der über den Tag gleichzeitig laufenden Wärmepumpen von 3,7 auf 4,4, ohne dass sich im rechten Bereich der Häufigkeitsverteilung ein nennenswerter Unterschied ergibt.

Häufigkeitsverteilung Gleichzeitigkeit Anzahl Verdichter an Tagen ohne Lastabwurf - Taggenau



Häufigkeitsverteilung Gleichzeitigkeit Anzahl Verdichter an Tagen mit Lastabwurf - Taggenau

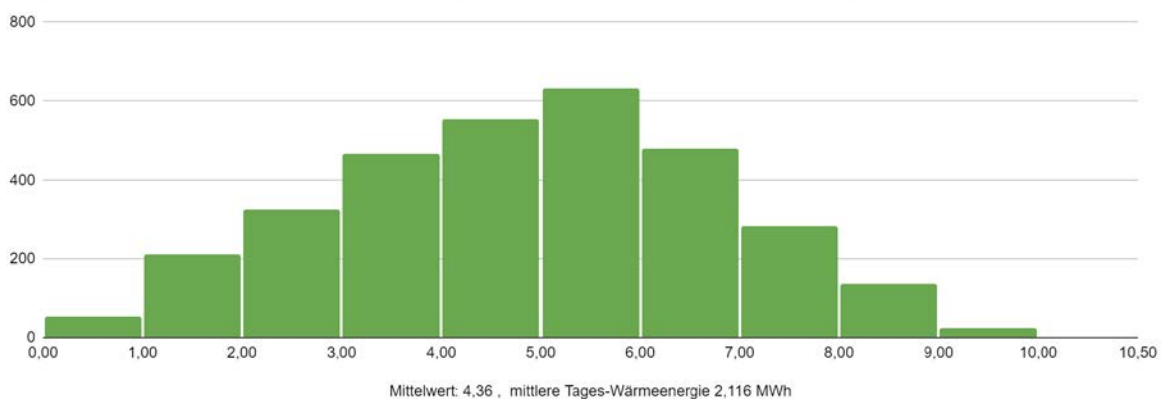


Abbildung 4-14: An Tagen mit Eingriff durch das Lastmanagement erhöht sich erwartungsgemäß die mittlere Gleichzeitigkeit.

Fazit

Aufgrund der Netzentlastungsfunktion und großer Gebädeträgheit (Speicherverhalten), konnte das Luft-Sole-Kollektorfeld mit nur 50 % der gegenüber einer konventionell geplanten Leistung ausgelegt werden.

4.5 Simulation, Erprobung und Optimierung des Gesamtsystems

Der zentrale Aspekt der für die Erprobung und Optimierung der Gesamtsysteme durchgeführten Arbeiten stellt die messtechnische Untersuchung von insgesamt drei Versuchsanlagen dar. Basierend auf verfügbaren und konsistenten Messergebnissen erfolgte für ausgewählte Versuchsanlagen auch eine Validierung der zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens der Anlagen entwickelten Simulationsmodelle.

Ursprünglich war die detaillierte messtechnische Analyse der vier Versuchsanlagen 1-4 geplant.

Aufgrund einer größeren systemtechnischen Relevanz der übrigen drei Versuchsanlagen und inkonsistenter Messdaten der Anlage 3 wurden für diese Versuchsanlage jedoch keine Messergebnisse der Energiebilanzen ausgewertet.

In den folgenden Unterkapiteln werden alle vier Anlagen beschrieben sowie die ermittelten Messergebnisse von drei Anlagen präsentiert und diskutiert. Soweit vorhanden werden in diesem Zusammenhang auch Ansätze für evtl. Optimierungsmaßnahmen aufgezeigt. Des Weiteren erfolgt bei den in Simulationsprogrammen abgebildeten Anlagen auch ein Vergleich der mittels Simulation berechneten Energiemengen mit den entsprechenden messtechnisch ermittelten Energiemengen.

4.5.1 Vorbemerkungen zur Messdatenauswertung

Das Ziel des technischen Monitorings war es nach Inbetriebnahme der Versuchsanlagen zunächst festzustellen, ob die Wärme- und Kälteversorgungssystem grundsätzlich funktioniert und die Messtechnik plausible Daten liefert. Dazu wurde durch das IGTE mit der Software MATLAB ein automatisierter Arbeitsablauf entwickelt, mit welchem die Rohmessdaten der einzelnen Messstellen zu einer Matrix mit einheitlichem Zeitstempel vorverarbeitet und gespeichert werden. Die vorverarbeiteten Rohmessdaten können mittels einer ebenfalls neu erstellten interaktiven Benutzeroberfläche für einen zu wählenden Betrachtungszeitraum in die Software geladen werden. Diese interaktive Benutzeroberfläche wird genutzt, um die gemessenen Temperaturen, Volumenströme, Leistungen und Wärmemengen, sowie die genannten Zusatzinformationen und das Betriebsmodus-Signal mittels sogenannter Heatmaps und Detailansichten auf deren Plausibilität zu prüfen. In Abbildung 4-15 ist eine solche Heatmap mit Messdaten diverser Temperatursensoren der Anlage 2 wochenweise unterteilt dargestellt. Wochenweise wird hier für jeden Temperatursensor die durchschnittliche Temperatur innerhalb der Woche farblich dargestellt. Dazu wurde am rechten Rand der Grafik eine Farbskala mit Legende ergänzt. Der Vorteil einer solchen Darstellung ist eine schnelle Erkennung von Unregelmäßigkeiten in den Messdaten einzelner Sensoren im visuellen Vergleich mit anderen in Zusammenhang stehenden Sensoren. Beispielsweise verzeichnen die untersten vier Sensoren in Abbildung 4-15 im rechten Drittel der Darstellung in einer Woche relativ niedrige Temperaturen, während alle anderen Sensoren in der gleichen Woche signifikant höhere Temperaturen aufzeichnen.

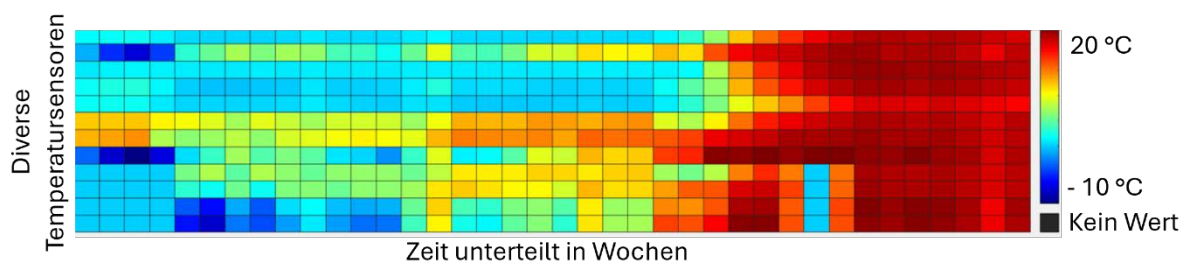


Abbildung 4-15: Beispielhafte Heatmap von Messdaten diverser Temperatursensoren der Anlage 2 wochenweise unterteilt

Bei Auffälligkeiten wie Datenlücken, unerwarteten Kurvenverläufen bzw. zu hohen oder zu geringen Messwerten, wird die Ursache geprüft. So sind Ursachen wie Datenübermittlungsfehler, fehlerhafte Messstellenzuweisungen oder eine Diskrepanz zwischen erforderlichen Datenpunkten und dem Zeitraum des Datenabrufs, bei gleichzeitig nicht ausreichendem Datenspeicherplatz auf die Soft- und Hardware der Messtechnik bzw. deren benutzerdefinierten Konfiguration zurückzuführen. Werden dagegen Soll-Temperaturen in Pufferspeichern oder an Verbrauchern nicht vollständig erreicht, liegen die Messwerte jedoch gleichzeitig in plausiblen Temperaturbereichen, ist die Ursache im Wärme- und Kälteversorgungssystem zu suchen.

Ist die grundsätzliche Funktionalität der Versuchsanlage sichergestellt, kann das Energiemonitoring durchgeführt werden. So werden die Gebäude und das Wärme- und Kälteversorgungssystem inklusive der Regelstrategien hinsichtlich der in der Planung angestrebten Eigenschaften, wie Spitzenlasten, Wärme- und Kältebedarfe, sowie der Zusammensetzung der Wärme- und Kühlenergiebereitstellung durch die Komponenten [67] detailliert untersucht. Dazu wurde ebenfalls mit der Software MATLAB ein automatisierter Arbeitsablauf für die Nachverarbeitung, d.h. die Approximation fehlender Datenpunkte und die monatliche Bilanzierung der Wärmemengen erstellt.

Das Ziel bei der Auswertung der Messdaten jeder der Versuchsanlagen, ist ein Vergleich des Wärmebedarfs, basierend auf den Planungsdaten, mit dem Wärmeverbrauch, ermittelt aus den Messdaten, sowie analog ein Vergleich des Kältebedarfs mit dem Kälteverbrauch. Außerdem sollen jeweils die monatlichen Arbeitszahlen der Wärmepumpen und der monatliche solarthermische Deckungsanteil auf Grundlage der Messdaten berechnet werden. In den folgenden Gleichung (4-1) und Gleichung (4-2) sind die hier verwendeten Definitionen der Kennwerte aufgeführt.

Die Arbeitszahl berechnet sich zu:

$$AZ = \frac{Q_{Nutz}}{W_{el}} = \frac{Q_{Nutz}}{Q_{Nutz} - Q_{Quellen} - Q_{Netz,Gewinne}} \quad (4-1)$$

mit

AZ	Monatliche Arbeitszahl in -
Q_{Nutz}	Monatliche, durch die Wärmepumpen gelieferte Nutzwärme in MWh
W_{el}	Monatliche elektrischer Strombedarf der Wärmepumpen in MWh
$Q_{Quellen}$	Monatliche durch die Wärmepumpen genutzte Wärme der Wärmequellen Eisspeicher und Luft-Sole-Kollektoren in MWh
$Q_{Netz,Gewinne}$	Monatliche Wärmegewinne vom Erdreich in das kalte Nahwärmenetz in MWh

Der solarthermische Deckungsanteil wird wie folgt berechnet:

$$f_{sol,th} = \frac{Q_{sol}}{Q_{Nutz}} \cdot 100\% \quad (4-2)$$

mit

$f_{sol,th}$	Monatlicher solarthermischer Deckungsanteil in %
Q_{sol}	Monatlicher solarer Wärmeertrag in MWh
Q_{bed}	Monatliche gesamte an Nutzende gelieferte Wärme in MWh

Da das Forschungsprojekt zum 29.02.2024 endete, wurde in den folgenden Auswertungen der Messdaten der einzelnen Versuchsanlagen die Heizsaison 2023/2024 nur bis inklusive Februar 2024 betrachtet.

4.5.2 Anlage 1

4.5.2.1 Anlagenbeschreibung

Bei dieser Anlage handelt es sich um ein Neubauquartier, welches neun Mehrfamilienhäuser sowie einen Kindergarten mit drei darüber liegenden Wohneinheiten (Gebäude 10 in Abbildung 4-16) umfasst. Die Gebäude sind mit unbeheizten Untergeschossen ausgestattet, in welchen sich neben einer Tiefgarage, Keller- und andere Nebenräume befinden. Aus Abbildung 4-16 ist die Anordnung der Gebäude ersichtlich. Insgesamt hat das Quartier mit 107 Wohneinheiten eine beheizte Nutzfläche von 8.567 m². Für die Auslegung der Anlagenkomponenten sowie des Wärmenetzes wird von einem Heizenergiebedarf von 520 MWh/a und einem Kühlerenergiebedarf von 168 MWh/a ausgegangen. Die maximale Heizlast beträgt hier 400 kW, die maximale Kühllast 240 kW. Weiterhin wird ein Gleichzeitigkeitsfaktor für die Wärmeversorgung von 0,5 berücksichtigt.

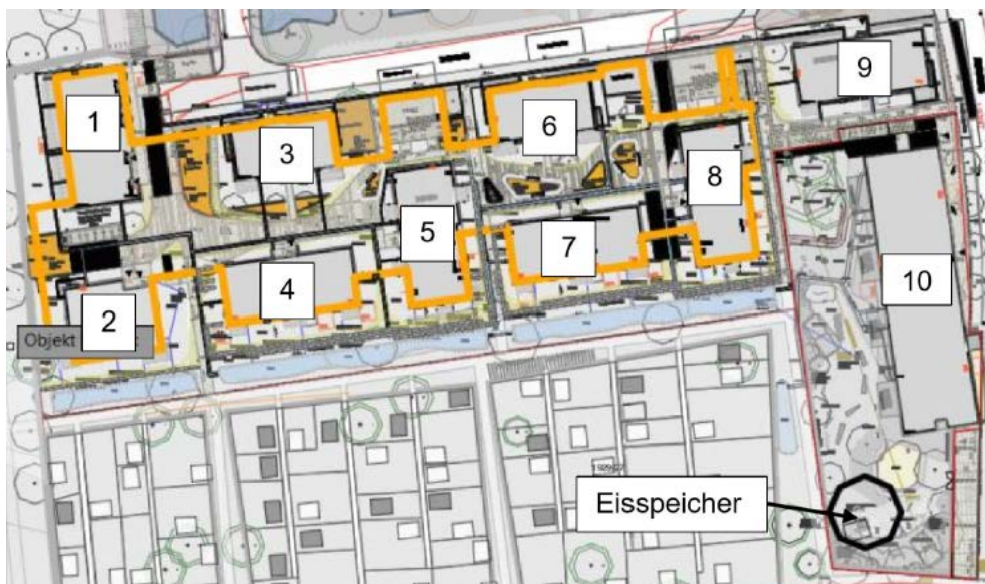


Abbildung 4-16: Lageplan des Neubauquartiers der Anlage 1

Die Beheizung der Gebäude erfolgt über Fußbodenheizungen mit 40 °C Vorlauftemperatur und 35 °C Rücklauftemperatur bzw. für die Gebäudekühlung mit 17 °C Vorlauftemperatur und 20 °C Rücklauftemperatur. Die Bäder sind zusätzlich mit Niedertemperatur-Heizkörpern bzw.

Handtuchheizkörpern ausgestattet. Das Trinkwarmwasser wird mit Hilfe von elektrischen Durchlauferhitzern bereit.

Die zentralen Komponenten des Energieversorgungskonzepts sind in diesem Konzept gebäudeweise dezentrale Sole-Wasser-Wärmepumpen, d. h. insgesamt 10 Stück, welche über ein kaltes Nahwärmenetz Energie aus einem zentralen Eisspeicher mit einem Wasservolumen von 660 m³ und einem zentralen Kollektorfeld aus 38 solarthermischen Luft-Sole-Kollektoren vom Typ SLK-600 mit einer Gesamtfläche von 137 m² nutzen. Die Kollektoren wurden dabei zweilagig übereinander montiert, wie auf Abbildung 4-17 rechts zu sehen. Die solarthermischen Luft-Sole-Kollektoren sind nicht mit PV-Modulen ausgerüstet, so dass von diesen keine solarelektrische Energie erzeugt wird. Abbildung 4-18 und Abbildung 4-19 zeigen den Eisspeicher im Bau.



Abbildung 4-17:Zweilagige Montage der Kollektoren des Typen SLK-600



Abbildung 4-18: Stahlbeton-Rundbehälter bzw. Eisspeicher (im Bau)



Abbildung 4-19: Eisspeicher – vorbereitet für den Einbau der Wärmeübertrager (im Bau)

Die Nennleistung der gebäudeweisen dezentralen Wärmepumpen richtet sich nach der jeweiligen Gebäude-Nutzfläche. So ist das Quartier mit fünf Sole-Wasser-Wärmepumpen vom Typ Viessmann Vitocal 300-G BW 301.A29, vier vom Typ Viessmann Vitocal 300-G BW 301.A45 und einer vom Typ Viessmann Vitocal 300-G Pro BW 302.DS140 ausgestattet. Die durchschnittliche thermische Nennleistung der Wärmepumpen beträgt 45 kW im Betriebspunkt B0/W35. Wobei der Betriebspunkt definiert ist durch die Eintrittstemperatur der Sole (B für engl. brine) verdampferseitig in °C und der Austrittstemperatur des Wassers (W) kondensatorseitig in °C.

Ebenfalls gebäudeweise dezentral werden zusätzliche Wärmeübertrager zur Realisierung der passiven Gebäudekühlung (Natural Cooling) eingesetzt. Im Gegensatz zur Anlage 2 (siehe nächstes Kapitel) ist in der Anlage 1 auch die Betriebsart „Active Cooling“ möglich (Beschreibung der Betriebsarten siehe 4.3). Dazu wurde ein zweiter zusätzlicher Wärmeübertrager in das Gebäude zehn eingebaut (siehe Abbildung 4-20). Die so bereitgestellte Kühlenergie wird von dort aus in das Netz eingespeist. Die Gebäude eins bis neun verfügen nicht über diesen zweiten zusätzlichen Wärmeübertrager. Insgesamt wird das kalte Nahwärmenetz mit sogenannten „harten“ Umschaltpunkten betrieben, sodass von Mai bis September ausschließlich gekühlt, von Oktober bis April ausschließlich geheizt werden kann.

Für eine energieeffiziente, funktions- und bedarfsgerechte Betriebsweise des Wärme- und Kälteversorgungssystems mit Eisspeicher können mit der zugehörigen Regelstrategie insgesamt 15 Betriebsmodi realisiert werden. Zwei davon, der sogenannte Entzugsbetrieb, in welchem der Eisspeicher als Wärmequelle für die dezentralen Wärmepumpen dient und die sogenannte Regeneration, in welcher das Kollektorfeld dem Eisspeicher als Wärmequelle dient, sind in Abbildung 4-20 in der schematischen Darstellung der Hydraulik durch die farbliche Kennzeichnung der hydraulischen Wege gekennzeichnet.

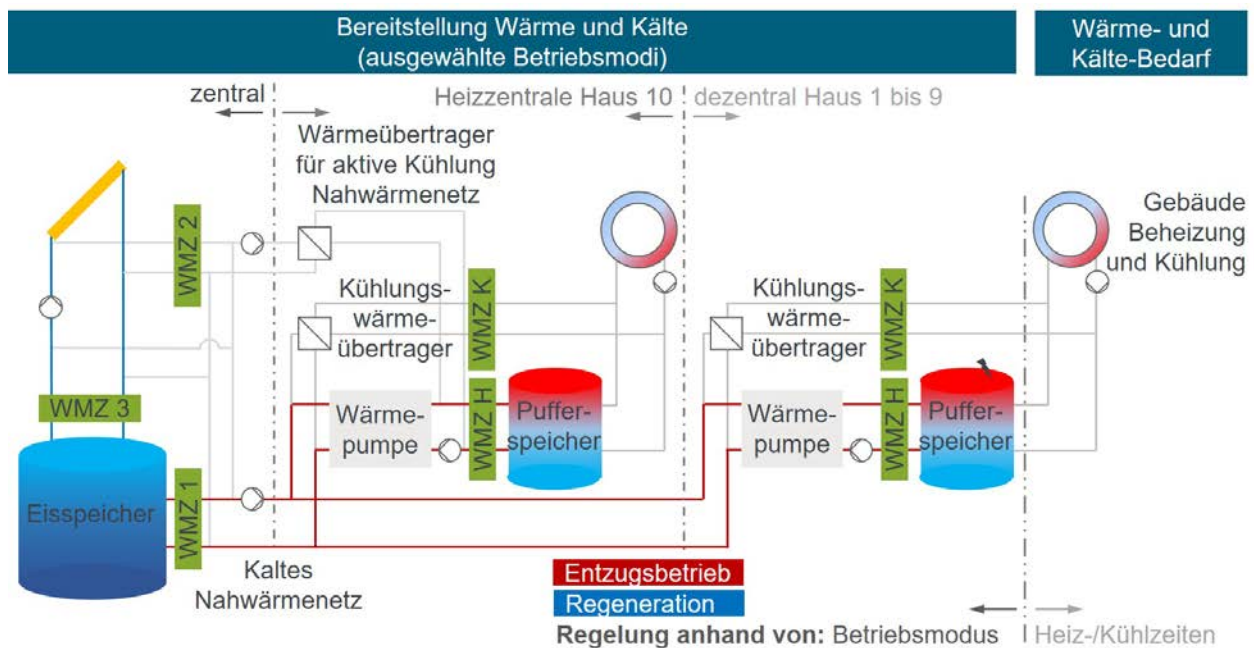


Abbildung 4-20: Schematische Darstellung der Hydraulik der Anlage 1 mit farblich gekennzeichneten ausgewählten Betriebsmodi, sowie Kennzeichnung der zentralen Messstellen (WMZ ... Wärmezähler H ... Heizen K ... Kühlen)

Für das Monitoring der Anlage 1 sind insgesamt 66 Messstellen im hydraulischen Wärme- und Kälteversorgungssystem installiert. Über das Kommunikationsprotokoll Modbus werden je nach Messstelle mehrere Temperaturen, Wetterdaten, Zusatzinformationen wie Fehler- und Störungsmeldungen, aktuelle Mischer- oder Regelventilpositionen, Ein- und Ausschaltzustände oder Laufzeiten der Wärmepumpen in einer zeitlichen Auflösung von 5 Minuten übermittelt. Für die energetische Bilanzierung des Wärme- und Kälteversorgungssystems sind in der hydraulischen Verschaltung der zentralen Komponenten, Eisspeicher und solarthermisches Luft-Sole-Kollektorfeld, mit dem kalten Nahwärmenetz weiterhin insgesamt drei Wärmezähler installiert (vgl. Abbildung 4-20, WMZ 1 bis 3). In jedem Haus, d.h. Haus 1 bis 10, sind zusätzlich jeweils ein Wärmezähler zwischen Wärmepumpe und Pufferspeicher (vgl. Abbildung 4-20, WMZ H) und einer zwischen Kühlungswärmeübertrager und Verbraucher (vgl. Abbildung 4-20, WMZ K) installiert. Die Datenübermittlung der Wärmezähler erfolgt in einer zeitlichen Auflösung von 10 Minuten. Von der Regelungssoftware wird weiterhin ein Betriebsmodus-Signal in einer zeitlichen Auflösung von 5 Sekunden bis zum 01.09.2023 und in einer zeitlichen Auflösung von 1 Minute seit dem 01.09.2023 gespeichert. Diese hohe zeitliche Auflösung wurde zunächst gewählt, um die im Projekt „Sol4City“ neu entwickelte Regelungssoftware und die darauf basierende Betriebsmoduswahl detailliert zu prüfen.

In den Mehrfamilienhäusern 1-9 kommen die Leitungen des kalten Nahwärmenetzes aus der Bodenplatte (siehe Abbildung 4-21). In den Hydraulikmodulen befinden sich die Regelventile,

die Wärmezähler und der Plattenwärmeübertrager für den Betriebsmodus „Natural Cooling“. Aufgrund der schmalen Türen kommen in einigen Häusern zwei Pufferspeicher mit je ca. 900 Liter zum Einsatz. Die Regelung der Ventile auf der Primärseite sowie die Regelung der Heiz- und Kühlkreise erfolgt über die Regelung der Wärmepumpe. Über LON (Local Operating Network) werden die dezentralen Wärmepumpen mit der zentralen Regelung in der Heizzentrale verbunden.



Abbildung 4-21:Hydraulikmodule und Anschlussleitungen an das kalte Nahwärmenetz in einem der Mehrfamilienhäuser

Zusätzlich wird eine Wetterstation im Außenbereich des Quartiers installiert. Diese enthält Messtechnik zur Bestimmung der Windgeschwindigkeit und -richtung, der Außentemperatur, des Luftdruckes, der relativen Luftfeuchtigkeit, des Niederschlags sowie ein Pyranometer zur Bestimmung der hemisphärischen Strahlung in Kollektorebene.

Für eine erste Abschätzung des Wärmebedarfs der Verbraucher und dessen Deckung durch die verschiedenen Wärmequellen wurde im Vorfeld eine Simulation des thermischen Energiesystems mit der Software Polysun durchgeführt. Daraus resultierte, dass der jährliche Wärmebedarf des Quartiers zu insgesamt 76 % zu etwa gleichen Anteilen mit Energie aus dem Eisspeicher (37 %) und den Luft-Sole-Kollektoren (39 %) gedeckt werden kann. Die elektrische Energie für den Antrieb der Wärmepumpe beträgt somit 24 % des Wärmebedarfs bzw. 120 MWh/a.

Ergänzend zu den mit Polysun durchgeführten ersten Abschätzungen erfolgte eine detaillierte Modellierung des gesamten solaren Energieversorgungskonzeptes mit der Simulationssoftware TRNSYS.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden mit dieser detaillierten Systemmodellierung zunächst verschiedene solarthermische Luft-Sole-Kollektoren und PVT-Hybridkollektoren auf Basis der mittels quasi-dynamischer Messungen nach ISO 9806 ermittelten Kollektorkennwerte (siehe Abschnitt 3.1.1) abgebildet. Hierbei wurde im ersten Schritt ausschließlich die Versorgung des Quartiers mit thermischer Energie detailliert untersucht. Auf dieser Basis erfolgte für verschiedene solarthermische Wärmequellen eine Bewertung der Eignung und Integration in das Gesamtsystem. Mit den in-situ Messdaten des Monitorings wurde die Systemmodellierung validiert. Um außerdem Optimierungspotentiale sowohl für die Einzelkomponenten als auch für das Gesamtenergieversorgungskonzept inklusive Betriebsarten und Umschaltpunkte herauszuarbeiten, wurde in einem weiteren Schritt die Versorgung des Quartiers mit elektrischer Energie untersucht.

Insgesamt wurden auf 9 der 10 Gebäuden 595 Photovoltaik-Module, im folgenden PV-Module genannt, mit einer Leistung von je 350 W installiert. Insgesamt hat die Photovoltaik-Anlage damit eine elektrische Leistung von 220,15 kWp. Die Hälfte der Module ist nach Osten in einem Azimutwinkel von -95° und die andere Hälfte nach Westen in einem Azimutwinkel von 85° aufgestellt. Alle Module haben einen Neigungswinkel von 12° . Auf Basis dieser Rahmenbedingungen wurde für den Standort der Anlage unter Berücksichtigung eines geschätzten Systemverlustes von 14 % [92], beispielsweise resultierend aus Wirkungsgradverlusten in Wechselrichtern oder durch abgelagerten Schmutz auf den PV-Modulen, ein prognostizierter jährlicher elektrischer Energieertrag von 202,39 MWh berechnet. Für diese Berechnung wurde das Berechnungs-Werkzeug „Photovoltaic Geographical Information System“ (PVGIS) des Joint Research Centre (JRC) der Europäischen Kommission [92] verwendet. Nach Informationen des Betreibers beträgt der jährliche elektrische Energieverbrauch der 9 Gebäude für den Betrieb der Heizung und Kühlung circa 170 MWh, wobei hiervon etwa 30 MWh aus den Erträgen der Photovoltaik-Anlage stammen. Demnach können rund 18 % des jährlichen elektrischen Energieverbrauchs von Heizung und Kühlung von Gebäude 1 bis 9 direkt durch die installierte Photovoltaik-Anlage gedeckt werden während in der Jahresbilanz ein Überschuss an elektrischer Energie aus der PV-Anlage entsteht. (Gebäude 10 wird durch einen anderen Betreiber verwaltet. Hier konnten keine Daten zur Verfügung gestellt werden.)

Das Monitoringkonzept sieht vor, alle Wärmeströme der in den dezentralen Technikräumen installierten Komponenten aus und in das kalte Nahwärmenetz über Wärmezähler zu erfassen. Leider konnten aus den einzelnen Gebäuden keine zeitaufgelösten elektrischen Verbrauchsdaten zur Verfügung gestellt werden. Die Weitergabe der Werte aus den Zählern der Wohnungen ist dem Betreiber aus Datenschutzgründen nicht möglich. Ein separater Zähler für den elektrischen Verbrauch der Wärmepumpe wurde zu Beginn diskutiert, ist aber wegen unterschiedlicher Zuständigkeit nicht realisiert worden.

Im Haus 10 wurden zusätzlich die Wärmeströme der Kollektoren sowie des Eisspeichers erfasst. Für die Ermittlung von Daten für die Optimierung der prädiktiven Systemregelung wurde die bereits erwähnte Wetterstation verwendet.

Im ersten Halbjahr 2021 wurde vom Planungsbüro und von VCS die Detailplanung der Anlage durchgeführt. Die im Folgenden aufgeführten Besonderheiten der Anlage haben sich dabei als Herausforderungen für die Regelung herausgestellt:

- Die Umschaltung zwischen Heizen und Kühlen erfolgt nicht wohnungsweise, sondern pro Gebäude.
- Darüber hinaus muss für die Freigabe des Kühlbetriebs eines Gebäudes zentral das Netz in den Kühlbetrieb geschaltet werden (siehe auch folgender Punkt), denn das kalte Nahwärmenetz darf für den Kühlbetrieb eines Gebäudes nur über 0 °C betrieben werden, um ein Einfrieren des Wassers im Wärmeübertrager zu verhindern. Details hierzu sind in Kapitel 4.2.4 aufgeführt.
- Die Quellenanlage aus Eisspeicher und Solar-Luft-Kollektor erlaubt durch ihre begrenzte thermische Leistung keinen gleichzeitigen Betrieb aller Wärmepumpen.

Zur Begegnung der ersten Herausforderung gibt es, wie bei der Konzeption bereits vorgesehen, nur die Implementierung einer sogenannten harten Umschaltung zwischen Heizen und Kühlen in einem Gebäude. Von der Anlagensteuerung ist dafür eine Außentemperaturgrenze vorgesehen, die je Gebäude angepasst werden kann.

Für die Anforderung einer Netztemperatur von über 0 °C für das kalte Nahwärmenetz beim Kühlbetrieb wird vorgesehen, von der zentralen Steuerung des Netzes die Kühlanforderungen der Gebäude zu erfassen. Liegt aus wenigstens einem Gebäude eine Anforderung vor, so wird überprüft, ob das Netz in der Temperatur im Netz über 0 °C angehoben werden kann. Solange der Eisspeicher noch eine Vereisung aufweist, kann dies nur mit den Luft-Sole-Kollektoren abhängig von der Außenlufttemperatur erfolgen. Zusätzlich muss, solange einzelne Gebäude im Kühlbetrieb sind, die Heizanforderung anderer Gebäude so weit reduziert werden, dass die Netztemperatur im positiven Bereich bleibt. Es ist entgegen der Konzeption von einer deutlich dynamischeren Umschaltung bzw. Freigabe von Heizen oder Kühlen, abhängig von der aktuellen Außenlufttemperatur über den Tag auszugehen, als dies bei der harten Umschaltung mit einem Datum für Winter (Heizen erlaubt) und Sommer (Kühlen erlaubt) der Fall wäre.

Um den gleichzeitigen Betrieb aller Wärmepumpen zu verhindern, wird von der zentralen Regelung die Logik der EVU-Sperre bzw. des SG-Ready Signals genutzt. Die Auslegung der Wärmepumpenanlage mit einem Pufferspeicher für das Gebäude erfolgt so, dass die Wärmepumpe bis zu 3 x am Tag für jeweils 2 h gesperrt werden kann.

Neben dem zur kontinuierlichen Ermittlung des Beladungszustands des Eisspeichers dienende Ultraschallsensor C, welcher regulär zur Regelung genutzt wird, wurden ebenfalls zur Ermittlung des Beladungszustandes zusätzlich der Ultraschallsensor G und der Radarsensor D zum Vergleich installiert. Des Weiteren sind diverse Temperatursensoren im Eisspeicher angebracht.

Im ersten Halbjahr 2022 wurden die ersten Gebäude bezogen. Schrittweise kam die Datenerfassung bis August 2022 dazu. Im folgenden Kapitel erfolgt die Auswertung der nach Inbetriebnahme begonnenen Messdatenerfassung sowie in Kapitel 4.5.2.3 die Beschreibung der Optimierung der Anlage.

4.5.2.2 Messergebnisse

Vergleich Wärmebedarf mit Wärmeverbrauch

Im ersten Schritt des Energiemonitorings werden die Wärmeverbräuche mit den, entsprechend der gemessenen Wetterdaten des Auswertungsjahres, witterungsbereinigten Wärmebedarfe aus der Planung verglichen. Die Witterungsbereinigung wird auf Grundlage von Messungen der Außenlufttemperatur durch die Wetterstation direkt an der Versuchsanlage und im Falle von Messlücken ergänzt durch Messdaten der nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) durchgeführt. Diese befindet sich 15 km entfernt in Sachsenheim. Der Vergleich von Wärmebedarf und -verbrauch ist in Abbildung 4-22 dargestellt.

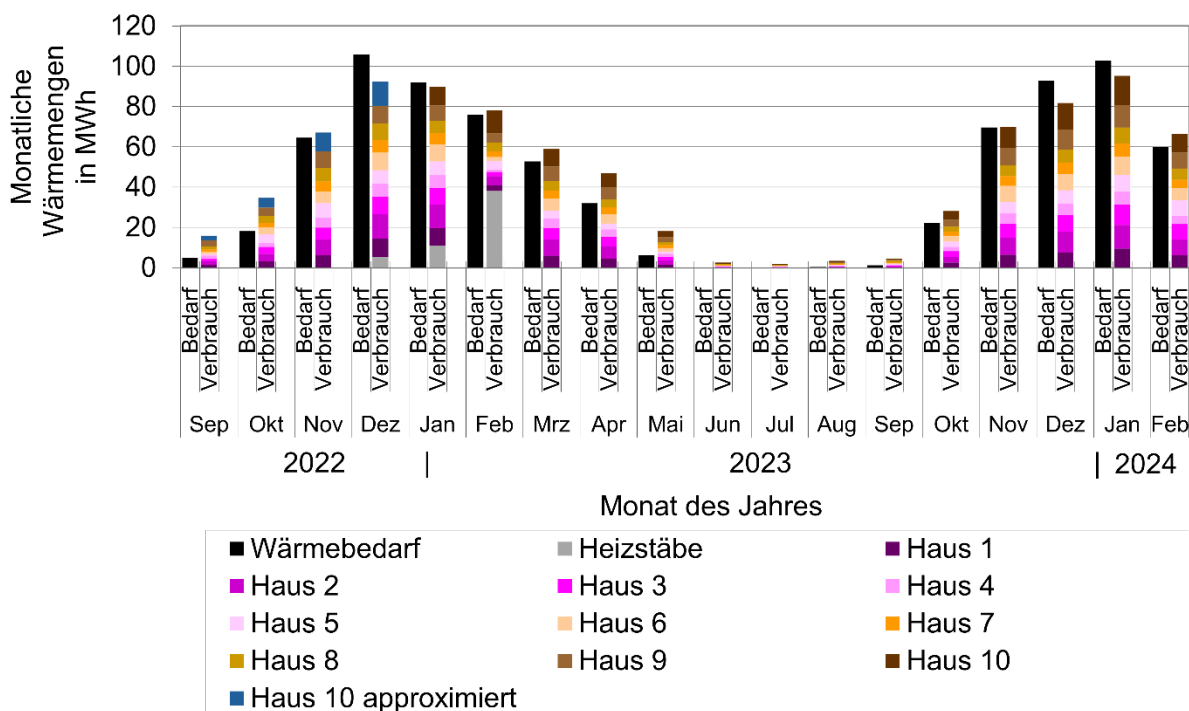


Abbildung 4-22: Monatliche Gegenüberstellung von witterungsbereinigtem Wärmebedarf und Wärmeverbrauch inklusive Approximationen der Anlage 1

Da die gebäudeweise dezentralen Wärmezähler „Heizen“ (Vgl. Abbildung 4-20, WMZ H) zwischen Wärmepumpe und Pufferspeicher installiert sind, werden die Wärmemengen, die den Pufferspeichern durch die elektrischen Heizstäbe in Haus 1 bis 9 zugeführt werden, mittels deren Betriebszeit und einer mittleren Leistung abgeschätzt und auf die Monate Dezember 2022 bis Februar 2023 verteilt. Die Verteilung der Wärmemengen der Heizstäbe wurde so gewählt, da in diesen Monaten, im Gegensatz zu den anderen Monaten, der gesamte Wärmeverbrauch unterhalb des Wärmebedarfs liegt und gleichzeitig die Soll-Pufferspeichertemperaturen der einzelnen Gebäude durch die messtechnisch erfassten Pufferspeichertemperaturen eingehalten wurden. Die abgeschätzten Wärmemengen der elektrischen Heizstäbe sind in Bild 2 als graue Balken dargestellt. Durch eine verbesserte Regelung war im Winter 2023/2024 der Betrieb der elektrischen Heizstäbe nicht mehr erforderlich.

Während die Daten der Wärmezähler „Heizen“ in den Häusern 1 bis 9 bereits im Juli 2022 messtechnisch erfasst wurden, konnten die Daten des Wärmezählers Heizen im Haus 10 erst ab Januar 2023 messtechnisch erfasst werden. Daher wurden die durch die gelben Balken repräsentierten Wärmemengen für Haus 10 in Abbildung 4-22 von September bis Dezember 2022 in Abhängigkeit des durchschnittlichen Verhältnisses der gemessenen Wärmemenge der Summe der Häuser 1 bis 9 zu der insgesamt gemessenen Wärmemenge von Haus 10 in den repräsentativen Monaten März bis Mai 2023 approximiert.

Mittels der eigens entwickelten interaktiven Benutzeroberfläche der Auswertesoftware (siehe Beschreibung Anlage 2) wurde außerdem festgestellt, dass in den gebäudeweise dezentralen Wärmezählern „Heizen“ und „Kühlen“ in Haus 2, 5, 7 und 8 zu verschiedenen Zeitpunkten Datenlücken aufgetreten sind. Die Datenlücken sind in diesem Fall durch eine Änderung an der Datenübermittlung entstanden. Um die Wärmemengen, welche den dezentralen Pufferspeichern durch die Wärmepumpen zugeführt werden, dennoch für das gesamte Neubauquartier zu ermitteln, wurde in der Nachverarbeitung der Messdaten eine Approximation der fehlenden Datenpunkte anhand der Ähnlichkeit der zeitlichen Verläufe der bei den anderen Häusern gemessenen Wärmemengen vorgenommen. So ist in Abbildung 4-23 beispielhaft die Datenlücke des Wärmezählers „Heizen“ von Haus 2 in Form von fehlenden roten Datenpunkten z.B. zwischen Januar und April 2023 dargestellt. Die Datenlücke ist in Abbildung 4-23 mit blauen approximierten Datenpunkten gefüllt. Diese wurden mittels der Ähnlichkeit des zeitlichen Verlaufs der Wärmemengen der Häuser 1 und 2 berechnet.

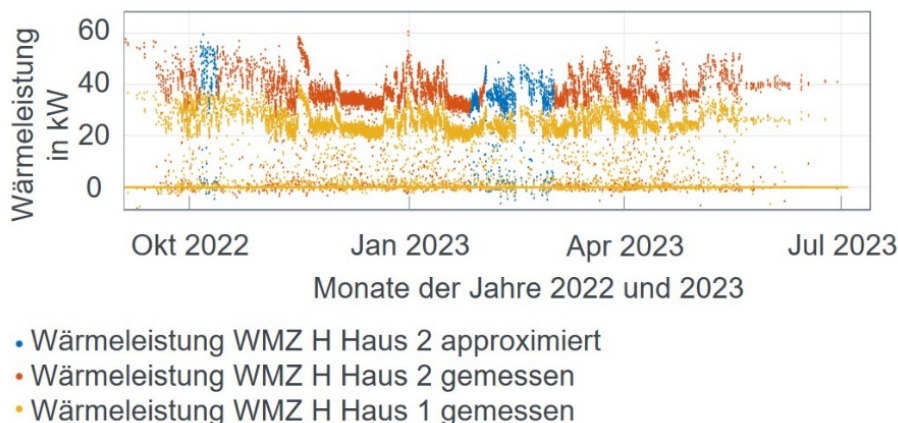


Abbildung 4-23: Beispielhafter Umgang mit Datenlücken bei automatisierter Nachverarbeitung der Messdaten

Die in Abbildung 4-22 dargestellten monatlichen Wärmemengen enthalten bereits alle Ergebnisse der beschriebenen Approximationen. Während unter Berücksichtigung der Unsicherheiten der beschriebenen Approximationen, die Abweichung der monatlichen Wärmeverbräuche von den Wärmebedarfen in den Übergangsmontaten teilweise relativ groß ist, weicht der Jahreswärmeverbrauch der Heizperiode 2022/2023 mit 456 MWh um weniger als 1 % von dem prognostizierten Jahreswärmebedarf mit 449 MWh ab. In der bis Ende Februar betrachteten Heizperiode 2023/2024 weicht der gemessene Jahreswärmeverbrauch von 346 MWh eben-

falls um weniger als 1 % vom prognostizierten Jahreswärmebedarf von 349 MWh ab. Die Gebäude und das Wärme- und Kälteversorgungssystem inklusive der implementierten Regelstrategie entsprechen damit im Hinblick auf ihr thermisches Verhalten den für die Planung angenommenen Eigenschaften.

Vergleich Kältebedarf mit Kälteverbrauch

In jedem der zehn Gebäude der Anlage 1 wurden Wärmezähler zur Dokumentation der Kälteverbräuche der einzelnen Gebäude installiert. Aufbauend auf den Messdaten dieser Wärmezähler werden in Abbildung 4-24 die Kälteverbräuche für das Jahr 2023 dargestellt. Insgesamt beträgt der Kälteverbrauch aller zehn Gebäude der Anlage 1 im Jahr 2023 laut der Wärmezähler 7,72 MWh. Im Vergleich zu den in der Planung prognostizierten Kältebedarfen von jährlich 66 MWh ergibt sich hier eine erhebliche Diskrepanz.

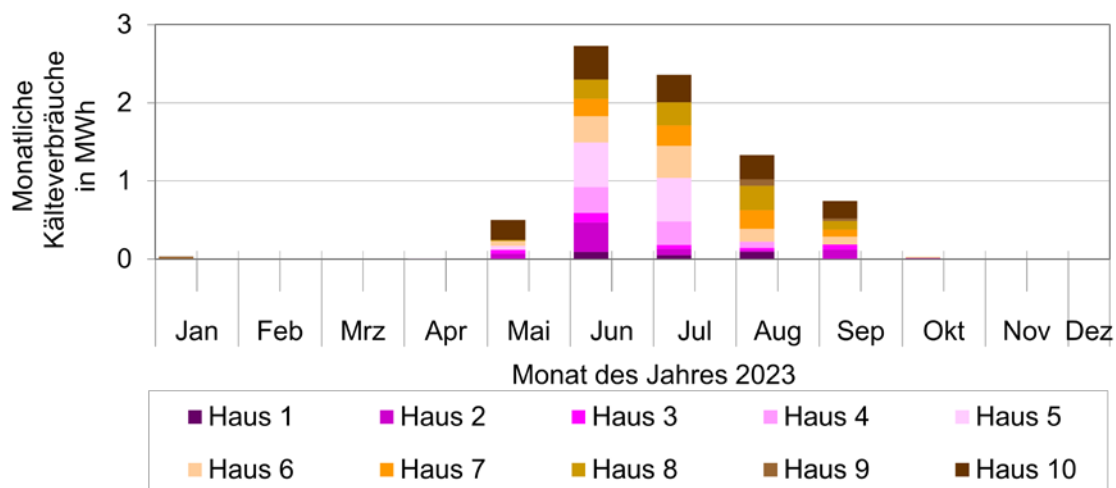


Abbildung 4-24: Gemessene monatliche Kälteverbräuche der Häuser 1 bis 10 im Jahr 2023

Um die signifikant zu niedrigen gemessenen Kälteverbräuche zu validieren, wurden zusätzlich die Aufzeichnungen zu Kälteverbräuchen des örtlichen Wohnungsunternehmens ausgewertet. Diese Kälteverbräuche beruhen auf Ablesewerten der Wärmezähler der einzelnen Wohneinheiten. In Abbildung 4-25 sind diese jeweils summiert für Gebäude 1 bis 8 im Zeitraum vom 01.01.2023 bis 05.09.2023 als rechter grauer Balken dargestellt. Im Vergleich dazu sind in Abbildung 4-25 außerdem die bereits in Abbildung 4-24 dargestellten gemessenen Kälteverbräuche der Wärmezähler der Gebäude 1 bis 8 im gleichen Zeitraum als linker schwarzer Balken dargestellt. Für die Gebäude 9 und 10 wurden vom örtlichen Wohnungsunternehmen keine Daten zur Verfügung gestellt, da diese Gebäude nicht von diesem verwaltet wird. Die für diese beiden Gebäude zuständige verwaltende Stelle hat mit dem Partner der Versuchsanlage des Forschungsvorhabens keine vertragliche Verbindung. Der dargestellte Vergleich zeigt zum einen, dass die jeweils für jedes Gebäude auf unterschiedliche Weise ermittelten Kälteverbräuche unterschiedlich sind. Zum anderen wird aber auch deutlich, dass die Kälteverbräuche des örtlichen Wohnungsunternehmens ähnlich niedrig sind, wie die mittels der Wärmezähler der einzelnen Gebäude gemessenen Werte. Dies ist ein Indiz dafür, dass die gemessenen niedrigen Kälteverbräuche valide sind.

Abbildung 4-25: Vergleich summierter Kälteverbräuche im Zeitraum vom 01.01.2023 bis 05.09.2023, gemessen von Wärmehähler in den Gebäuden und ermittelt auf Basis der Ablesewerte der Wärmehähler in den einzelnen Wohneinheiten durch das örtliche Wohnungsunternehmen

Eine Erklärung für die signifikant niedrigen Kälteverbräuche im Vergleich zum prognostizierten Kältebedarf ist eine in manchen Gebäuden zeitweise ausgeschaltete Kühlung im Betrachtungszeitraum. Die Abschaltung des Kühlbetriebs ist dabei wahrscheinlich auf eine fehlerhafte Montage der Raumregelung bzw. der Stellantriebe der Fußbodenheizkreise zurückzuführen.

Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpen

Analog zur Definition in Gleichung (4-1) werden für die Anlage 1 monatliche Arbeitszahlen der installierten Wärmepumpen berechnet. Die Randbedingungen der Anlage ließen leider keine Montage zeitlich aufgelöster elektrischer Verbrauchszähler der Wärmepumpen zu, so dass die Bilanz über die Quellenseite erfolgen muss. Die monatlich summierte Wärme der Wärmequellen, die am Verdampfer der Wärmepumpen genutzt wird, wird durch die Wärmehähler WMZ 1 und WMZ 2 (siehe Abbildung 4-20) in Haus 10 in der Heizzentrale gemessen. Es ist somit zwar nicht möglich für jede der zehn Wärmepumpen spezifische Arbeitszahlen zu berechnen, jedoch wird eine übergreifende Arbeitszahl für alle Wärmepumpen zusammen im Folgenden bestimmt.

Da die Wärmehähler WMZ1 und WMZ 2 nicht direkt an der Verdampferseite der Wärmepumpen installiert sind, sondern dazwischen das kalte Nahwärmenetz positioniert ist, müssen Wärmegewinne vom Erdreich in das kalte Nahwärmenetz bei der Berechnung der Arbeitszahl berücksichtigt werden. Um diese Wärmegewinne abzuschätzen, wurde die Wärmeübertragung vom Erdreich in das Wärmeträgerfluid im Rohr analytisch für jeden Zeitschritt nach folgender Gleichung (4-3) berechnet.

$$Q_{\text{Netz,Gewinne}} = U \cdot L \cdot P_{\text{Rohr}} \cdot (\vartheta_{\text{Erdreich}} - \vartheta_{\text{Fluid}}) \cdot \Delta t \cdot 10^{-6} \frac{\text{MWh}}{\text{Wh}} \quad (4-3)$$

mit

$Q_{\text{Netz,Gewinne}}$ Monatliche Wärmegewinne aus dem Erdreich in das kalte Nahwärmenetz in MWh

U	Wärmedurchgangskoeffizient in $W/(m^2 \cdot K)$ bezogen auf den Umfang des Rohres
L	Rohrlänge in m
P_{Rohr}	Umfang des Rohres in m
$\vartheta_{Erdreich}$	Erdreichtemperatur in $^{\circ}C$
ϑ_{Fluid}	Fluidtemperatur in $^{\circ}C$
Δt	Zeitintervall in h

Der U-Wert wurde unter Berücksichtigung der Wärmeleitung durch die Materialschichten der Rohrleitung und des konvektiven Wärmeübergangs zwischen dem Fluid und der Rohrleitung berechnet. Für die Rohrleitung wurde ein Innendurchmesser von 141,8 mm, ein Außendurchmesser von 210 mm und eine 15,9 mm dicke Dämmschicht mit einer Wärmeleitfähigkeit von $0,025 W/(m \cdot K)$ angenommen. Vereinfachend wurde diese Rohrdimensionierung für das gesamte kalte Nahwärmenetz angenommen. Insgesamt ergibt sich damit ein U-Wert bezogen auf die Außenfläche des Rohres von $1,659 W/(m^2 \cdot K)$. Als Rohrlänge wurden insgesamt inklusive Vor- und Rücklauf 840 m auf Grundlage der realen Anlage 1 verwendet. Die über das Jahr variierende Erdreichtemperatur wird in Abhängigkeit des Standorts und der Erdreichbeschaffenheit mithilfe des TRNSYS Modells Type 77 modelliert. Als Fluidtemperatur wird für die Berechnung der Wärmegewinne im Vorlauf des kalten Nahwärmenetzes vereinfachend die gemessene Eintrittstemperatur in die Rohrleitung des Vorlaufs verwendet. Entsprechend wird für den Rücklauf die gemessene Eintrittstemperatur in die Rohrleitung des Rücklaufs verwendet.

In Abbildung 4-26 sind die monatlich berechneten Arbeitszahlen der Wärmepumpen und die für die Berechnung nötige monatliche Wärme der Wärmequellen, Wärmegewinne des kalten Nahwärmenetzes und der Nutzwärme dargestellt. Die ebenfalls dargestellte elektrische Energie beruht nicht auf Messdaten, sondern wird mittels einer Energiebilanz auf Basis der Wärmemengen berechnet, die der Wärmepumpe zugeführt und von dieser abgeführt werden.

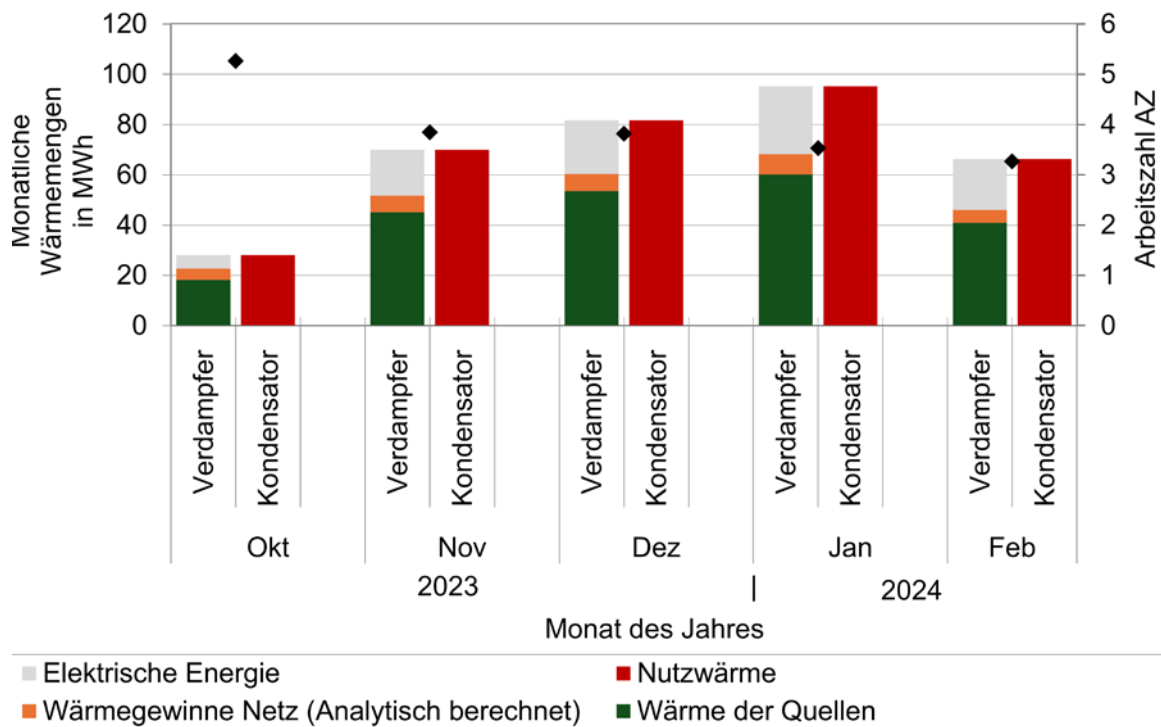


Abbildung 4-26 : Monatliche Wärmemengen und elektrische Energie zur Berechnung monatlicher Arbeitszahlen der Wärmepumpen der Anlage 1

Im Vergleich zu den in Simulationen bestimmten Arbeitszahlen von etwa 3,5, liegen die hier auf Grundlage der Messdaten ermittelten Arbeitszahlen im arithmetischen Mittel bei etwa 3,9. Somit liegt die Effizienz der Wärmepumpen im realen Betrieb sogar leicht oberhalb der Erwartungen auf Grundlage der Simulationen.

Die analytisch berechneten Wärmegewinne des kalten Nahwärmenetz betragen über die betrachteten Monate Oktober 2023 bis Februar 2024 31,2 MWh. Bezogen auf die durch das kalte Nahwärmenetz übertragene Wärme in diesem Zeitraum entspricht dies einem Anteil von 12,5 %. Diese analytisch berechneten Wärmegewinne des kalten Nahwärmenetz werden als plausibel erachtet, da sie in einer ähnlichen Größenordnung liegen, wie der Anteil der gemessenen Wärmegewinne in Höhe von 14,3 % in Anlage 4 (siehe Kapitel 4.5.5.2).

Monatliche solarthermische Deckungsanteile

Der in Gleichung (4-2) definierte solarthermische Deckungsanteil wird auf Grundlage des gemessenen Wärmeertrags der Luft-Sole-Kollektoren als Wärmequelle des Gesamtsystems und der insgesamt an die Nutzenden gelieferte Wärme berechnet. Neben der direkt von den Wärmepumpen verwendeten Wärme der Luft-Sole-Kollektoren wird auch die vom Eisspeicher zur Beheizung entzogene und dem Verdampfer der Wärmepumpe zugeführte Wärme als solarer Wärmeertrag definiert, da der Eisspeicher maßgeblich durch solare Wärmegewinne der Luft-Sole-Kollektoren regeneriert wird.

In Abbildung 4-27 ist der monatlich berechnete solarthermische Deckungsanteil zusammen mit den zur Berechnung benötigten monatlichen solaren Wärmeerträgen und der gesamten

monatlich an die Verbraucher gelieferte Nutzwärme dargestellt. In Abbildung 4-27 wird deutlich, dass der solarthermische Deckungsanteil über den betrachteten Zeitraum relativ konstant bleibt. Die Erklärung dafür, dass der solare Wärmeertrag im Verhältnis zu der an die Verbraucher gelieferte Nutzwärme in etwa konstant bleibt, ist im Betrachtungszeitraum ebenfalls in etwa konstant bleibende Arbeitszahl der Wärmepumpen. Um den Wärmepumpen auch in den Monaten mit zu geringen solaren Wärmeerträgen direkt von den Luft-Sole-Kollektoren ausreichend Wärme zur Verfügung zu stellen, wird im Misch- oder reinen Entzugsbetrieb die im Eisspeicher eingespeicherten solaren Wärmeerträge von den Wärmepumpen verwendet. Gemittelt über die betrachteten fünf Monate beträgt der solarthermische Deckungsanteil etwa 64 %. Insbesondere unter Berücksichtigung der Tatsache, dass es sich bei dem betrachteten Zeitraum zum überwiegenden Teil um die Wintermonate mit dem höchsten Wärmebedarf handelt, ist der auf Basis von Messwerten ermittelte solarthermische Deckungsanteil von über 60 % bemerkenswert hoch.

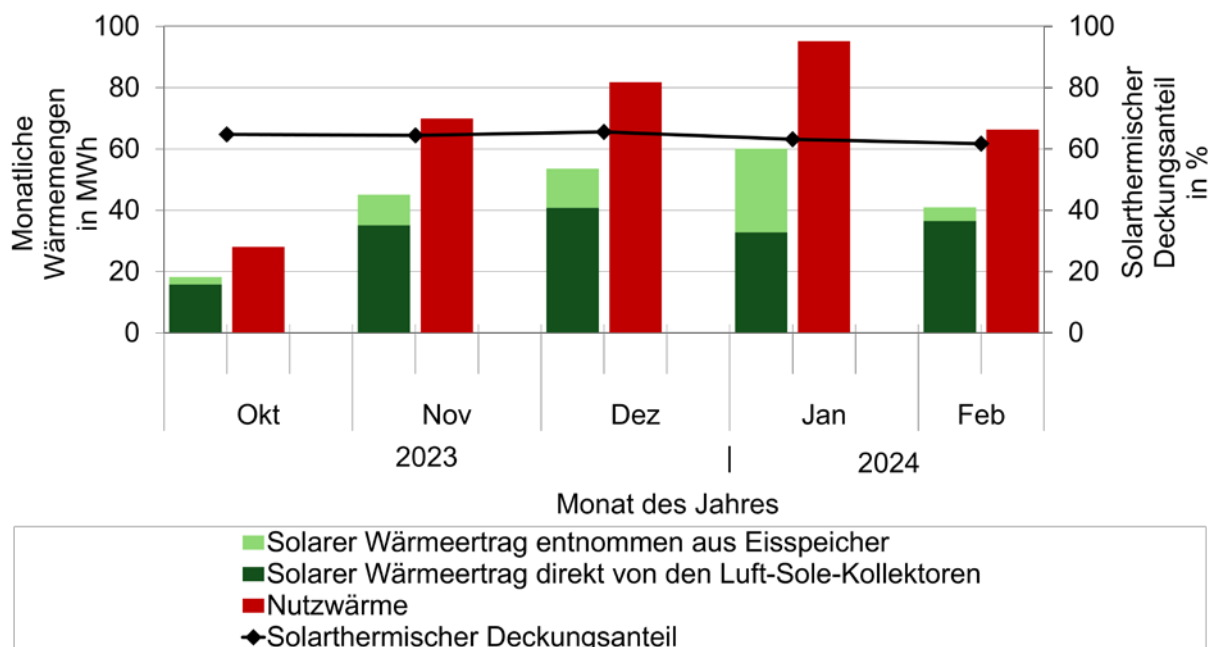


Abbildung 4-27: Monatlicher solarthermischer Deckungsanteil, monatliche solare Wärmeerträge und monatlich an die Verbraucher gelieferte Nutzwärme

Validierung Gesamtsystemmodell in TRNSYS mit Messdaten der Anlage 1

Die Messdaten der Anlage 1 wurden genutzt, um ein in TRNSYS erstelltes Gesamtsystemmodell (vgl. Kapitel 4.5) der Anlage 1 zu validieren. Aufgrund der Verfügbarkeit entsprechender Messdaten wurden für den Zeitraum vom 01.10.2023 bis 29.02.2024 die Messergebnisse zur Be- und Entladung des Eisspeichers mit entsprechenden Simulationsergebnissen verglichen. Das Gesamtsystemmodell wurde dazu dahingehend parametrisiert, dass die realen von der Wetterstation gemessenen Wetterdaten am Standort der Anlage 1 und die realen Wärmeverbräuche der Gebäude in Anlage 1 als Randbedingungen bzw. Eingangsgrößen verwendet

wurden. Des Weiteren wurde der Beladungszustand des Eisspeichers zu Beginn des betrachteten Zeitraums mit dem ersten Messwert des Beladungszustandes im betrachteten Zeitraum gleichgesetzt.

In Abbildung 4-28 ist zum einen der täglich arithmetisch gemittelte Beladungszustand des Eisspeichers mit Punkten dargestellt. Der Verlauf der als graue Punkte dargestellten gemessenen Beladungszustände ist unvollständig, da hier über einige längere Zeiträume keine Messdaten vorliegen. Im Vergleich mit den durch die Simulation ermittelten in schwarz dargestellten Punkten ist über die betrachteten fünf Monate ein sehr ähnlicher Verlauf zu erkennen. Sowohl die reale in Anlage 1 installierte als auch die im Modell implementierte Regelung verwendet eine sogenannte dynamische Beladungsgrenze als Regelbedingung. Diese Grenze sorgt dafür, dass im zeitlichen Verlauf der Heizperiode der Eisspeicher kontinuierlich entladen wird und auch bei gegebenenfalls vorhandenen solaren Wärmegegewinnen zur Regeneration der Eisspeichers dieser nicht über die dynamische Beladungsgrenze hinaus beladen wird. Dies ist nötig, um in der folgenden Kühlsaison eine ausreichende thermische Kapazität im Eisspeicher für die natürliche Kühlung zur Verfügung zu haben. Lediglich Anfang Oktober übersteigt sowohl der gemessene als auch der simulierte Beladungszustand die dynamische Beladungsgrenze, da der Eisspeicher am Ende der Kühlperiode noch einen hohen Beladungszustand aufweist und die Wärmebedarfe der Verbraucher am Anfang der Heizperiode noch nicht ausreichend groß sind, um den Beladungszustand an die dynamische Beladungsgrenze anzunähern.

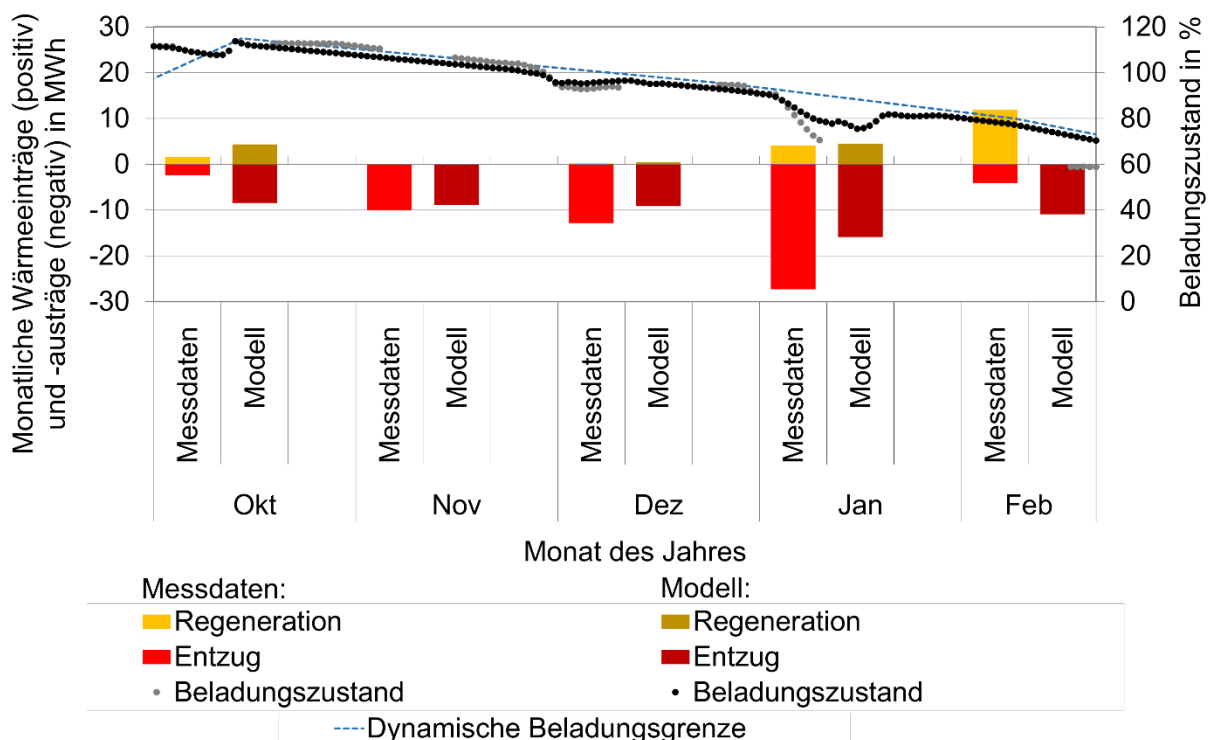


Abbildung 4-28: Vergleich von Messdaten und simulierten Daten der monatlichen Wärmeinträge und -austräge und des Beladungszustandes des Eisspeichers

Im Oktober ist sichtbar, dass sich die gemessenen Wärmeeinträge durch Regeneration und die Wärmeausträge durch Entzug zur Nutzung als Wärmequelle der Wärmepumpen ausgleichen, was zu einem über diesen Monat weitestgehend konstanten gemessenen Beladungszustand führt. Da im Modell mehr Wärme entzogen wird, sinkt der simulierte Beladungszustand insgesamt leicht ab. Demnach ist erkennbar, dass in der realen Anlage im Vergleich zum Modell mehr solare Wärmegewinne der Luft-Sole-Kollektoren direkt von den Wärmepumpen verwendet werden, während im Modell der Eisspeicher mehr als Wärmequelle verwendet und deshalb stärker entladen wird. Dies wird damit begründet, dass die Regelung im Simulationsmodell im Vergleich zur Regelung in der realen Anlage in diesem Monat stärker den Betriebsmodus Entzugsbetrieb (nur der Eisspeicher wird als Wärmequelle verwendet) wählt. Wohingegen die Regelung in der realen Anlage stärker den Mischbetrieb, demnach eine Mischung aus Eisspeicher und Luft-Sole-Kollektoren als Wärmequelle, wählt. Die Entscheidung, welche dieser beiden Betriebsmodi von der Regelung gewählt wird, hängt zum einen maßgeblich davon ab, ob der aktuelle Beladungszustand oberhalb oder unterhalb der Beladungsgrenze liegt. Liegt er oberhalb, wird der Entzugsbetrieb gewählt. Liegt er unterhalb, wird der Mischbetrieb gewählt. Zum anderen wurde sowohl im Modell als auch in der realen Anlage eine Hysterese implementiert, die dafür sorgt, dass zwischen diesen beiden Betriebsmodi weniger häufig gewechselt wird. Es wird vermutet, dass die im Modell implementierte Hysterese nicht genau die in der realen Anlage implementierte Hysterese abbildet und dies zu der bereits beschriebenen unterschiedlichen Wahl beider Betriebsmodi im Modell und in der realen Anlage führt.

In den Monaten November und Dezember sind die Verläufe des Beladungszustandes und die Wärmeausträge aus dem Eisspeicher zu Heizzwecken in den gemessenen und simulierten Daten sehr ähnlich.

In den darauffolgenden Monaten Januar und Februar ist zu sehen, dass in der realen Anlage zuerst besonders viel Wärme zu Heizzwecken entzogen wird, was einen schnellen Abfall des Beladungszustandes nach sich zieht. Zwar tritt hier eine Messlücke auf, aber es wird dennoch davon ausgegangen, dass der Beladungszustand unter 60 % sinkt. Im Februar sorgen solare Wärmegewinne zur Regeneration dafür, dass zum Ende des Monats wieder ein gemessener Beladungszustand von knapp 60 % erreicht wird. Auch im Modell sinkt der Beladungszustand Anfang Januar stärker als in den Wochen davor. Demnach ist davon auszugehen, dass Anfang Januar keine Verfügbarkeit solarer Wärmegewinne vorhanden ist und sowohl in der realen Anlage als auch im Simulationsmodell der Eisspeicher stärker als im Vormonat entladen werden muss.

Jedoch zeigt ein im Vergleich zu den Messdaten weniger stark sinkender bzw. im Laufe des Januars sogar wieder leicht ansteigender Beladungszustand eine insgesamt in diesem Monat höhere Verfügbarkeit solarer Wärmegewinne im Modell. Eine Ursache für diese Diskrepanz zu der in der Realität geringeren Verfügbarkeit solarer Wärmegewinne könnten lokale Wetterbedingungen sein, die nicht durch die Wetterdaten abgebildet und somit in der Simulation nicht berücksichtigt werden. Beispielsweise könnte eine Bedeckung der Luft-Sole-Kollektoren mit Schnee die solaren Wärmegewinne einschränken.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die mithilfe des in TRNSYS erstellten Gesamtsystemmodells simulierten Daten den gemessenen Daten der Anlage 1 tendenziell ähnlich sind. Jedoch wurde deutlich, dass für eine noch bessere Abbildung des Betriebsverhaltens der realen Anlage die im Modell implementierte Regelung besser an die reale Regelung angepasst werden muss. Außerdem sollte der Einfluss von Wetterbegebenheiten, die von den gemessenen Wetterdaten nicht ausreichend abgebildet werden, auf die Modellierung näher untersucht werden.

4.5.2.3 Optimierungsmaßnahmen

Die Optimierungsmaßnahmen in der Anlage 1 betreffen vorrangig die Entwicklung und Implementierung einer Funktion zur Entlastung des Nahwärmenetzes, die ab März 2022 in der Anlage läuft. Eine detaillierte Beschreibung erfolgte in Kapitel 4.4 Netzentlastung. Die Wirksamkeit dieses Verfahrens ist durch die Messdaten bis Februar 2024 nachgewiesen (siehe Kapitel 4.5.2.2 Messergebnisse).

Eine weitere nötige Optimierung zeigte sich im Sommerbetrieb. Während die meisten Gebäude im Kühlbetrieb waren oder weder Heiz- noch Kühlbedarf hatten, bestand im Haus 6 selbst bei 24 °C Außentemperatur ein Heizbedarf. Ursache war eine nur in diesem Gebäude wohl unbeabsichtigt eingestellte deutlich höhere Raumsolltemperatur von 26 °C. Eine einheitliche, zentral vorgegebene Heizgrenze ist für diese Quartiere der komplett dezentralen Entscheidung vorzuziehen.

4.5.3 Anlage 2

4.5.3.1 Anlagenbeschreibung

Die in Neubau-Wohnanlage wurde mit dem Ziel errichtet, ein modernes nachhaltiges Zusammenleben verschiedener Generationen zu ermöglichen. Die Wohnanlage mit einer Nutzfläche von 1.240 m², verteilt auf drei Geschosse, beinhaltet 11 Wohneinheiten und eine Sozialstation. Im Erdgeschoss befindet sich eine Tiefgarage. Das Gebäude hat als Planungswerte einen Heizenergiebedarf von 87,2 MWh/a sowie einen Kühlenergiebedarf von 9,6 MWh/a.

Die Realisierung der Anlage erfolgte durch VCS. In die Vermessung der Anlage war zusätzlich das IGTE involviert.

Die Wärmebereitstellung für die Raumheizung erfolgt durch die Kombination der zentralen Komponenten Wärmepumpe (Typ Viessmann Vitocal 300-G BW 301.A45) und Eisspeicher (Volumen 200 m³) sowie den dezentralen PVT-Kollektoren des Typs Kraftdach (120 Stück, insgesamt 238 m², 30° Neigungswinkel, südliche Ausrichtung). Die maximale elektrische Leistung der PV-Module beträgt 44,80 kWp.

Der Eisspeicher ist mit Wärmeübertragern mit einer Rohrlänge von je 1.200 m für den Entzugs- und Regenerationsbetrieb ausgestattet. Der Wärmeübertrager für den Wärmeentzug ist dabei über sechs Ebenen mäanderförmig verlegt, der Wärmeübertrager für die Regeneration verläuft entlang der Speicherwand.

Die Wärmepumpe wird bivalent zu einem elektrischen Heizstab mit einer Leistung von 9,28 kW betrieben. Die Wärmequellen der Wärmepumpe sind sowohl die PVT-Hybrid-Kollektoren als auch der Eisspeicher. Im Absorber-Direktbetrieb nutzt die Wärmepumpe die solaren Gewinne der Hybrid-Kollektoren, im Entzugsbetrieb wird die Wärmepumpe aus dem Eisspeicher versorgt. Im Regenerationsbetrieb beladen die Hybrid-Kollektoren den Eisspeicher mit Wärme. Die Umschaltung vom Absorber-Direktbetrieb in den Entzugsbetrieb erfolgt, sobald die Kollektoraustrittstemperatur unter eine feste Grenztemperatur (beispielsweise -4 °C) sinkt. Für die Auslegung der Anlage wurde angenommen, dass in der Zeitperiode zwischen Oktober und März sowohl der Absorber-Direktbetrieb als auch der Regenerationsbetrieb stattfinden kann. In den Sommermonaten Juni bis August kann der Kühlbetrieb erfolgen.

Die Abbildung 4-29 zeigt Aufnahmen des Bedienpanels der Regelung.



Abbildung 4-29: Visualisierung des Anlagenschemas im Bedienpanel der Regelung (links) und der von den Wärmemengenzählern ausgegebenen Leistungen (rechts) der Anlage 1

Für das Monitoring bzw. die in-situ Vermessung der Anlage wird auf der elektrischen Seite ursprünglich ein Messkonzept verfolgt, welches eine Erfassung des elektrischen Strombedarfs der zentralen Anlagenkomponenten Wärmepumpe und Speicher beinhaltet. Zusätzlich sollte sowohl der Gesamtstrombedarf der Wohneinheiten als auch der Strombedarf für Elektromobilität erfasst werden. Weiterhin wurden nach Konzept die Strommengen gemessen, die durch die elektrische Stromerzeugung der PV-Module entstehen und die, die in das öffentliche Stromnetz eingespeist werden. Eine Besonderheit dieser Anlage ist die Warmwasserbereitung mit dezentralen, wohnungsweisen elektrischen Durchlauferhitzern. Da der Warmwasserverbrauch in die Wärmebilanz eines Gebäudes nach EnEV eingerechnet wird, wurde das Messkonzept an dieser Stelle um eine Erfassung des elektrischen Verbrauchs der Durchlauferhitzer erweitert.

Leider konnte das elektrische Messkonzept nie vollständig installiert und in Betrieb genommen werden, so dass diese prinzipiell interessanten Informationen in der Auswertung fehlen.

Das Monitoring der thermischen Größe findet durch Fluidtemperatur- und Volumenstrommessungen an den relevanten Stellen des hydraulischen Heiz- und Kühlsystems statt. Insgesamt sind 26 Temperatursensoren und vier zentrale Durchflussmessgeräte installiert, zuzüglich der Wärmezähler für die 11 Nutzungseinheiten und die Diakoniestation und der Messtechnik für die elektrische Warmwasserbereitung. Zusätzlich wurde die gleiche Wetterstation installiert, die bereits in der Anlage 1 installiert und in Kapitel 4.5.2.1 beschrieben wurde.

Im Dezember 2020 erfolgte die Inbetriebnahme der Messtechnik. Hierbei traten insbesondere bei der Datenübertragung der Wetterstation anfängliche Schwierigkeiten auf. Mit einiger zeitlicher Verzögerung konnte jedoch im Juni 2021 auch die Wetterstation vollständig in Betrieb genommen und an die Datenaufzeichnung angeschlossen werden. Für die Detektion und Behebung der fehlerhaften Datenkommunikation waren mehrere Termine vor Ort erforderlich.

Im zweiten Halbjahr 2021 wurde eine automatisierte Messdatenvorverarbeitung und -auswertung, sowie eine einheitliche Darstellung zur Prüfung der Plausibilität der Messdaten und Funktionalität des Wärme- und Kälteversorgungssystems und der entsprechenden Messtechnik erstellt.

4.5.3.2 Messergebnisse

Vergleich Wärmebedarf mit Wärmeverbrauch

Für den Vergleich des Wärmebedarfs mit dem Wärmeverbrauch kann auf Messdaten diverser Wärmezähler zurückgegriffen werden. Die Wärmebedarfe wurden bei der Auslegung der Anlage mithilfe einer Simulation ermittelt. Da in dieser Simulation Wetterdaten des Testreferenzjahres 2015 verwendet wurden, müssen die durch Simulation berechneten Wärmebedarfe für einen objektiven Vergleich an die Witterung der betrachteten Jahre 2021 bis 2024 angepasst werden. Diese Witterungsbereinigung wird auf Grundlage der Außenlufttemperatur durchgeführt, wobei aufgrund von Messlücken bei der Datenerfassung der Wetterstation direkt an der Versuchsanlage auf Wetterdaten der nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes (DWD) zurückgegriffen wird. Diese befindet sich ca. 13 km entfernt auf dem Schnarrenberg bei Stuttgart.

In Abbildung 4-30 sind die monatlichen Wärmebedarfe und -verbräuche der 11 Wohneinheiten und der als 6 weitere Wohneinheiten aufgeführten Diakoniestation in einem Zeitraum von September 2021 bis Februar 2024 dargestellt, wobei die monatlichen Wärmebedarfe auf Grundlage der Außenlufttemperatur witterungsbereinigt wurden.

Vergleich Kältebedarf mit Kälteverbrauch

Die gemessenen monatlichen Kälteverbräuche der Wohneinheiten sind in Abbildung 4-31 als hellblaue Balken dargestellt. Zusätzlich ergänzt ein dunkelblauer Balken im Juli die gemessenen Kälteverbräuche um einen approximierten Kälteverbrauch, aufgrund einer Messlücke in einem Zeitraum von 13 Tagen. Die Approximation wird auf Grundlage der täglichen Kälteverbräuche zwei Wochen vor und zwei Wochen nach der Messlücke durchgeführt. Außerdem wurden die täglichen Kälteverbräuche in Abhängigkeit der jeweils vorliegenden mittleren täglichen Außenlufttemperatur an die klimatischen Bedingungen im Zeitraum der Messlücke angepasst. Insgesamt sind die Kälteverbräuche in den Monaten Juli, Juni und August ähnlich den prognostizierten nicht witterungsbereinigten Kältebedarfen. Im Monat September kann die Diskrepanz der gemessenen Kälteverbräuche im Vergleich zu den prognostizierten nicht vorhandenen Kältebedarfen mit laut des Deutschen Wetterdienstes (DWD) außergewöhnlich warmen Temperaturen in diesem Monat erklärt werden [93].

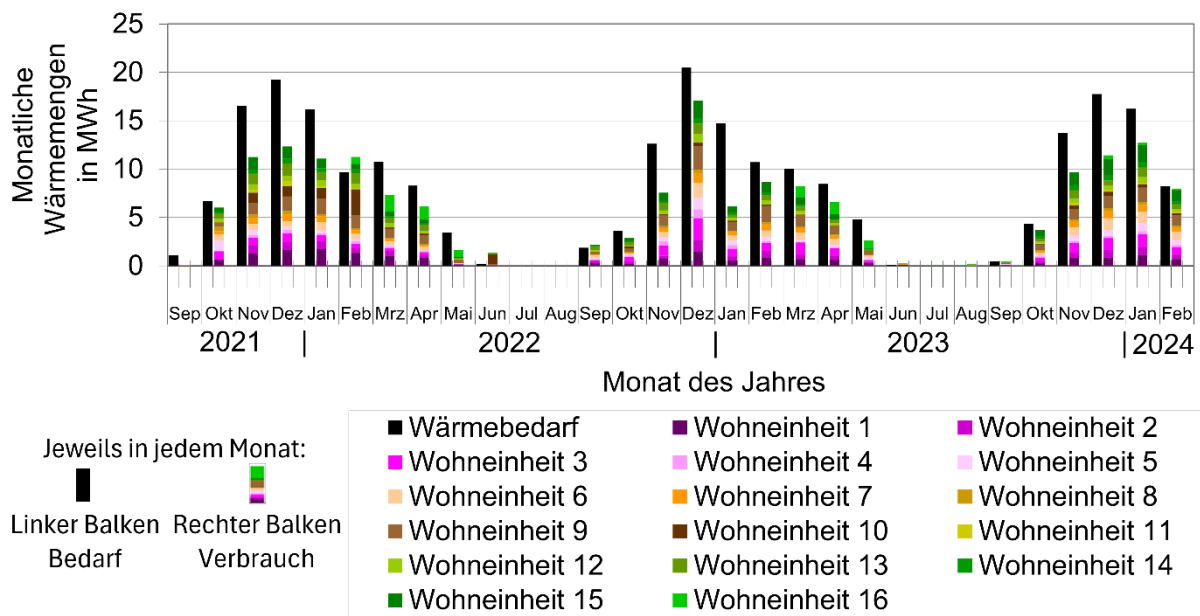


Abbildung 4-30: Vergleich der monatlichen Wärmebedarfe und -verbräuche der Anlage 1

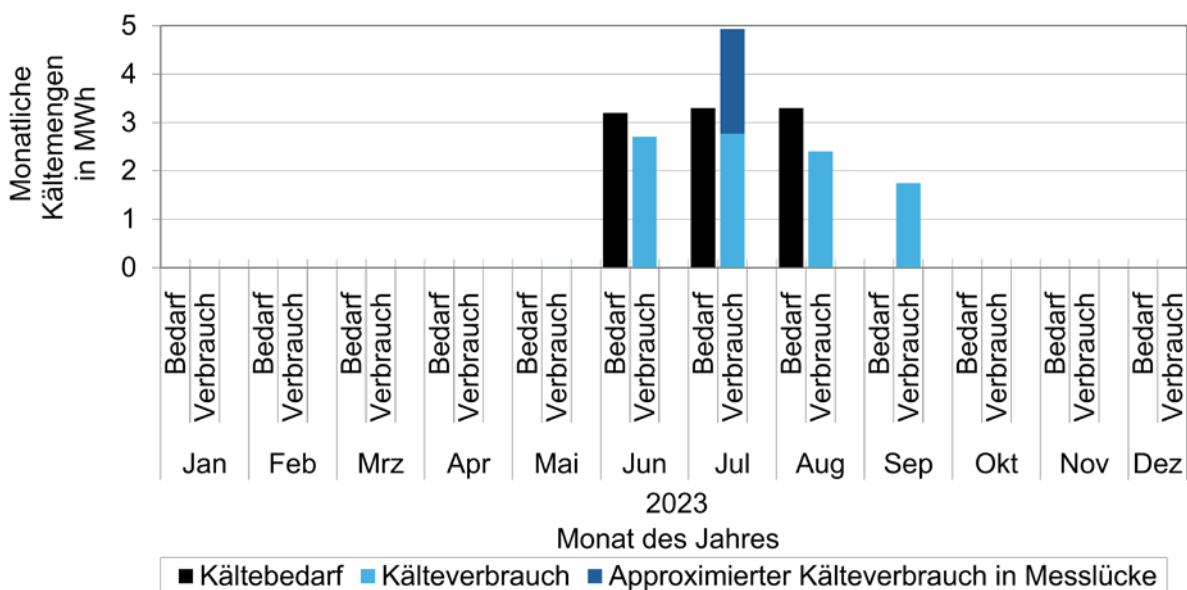


Abbildung 4-31: Monatliche Kältebedarfe und -verbräuche der Wohneinheiten in der Anlage 1

4.5.4 Anlage 3

4.5.4.1 Anlagenbeschreibung

Diese bestehende Versuchsanlage von VCS wurde in das Projekt aufgenommen, da diese Anlage mit Wärmepumpe und Eisspeicher ausgestattet und eine Ausstattung mit PVT-Kollektoren bereits außerhalb des Projekts „Sol4City“ geplant war.

Abbildung 4-32 zeigt das Hydraulikschema mit Sensorpositionen der Anlage 3.

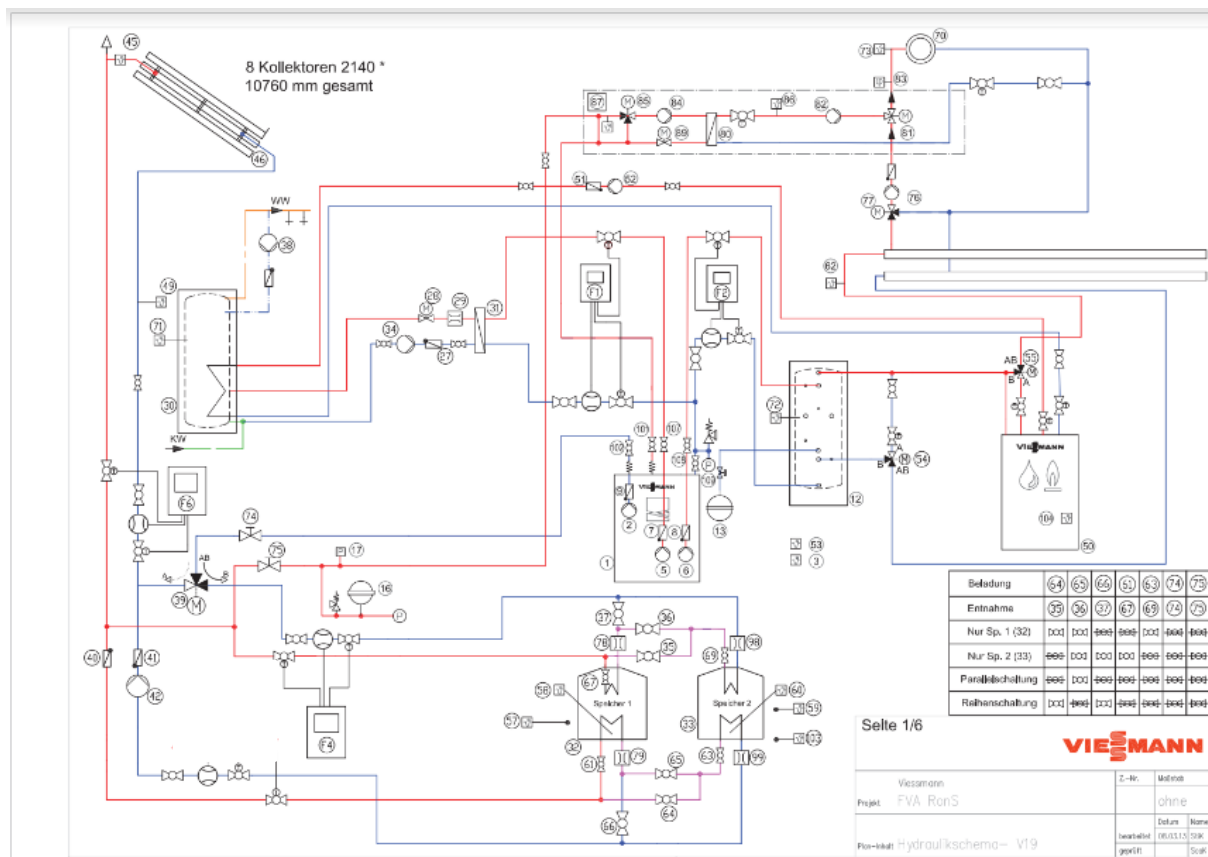


Abbildung 4-32: Hydraulikschema und Sensorpositionen der Anlage 3

Die Installation der PVT-Kollektoren erfolgte aufgrund des Corona Lockdowns jedoch mit Verzögerung. Die PV-Luft-Kollektoren von Typ Dualsun Spring wurden Anfang 2021 geliefert. Bedingt durch den langen Winter konnten die Installationsarbeiten allerdings erst im April 2021 begonnen und im Mai 2021 abgeschlossen werden.

Die Anlage wurde mit dem neuen Kollektorfeld (siehe Abbildung 4-33) und einer neuen Regelung im Juni 2021 in Betrieb genommen. Weiterhin wurde die Anlage im Zuge des Umbaus für den Test von verschiedenen Sensoren zur Bestimmung des Beladungszustands des Eisspeichers vorbereitet, die schrittweise nach den Laboruntersuchungen am IGTE dort eingesetzt wurden. In Abbildung 4-34 sind die drei Sensoren zur Bestimmung des Beladungszustands dargestellt, die im Projekt untersucht wurden.



Abbildung 4-33: Kollektorfeld der Anlage 3 mit PV-Luft-Kollektoren vom Typ Dualsun Spring



Abbildung 4-34: Sensoren zur Bestimmung des Beladungszustands vor dem Einbau in den Eisspeicher (links: Stabsonde mit geführter Mikrowelle, Mitte unten: Kapazitiver Pegelgeber, rechts: Ultraschall-Füllstandsensor)

Zusammen mit der Montage der Wetterstation wurde im Sommer 2021 auch das neue Regelungskonzept implementiert. Die gewählte Parametrierung des Systemreglers sowie dessen korrekte Ansteuerung der verbauten Aktorik im hydraulischen System wurde bei der Inbetriebnahme geprüft. Darüber hinaus wurden verschiedene Defekte von Sensorik und Ausfälle von Aktoren simuliert um die Sicherheitsfunktionen des Steuergerätes, sowie die Auswirkung derartiger Fehler auf das Quellenmanagement zu prüfen. Die Inbetriebnahme der Regelung konnte im November 2021 erfolgreich abgeschlossen werden.

Die Versuchsanlage wird durch Fernzugriff kontinuierlich von der Fa. VCS überwacht. Das Betriebsverhalten der Anlage wechselt seit Inbetriebnahme erwartungsgemäß zwischen der Regeneration des Eisspeichers und dem als Mischbetrieb bezeichneten Heizbetrieb. Die Wärmepumpe wird bei hohen Außentemperaturen durch das als regenerative Wärmequelle dienende Kollektorfeld mit den PV-Luft-Kollektoren vom Typ Dualsun Spring versorgt. Bei niedrigen Außentemperaturen sorgt das Regelkonzept für eine zunehmende Umschaltung auf die Wärmequelle Eisspeicher. Die gemeinsame Nutzung beider Quellen wird durch einen Mischer realisiert. Das Modell zur Berechnung des Beladungszustands des Eisspeichers ist in der Regelung implementiert und liefert parallel sein Ergebnis in die Datenaufzeichnung.

Die Installation der Wetterstation wurde erst Ende 2021 fertiggestellt. Außerdem hat sich mit Inbetriebnahme der Messtechnik herausgestellt, dass einer der bereits installierten Wärmezähler auf der Quellenseite keine Werte liefert und ausgetauscht werden muss. Es wurde die Entscheidung getroffen, beim Umbau gleich alle Wärmezähler vom (veralteten) Typ „Flügelrad“ auf neue Ultraschallsensoren zu tauschen, da erwartet wird, dass im Lauf des Betriebs weitere Zähler ausfallen.

Anmerkung: Die für die Wettermessstation und Wärmezähler entstehenden Kosten für Material und Arbeitszeit sind nicht Bestandteil des Forschungsprojekts, sondern werden von VCS im Rahmen der Betreuung der Versuchsanlagen übernommen.

Die ergänzende Messtechnik konnte im Mai 2022 in Betrieb genommen werden. Die Messtechnik erlaubt u. a. die energetische Bilanzierung der beiden Eisspeicher.

4.5.4.2 Messergebnisse

Für diese Anlage wurden bei den Auswertungen inkonsistente Messdaten der Energiebilanzen festgestellt. Daher wurden nur die Messergebnisse der Sensoren zur Bestimmung des Beladungszustandes ausgewertet (siehe Kapitel 2.6.2.7). Weitere Auswertungen und Korrekturen der Messdaten bzw. Sensorik wurden nicht durchgeführt, da im Vergleich zu den anderen drei untersuchten Anlagen hier kein Quartier oder Mehrfamilienhaus betrachtet wurde, sondern ein Einfamilienhaus. Aufgrund der somit geringeren Anlagengröße hat diese Anlage eine vergleichsweise geringere systemtechnische Relevanz. Zudem wurde diese Anlage nicht aus Projektmitteln finanziert und das Monitoring erfolgte nur in einem kleinen Umfang.

4.5.5 Anlage 4

4.5.5.1 Anlagenbeschreibung

Im 2. Halbjahr 2021 wurde die Anlage 4 als vierte Versuchsanlage in das Forschungsprojekt aufgenommen. Analog zu den bereits vorgestellten Anlagen wurde auch die Anlage 4 mit einer erweiterten Messtechnik ausgestattet.

Bei dieser Anlage handelt es sich um ein Neubauquartier, das insgesamt 3 Mehrfamilienhäuser umfasst. Die Abbildung 4-35 zeigt eines dieser Mehrfamilienhäuser in unterschiedlichen Baustadien. Die Anlage 4 basiert analog zur Anlage 1 auf einem kalten Nahwärmenetz mit einem zentralen Eisspeicher und dezentralen Wärmepumpen. Jedes Gebäude ist mit einer $21 \text{ kW}_{\text{th}}$ (bei B0/W35: Soleeintritt $0 \text{ }^{\circ}\text{C}$, Heizungsvorlauf $35 \text{ }^{\circ}\text{C}$) Sole-Wasser-Wärmepumpe vom Typ Vitocal 300-G BW 301.A21 ausgestattet. Die Wärmepumpen sind über ein doppelwandiges Rohrleitungsnetz mit dem Eisspeicher sowie dem Kollektorfeld verbunden. Die gesamte Heizlast beträgt 42 kW . Analog zur Anlage 1 findet die Warmwasserbereitung dezentral über elektrische Durchlauferhitzer statt.



Abbildung 4-35: Neubau eines der drei Mehrfamilienhäuser der Anlage 4

Der Eisspeicher ist ein Stahlbeton-Rundbehälter mit einem Durchmesser von 6 m und einer Höhe von 4 m . Der Behälter hat ein Volumen von ca. 94 m^3 und befindet sich neben den Gebäuden in der Erde vergraben mit ca. 1 m Erdüberdeckung (siehe Abbildung 4-36).

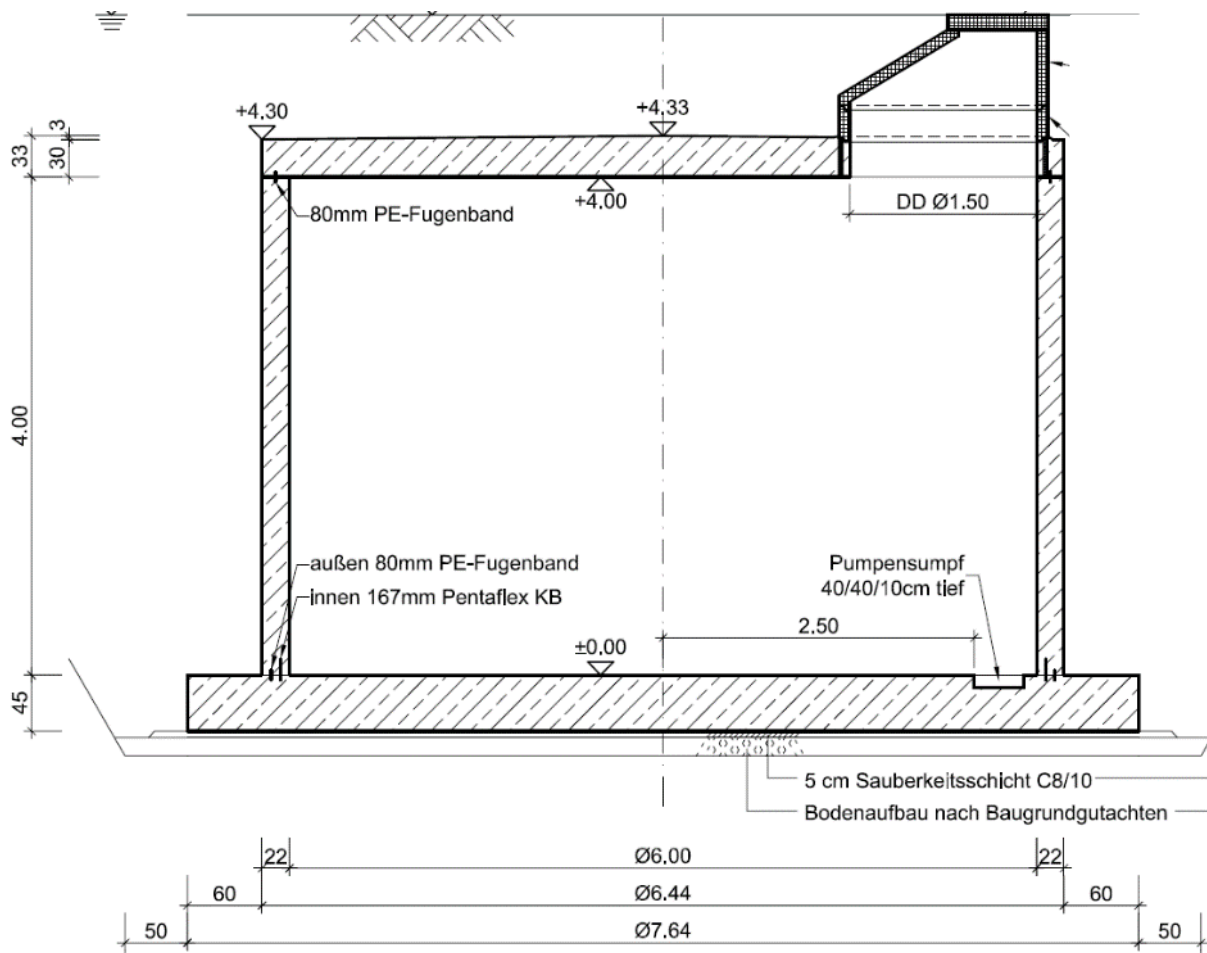


Abbildung 4-36: Eisspeicher der Anlage 4 (oben) und Bauteilskizze mit einem Vertikalschnitt des Eisspeichers (unten)

Als primäre Wärmequelle kommen thermische Sonnen-Luft-Kollektoren vom Typ SLK-Alu 2x1 zum Einsatz. Diese Kollektoren bestehen zum Großteil aus Aluminium und sind in der Schrägdachvariante 2 m lang sowie 1 m breit (siehe Abbildung 4-37). Ein Kollektor wiegt gefüllt 61,12 kg und fasst 37,12 Liter Volumen. Bei der Anlage 4 wurden die Kollektoren auf dem

Schrägdach sowie auf den Carports neben den Gebäuden montiert. Insgesamt wurden 32 Stück installiert.



Abbildung 4-37: Thermische Sonnen-Luft-Kollektoren vom Typ SLK-Alu 2x1 installiert auf dem Schrägdach der Carports der Anlage 4

Bei dieser Anlage sind folgende Betriebsweisen vorgesehen: Entzugsbetrieb über den Eisspeicher, Absorber-Direktbetrieb über die Kollektoren, Regenerationsbetrieb zur Regeneration des Eisspeichers mit Wärme der Kollektoren sowie Natural Cooling (NC). Der NC-Betrieb erfolgt über den Regenerationswärmeübertrager. Der Betriebsmodus Active Cooling ist in dieser Anlage nicht vorgesehen.

Die Häuser Nr. 16 und 18 sind über ein kaltes Nahwärmenetz mit drei Sole-Leitungen an die Heizzentrale im Haus Nr. 20 angeschlossen. Im Haus Nr. 20 befindet sich die Regelung Vitocontrol für das Wärmequellenmanagement. Alle drei Technikräume verfügen bereits „bauseits“ über Wärmezähler vom Typ Siemens Sitrans FM MAG 5100 W auf der Primärseite (Solekreislauf) sowie Sekundärseite (Heizkreislauf) der Wärmepumpe. Dieser Typ von Wärmezähler eignet sich zur messtechnischen Erfassung der zur Kühlung übertragenen Wärme und ermöglicht somit auch beim Betriebsmodus Natural Cooling eine gebäudespezifische primärseitige Bilanzierung.

Im Haus Nr. 20 befindet sich neben den zwei Wärmezählern für die Wärmepumpe ein zusätzlicher Wärmezähler vor der Netzpumpe zur Bilanzierung des Netzes sowie am Regenerationswärmeübertrager. Die hier genannten Wärmezähler sind bereits Teil des Bauprojektes und mussten demnach nicht nachgerüstet werden. Analog zur Anlage 1 konnten dem Forschungsprojekt aus datenschutzrechtlichen Gründen keine Zählerdaten für die einzelnen Wohnungen zur Verfügung gestellt werden.

Die Anlage 4 ist zusätzlich mit einer 23,7 kWp PV-Anlage, bestehend aus 64 Modulen, ausgestattet. Die PV-Anlage wird von der Firma Energiegewinner eG betrieben. Für die innerhalb des Forschungsprojekt durchzuführenden energetischen Betrachtungen war geplant, die am Wechselrichter verfügbaren Messdaten über einen separaten Zugang innerhalb der Monitoring-Software zu erfassen, jedoch konnte dies nicht realisiert werden. Die Anlage konnte mit einigen Monaten Verspätung zur ursprünglich geplanten Inbetriebnahme Anfang 2022 am 14.07.2022 in Betrieb genommen. Der Grund für die Verspätung waren Verzögerungen bei der Fertigstellung der Kollektoranlage und Leckagen im Technikraum.

Um eine Bilanzierung der Wärmepumpen sowie des kalten Nahwärmenetzes zu ermöglichen, wurden im ersten Halbjahr 2022 die bereits von dem mit der Planung der Anlage betrauten Ingenieurbüro im kalten Nahwärmenetz für den Betrieb mit einem Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch vorgesehenen Wärmezähler mit zusätzlicher Technik zur Datenübermittlung ausgestattet. Die Wärmezähler auf der Primärseite der Wärmepumpe in Haus 16, in Haus 18 und in Haus 20 wurden zur Datenerfassung mit der Regelung Vitocontrol verbunden. In der Heizzentrale im Haus 20 wurden außerdem die im kalten Nahwärmenetz installierten und mit einem Wasser-Frostschutzmittel-Gemisch betriebenen Wärmezähler zur Bilanzierung des Regenerationswärmeübertragers sowie des kalten Nahwärmenetzes mit der Vitocontrol verbunden.

Bei den installierten Wärmezählern handelt es sich um Wärmezähler mit einem Ultraschallrechenwerk. Die drei Wärmezähler auf der Sekundärseite der Wärmepumpe konnten aufgrund fehlender Zugänglichkeit nicht mit der Vitocontrol verbunden werden.

Eine Übersicht des Hydraulikschemas der Anlage ist in Abbildung 4-38 dargestellt.

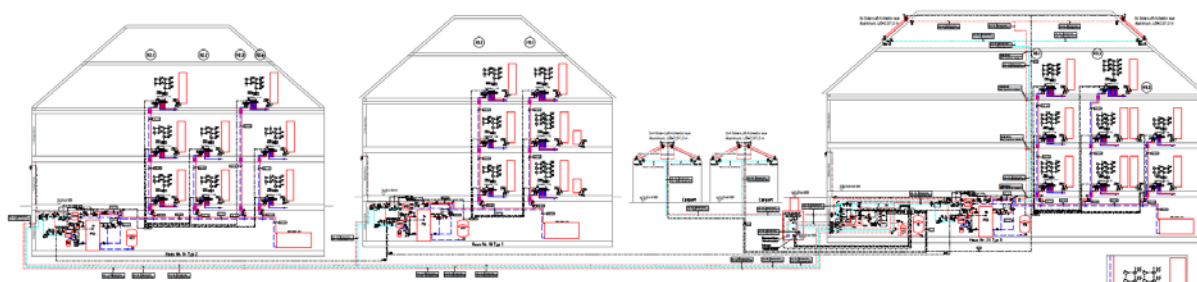


Abbildung 4-38: Hydraulikschema der Anlage 4 mit Haus 16 (links), Haus 18 (Mitte) und Haus 20 (rechts)

4.5.5.2 Messergebnisse

Vergleich Wärmebedarf mit Wärmeverbrauch

Da, wie schon in der Anlagenbeschreibung erwähnt wurde, die Messdaten der Wärmezähler auf der Sekundärseite der Wärmepumpe nicht für die Auswertung verfügbar sind und es auch keine weiteren Messdaten zu den Wärmeverbräuchen der Wohneinheiten vorhanden sind, kann der Vergleich von Wärmeverbräuchen mit Wärmebedarfen für diese Anlage nicht durchgeführt werden.

Stattdessen müssen die Wärmezähler auf der Primärseite der Wärmepumpen verwendet werden. Um mithilfe dieser auf die Wärmeverbräuche auf der Sekundärseite der Wärmepumpen zu schließen, sind Angaben zur Effizienz der Wärmepumpen nötig. Dazu wurde eine Jahresarbeitszahl von 3,9 im Heizbetrieb für eine der drei Wärmepumpen vom Typ Vitocal 300-G A21 vor Ort aus dem Betriebsprotokoll ausgelesen. Die Jahresarbeitszahl wird hierbei intern in der Wärmepumpe mithilfe eines Energiebilanz-Verfahrens berechnet, welches auch für die Freigabe von Fördergeldern zugelassen ist und demnach als hinreichend genau erachtet wird.

In Abbildung 4-39 sind zum einen die monatlich prognostizierten witterungsbereinigten Wärmebedarfe aller Häuser der Anlage 4 zusammen dargestellt. Zum anderen sind die monatlichen Wärmeverbräuche der Häuser mit der Hausnummer 16, 18 und 20 zum Vergleich aufgetragen. Aufgrund einer Messlücke im Zeitraum vom 15.12.2023 bis zum 03.01.2024 wurden die Wärmeverbräuche der drei Häuser approximiert. Die Approximation wurde auf Grundlage der täglichen Wärmeverbräuche der drei Häuser zwei Wochen vor und zwei Wochen nach der Messlücke durchgeführt.

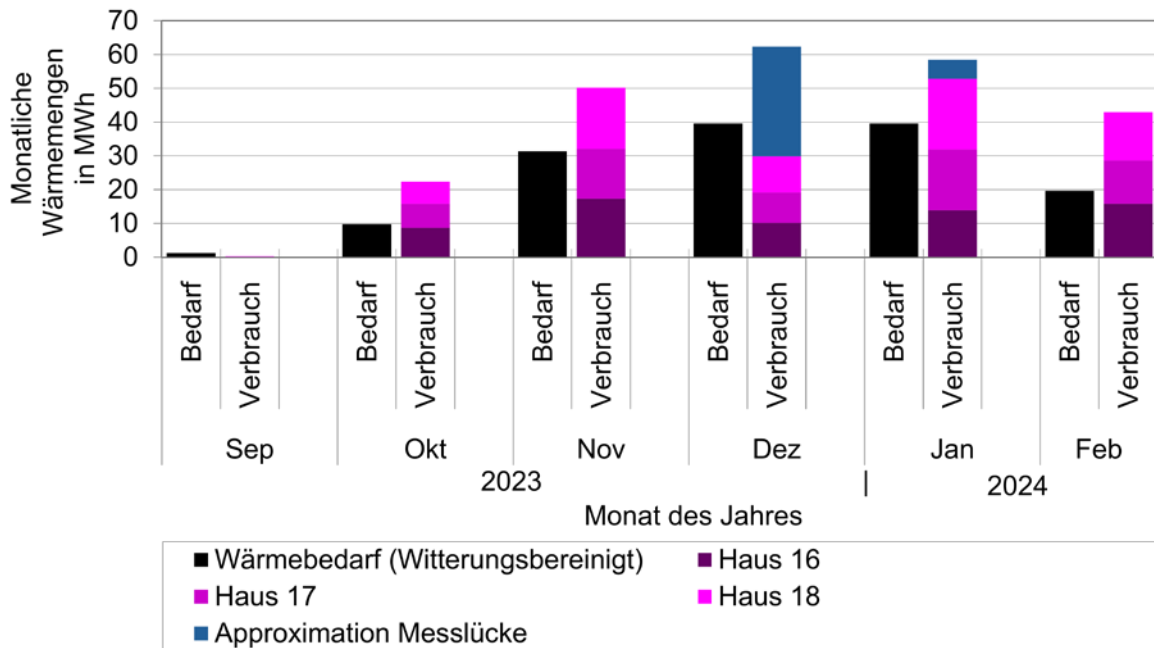


Abbildung 4-39: Vergleich des monatlichen Wärmebedarfs mit dem Wärmeverbrauch der Gebäude der Anlage 4

Die gemessenen Wärmeverbräuche inklusive der approximierten Wärmeverbräuche liegen in jedem Monat des betrachteten Zeitraums über den prognostizierten Wärmebedarfen. Diese Diskrepanz zwischen den prognostizierten Wärmebedarfen und den Wärmeverbräuchen kann zum einen mit Ungenauigkeiten in der Witterungsbereinigung der Wärmebedarfe begründet werden. Da für diese Anlage keine Wetterdaten einer lokal installierten Wetterstation zur Verfügung standen, wurden für die Witterungsbereinigung Wetterdaten der circa 7 km entfernt gelegenen Wetterstation Köln-Stammheim des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Trotz der relativ geringen Distanz zwischen dieser Wetterstation und der Anlage können lokal unterschiedliche Gegebenheiten, wie die Nähe zu einem Gewässer oder die Windexposition für unterschiedliche Außenlufttemperaturen sorgen. Des Weiteren kann bei der Prognose der Wärmebedarfe das spätere reale Nutzerverhalten nicht genau prognostiziert werden. Beispielsweise resultieren schon kleine nutzerbedingte Erhöhungen der gewünschten Raumtemperatur über einen längeren Zeitraum in erheblichen energetischen Mehraufwänden.

Wärmegewinne im kalten Nahwärmenetz

Eine Besonderheit dieser Anlage ist die Anordnung eines Wärmezählers zwischen den Wärmequellen und dem kalten Nahwärmenetz und zusätzlich die Installation weiterer Wärmezähler zwischen dem kalten Nahwärmenetz und den dezentralen Wärmepumpen. Diese Anordnung der Wärmezähler „vor“ und „nach“ dem kalten Nahwärmenetz ermöglicht es die Wärmegewinne vom umgebenden Erdreich in das kalte Nahwärmenetz messtechnisch zu ermitteln. Wärmegewinne treten in kalten Nahwärmenetzen dann auf, wenn die Temperatur des in den Rohrleitungen zirkulierenden Wärmeträgerfluids niedriger als die Temperatur des die Rohrleitungen umgebenden Erdreichs ist. Aufgrund dieser Temperaturdifferenz findet eine Wärmeübertragung vom Erdreich in das Wärmeträgerfluid statt, welche für die Anlage 1 in Kapitel 4.5.2.2 analytisch berechnet wurde und hier bei der Anlage 4 mithilfe der Wärmezähler ermittelt werden konnte.

In Abbildung 4-40 sind die monatlichen Wärmegewinne des kalten Nahwärmenetzes dargestellt. Außerdem ist der prozentuale monatliche Anteil dieser Wärmegewinne bezogen auf die insgesamt durch das Netz übertragene Wärmemenge als schwarze Dreiecke aufgetragen. Im Vergleich zu den für Anlage 1 analytische berechneten Wärmegewinnen von 12,5 % bezogen auf der dort im betrachteten Zeitraum übertragenen Wärmeenergie betragen die Wärmegewinne in dieser Anlage 14,3 % bezogen auf der hier im betrachteten Zeitraum übertragenen Wärmeenergie. Dieser Anteil ist ebenfalls in einem plausiblen Bereich, da speziell in dem kalten Nahwärmenetz dieser Anlage im Vergleich zu Anlagen ähnlicher Dimensionierung mehr Rohrleitungen in der Erde verlegt wurden. Dies ist mit dem hier auf das Rohrleitungssystem angewendeten Tichelmann-System zu begründen. Bei dieser Art der Installation von Rohrleitungssystemen ist die Summe der Länge der Rohrleitungen für Vorlauf und Rücklauf aus Sicht jeder der drei Gebäude in etwa gleich groß. Dadurch ist ein hydraulischer Abgleich ohne die Installation zusätzlicher Regelventile bereits gegeben, welche andernfalls Druckverluste und damit eine höhere benötigte Pumpenleistung bedingen würden. Jedoch erfordert diese Art von Rohrleitungssystem die Verlegung zusätzlicher Rohrleitungen, was bei dieser Anlage zu einer Länge des kalten Nahwärmenetzes von 220 m führt (gegenüber ca. 130 m bei einfachem, parallelem Anschluss der Gebäude).

Vergleich Kältebedarf mit Kälteverbrauch

In der Anlage 4 ist kein Kühlbetrieb vorgesehen, weshalb keine zusätzlichen Wärmezähler zur Erfassung der Kälteverbräuche installiert wurden und demnach auch kein Vergleich mit Kältebedarfen durchgeführt werden kann.

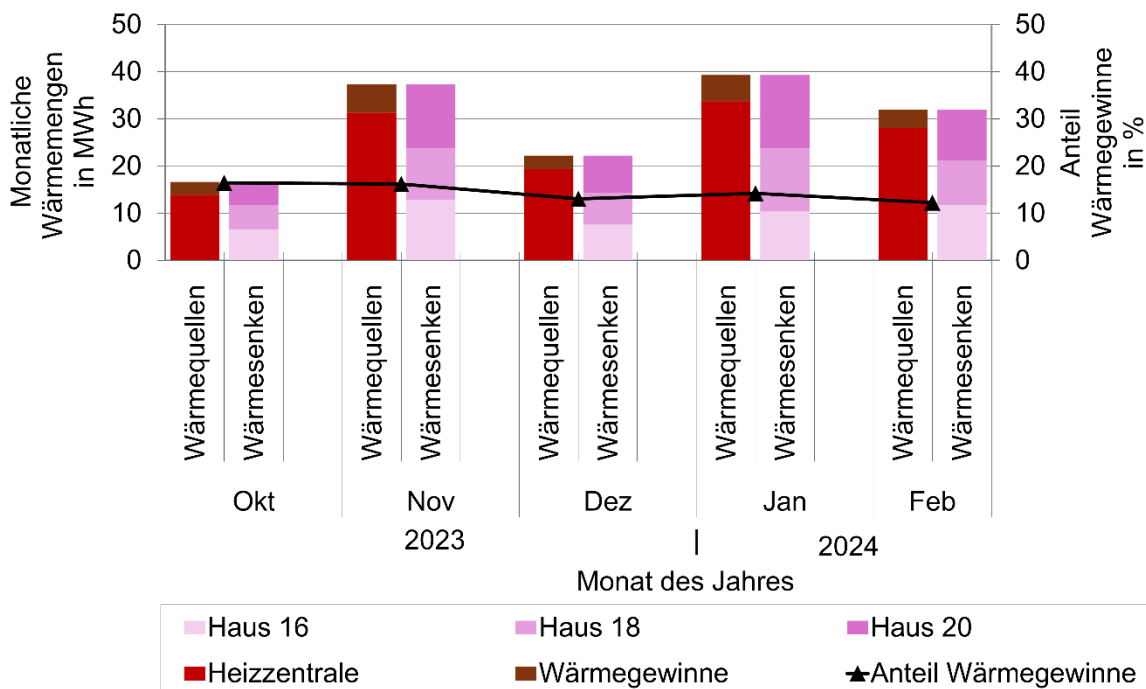


Abbildung 4-40: Monatliche Wärmegewinne des kalten Nahwärmenetzes und prozentualer monatlicher Anteil dieser an der insgesamt übertragenen Wärmemenge

Monatliche Arbeitszahl der Wärmepumpen

Aufgrund der bereits erläuterten nicht verfügbaren Messdaten der Wärmezähler auf der Sekundärseite der Wärmepumpen ist eine Berechnung von monatlichen Arbeitszahlen nicht möglich.

Monatliche solarthermische Deckungsanteile

Aufgrund der bereits erläuterten nicht verfügbaren Messdaten zur Bestimmung der Wärmeverbräuchen der drei Häuser können keine monatlichen solarthermischen Deckungsanteile berechnet werden.

4.5.5.3 Optimierungsmaßnahmen

Bei dieser Anlage bestand im Zeitraum der messtechnischen Begleitung durch das Forschungsprojekt keine Notwendigkeit für grundlegende Optimierungen der Installation und Betriebsweise.

Die identifizierten Maßnahmen betreffen nur Verbesserungen in der Installation, wie z. B. die Störabschaltung durch eine falsch ausgelegte Druckhaltung und den Verlust von Wärmeträgermedium sowie eine falsche Parametrierung der dezentralen Wärmepumpen. Bei Anlagen dieser Größenordnung und Komplexität sind derartige Defizite nie ganz vermeidbar und werden meist während der Inbetriebnahme beseitigt.

4.5.6 Simulation

Zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Konzeptlösungen (KL) wurden die in AP 2 und AP 3 erarbeiteten Simulationsmodelle für die entwickelten Komponenten zu Simulationsmodellen für die Gesamtanlage zusammengefügt und ggf. um weitere Anlagenkomponenten ergänzt. Mit Hilfe der Simulation der Gesamtanlage kann sowohl eine Komponentendimensionierung sowie eine Ableitung von Optimierungsmaßnahmen erfolgen. Die Konzeptlösung 6 hat sich bisher hinsichtlich der praktischen Umsetzung als relevanteste Variante herausgestellt. Außerdem ist mit der in Abschnitt 4.5.2 beschriebenen Anlage 1 diese Konzeptlösung auch bereits in der Praxis umgesetzt und ist damit für einen Vergleich verfügbar. Die Umsetzung der Anlagensimulation erfolgt daher im Wesentlichen an der Konzeptlösung 6 bzw. der Anlage 1. In Abschnitt 4.5.6.2 wird auch die Konzeptlösung 8 untersucht.

Um ein effizientes Zusammenspiel der einzelnen Komponenten zu gewährleisten, muss das Simulationsmodell für die Gesamtanlage über eine entsprechende Regelung verfügen. Hierfür wurde zum einen ein von der Firma VCS entwickeltes umfassendes Regelungskonzept auf Basis eines Zustandsautomaten verwendet, das im Folgenden auch als Standardregelung bezeichnet wird. Zur Durchführung von Simulationen mit geringem Rechenaufwand wurde zusätzlich eine vereinfachte Regelung in der auch für die Anlagensimulation verwendeten Simulationsumgebung TRNSYS umgesetzt. Diese vereinfachte Regelung bildet die Standardregelung zwar weitestgehend, aber nicht in vollem Umfang ab.

Die Standardregelung, auf der auch die vereinfachte Regelung basiert wird in Abschnitt 5.3 detaillierter beschrieben. Diese von der Firma VCS erarbeitete Systemregelung wurde im Rahmen des Projektes in der Simulationsumgebung MATLAB/Simulink weiterentwickelt. Sie basiert auf einem Zustandsautomaten, der abhängig von den aktuellen Anforderungen und dem Anlagenstatus einen passenden von mehr als 15 zur Verfügung stehenden Betriebsmodi auswählt. Für jeden Betriebsmodus sind die entsprechenden Ansteuerungen der Aktoren wie Pumpen und Ventile vordefiniert und werden nach Wahl des Betriebsmodus abgerufen. Der Zustandsautomat sowie das Aktoren-Handling wurden in MATLAB/Simulink implementiert. Die in TRNSYS ablaufende Anlagensimulation greift mittels des dort vorhandenen Type 155 (TRNSYS-Schnittstelle mit MATLAB) auf die Regelung zu. Das MATLAB -Skript, auf das mittels Type 155 von TRNSYS aus zugegriffen wird, dient dabei als Schnittstelle zwischen der Anlagensimulation in TRNSYS und dem Zustandsautomaten in MATLAB /Simulink. Die in MATLAB /Simulink implementierte Regelung, also Zustandsautomat und Aktorenhandling, wird direkt als Anlagenregelung exportiert und so in den in den Abschnitten 4.5.2 bis 4.5.5 beschriebenen Anlagen verwendet. Somit kann durch diese Co-Simulation die auch in der Praxis verwendete Regelung 1:1 bereits in der Anlagensimulation getestet werden.

4.5.6.1 Konzeptlösung 6

Bei der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Konzeptlösung 6 (siehe Abbildung 4-7) wird die Wärmeversorgung der Gebäude durch dezentrale Wärmepumpen gewährleistet, die mittels eines kalten Wärmenetzes von einem zentralen PVT-Kollektorfeld und einem zentralen Eisspeicher versorgt werden. Das PVT-Kollektorfeld wird im Folgenden auch als Luft-Sole-Kollektor oder LSK bezeichnet. Die Regelung der Anlage ist in Abschnitt 5.3 detailliert beschrieben. Die Anlage 1 ist in Abschnitt 4.5.2.1 detailliert beschrieben und das Hydraulikschema in Abbildung 4-20 dargestellt. Bei der Auslegung wurde von einem Heizenergiebedarf von 520 MWh/a und einem Kühlenergiebedarf von 168 MWh/a ausgegangen.

Der sich aus der Simulation ergebende Heizwärmebedarf beträgt 500 MWh/a, der Kühlenergiebedarf beträgt 120 MWh/a. Zur Aufprägung der Heizlast auf die Anlage wurde dabei das TRNSYS-Gebäudemodell Type 56 von TRNSYS verwendet. Die einzelnen dezentralen Gebäude wurden durch ein repräsentatives Gebäude abgebildet. Der zentrale Eisspeicher weist eine effektiv nutzbare Kapazität von 75,6 MWh auf. Damit ergibt sich ein Verhältnis von Eisspeicherkapazität zu Heizwärmebedarf von $R = 0,15$. D.h. bei der Abkühlung des Eisspeichers von der maximalen Betriebstemperatur von 20 °C auf 0 °C sowie seiner vollständigen Vereisung können dem Eisspeicher ca. 15 % des jährlichen Wärmebedarfs der Gebäude entzogen werden.

Die Wärmeverluste bzw. Wärmegewinne der Rohrleitungen des kalten Nahwärmenetzes werden bei der Simulation nicht berücksichtigt. Für die vorherrschenden Netztemperaturen von -10 °C bis 20 °C kann allerdings angenommen werden, dass das Nahwärmenetz nur sehr geringe Wärmeverluste bzw. sogar Wärmegewinne aus dem umgebenden Erdreich erzielt. Das Trinkwarmwasser wird ausschließlich mittels elektrischer Durchlauferhitzer erzeugt und wird daher bei der Anlagensimulation nicht berücksichtigt.

Erste Ergebnisse der Anlagensimulation unter Verwendung der in Abschnitt 5.3 beschriebenen Standardregelung mit Zustandsautomat sind in Abbildung 4-41 dargestellt. Dabei sind die ein- und austretenden Wärmemengen der einzelnen Komponenten monatsweise aufgetragen. Die schmalen Balken innen stellen einen Wärmeeintrag in das Netz dar, wenn der dargestellte Wert positiv ist und einen Wärmeaustrag aus dem Netz, wenn der Wert negativ ist (z. B. Wärmeabgabe des Luft-Sole-Kollektors an die Umgebung für Kühlzwecke im Juli und August). Die breiten Balken außen stellen im Fall positiver Werte eine Wärmeentnahme aus dem Netz wie z. B. den Wärmebedarf für die Raumheizung oder Wärmeverluste dar. Im Fall negativer Werte stellen die breiten Balken einen Wärmeeintrag in das Netz dar. Dies ist z. B. bei einer Wärmebereitstellung durch den Eisspeicher, also seiner Entladung, der Fall. Ein positiver Wert steht für eine Beladung des Eisspeichers z. B. während der Kühlperiode.

Die Jahresarbeitszahl JAZ_{Gen} des Systems zur Bereitstellung bzw. Generierung des Bedarfs an Heiz- und Kühlenergie wird wie in folgender Gleichung (4-4) definiert:

$$JAZ_{Gen} = \frac{\text{Summe bereitgestellter Bedarf an Heiz – und Kühlenergie} \left[\frac{MWh}{a} \right]}{\text{elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpe} \left[\frac{MWh}{a} \right]} \quad (4-4)$$

Als bereitgestellter Bedarf an Heiz- und Kühlenergie wird dabei die an das Gebäude abgegebene Heizenergie bzw. die vom Gebäude abgegebene Kühlenergie verwendet. Im Folgenden werden neben der gesamten Arbeitszahl JAZ_{Gen} zum Heizen und Kühlen teils die Werte zum Heizen $JAZ_{Gen,Heizen}$ und zum Kühlen $JAZ_{Gen,Kühlen}$ separat angegeben und für deren Berechnung dann jeweils nur die bereitgestellte Heiz- bzw. Kühlenergie verwendet. Die weiteren elektrischen Hilfsenergien für z.B. Pumpen werden für die Berechnung der JAZ_{Gen} nicht berücksichtigt.

Die JAZ_{Gen} für die in Abbildung 4-41 beispielhaft dargestellten Ergebnisse beträgt 5,2 für die Wärmeversorgung und 7,3 für die Kälteversorgung mit einem Gesamtwert von 5,5 für die Wärme- und Kälteversorgung. Die Heizungsvor- und Heizungsrücklauftemperaturen betragen dabei im Jahresmittel ca. 29°C und ca. 23°C.

Der saisonale Verlauf des Beladungszustands (SoC), der sich aus den Simulationsergebnissen in Abbildung 4-41 ergibt, ist in Abbildung 4-42 als schwarze Linie dargestellt. Der saisonale Verlauf des Vereisungszustands ist als hellblaue Linie dargestellt. Die Beladegrenze ist in gelb dargestellt, die Entladegrenze in orange. Sie werden dazu verwendet den Beladungszustand des Eisspeichers zu beeinflussen und dadurch auf den Heiz oder Kühlbetrieb vorzubereiten. Die Konditionierung des Eisspeichers mittels Be- und Entladegrenzen ist in Abschnitt 5.3 detailliert beschrieben. Bis Ende Februar wird der Eisspeicher entladen und Eis aufgebaut. Der Beladungszustand wird durch den großen Heizwärmebedarf praktisch automatisch unterhalb der Beladegrenze gehalten. Ist der Heizwärmebedarf geringer und damit das Verhältnis von Eisspeicherkapazität zu Heizwärmebedarf größer ergibt sich, wie in Abbildung 4-43 dargestellt, ein anderer saisonaler Verlauf des Beladungszustands.

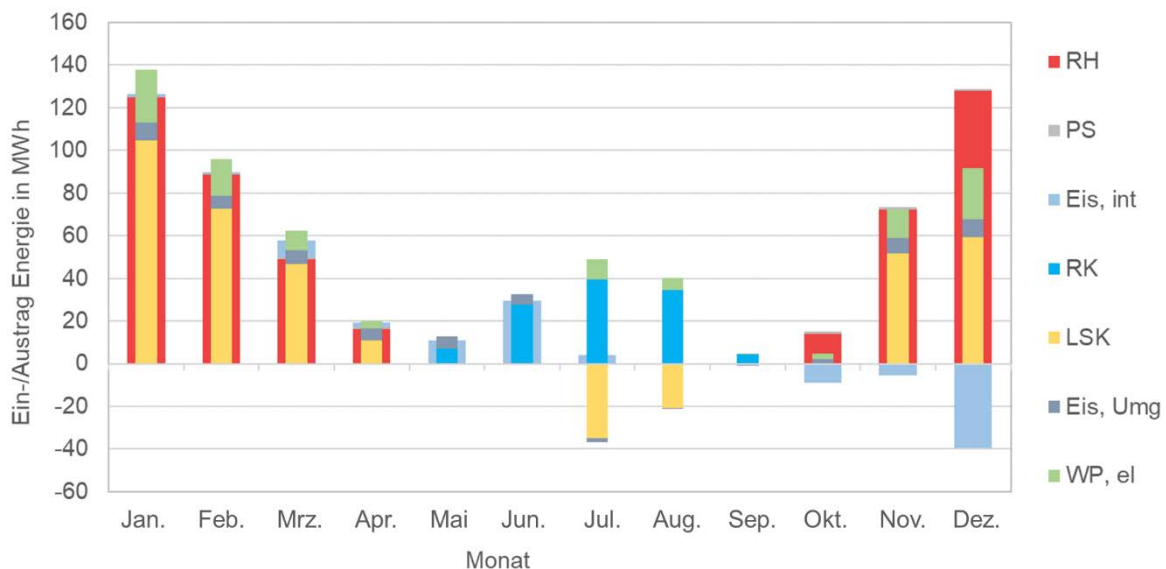


Abbildung 4-41: Mittels Anlagensimulation ermittelte Energie-Einträge (positive schmale Balken oder negative breite Balken) und Energie-Austräge (positive breite oder negative schmale Balken) für die Anlage 1 (Abschnitt 4.5.2) über ein Jahr unter Verwendung der Standard-Regelung (Zustandsautomat). RH: Raumheizung, PS: Pufferspeicher, Eis: Eisspeicher (int: interne Energieänderung, Umg: thermische Umweltgewinne), RK: Raumkühlung, LSK: thermischer Ertrag bzw. Wärmeabgabe aus Luft-Sole-Kollektor, WP,el.: elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpen.

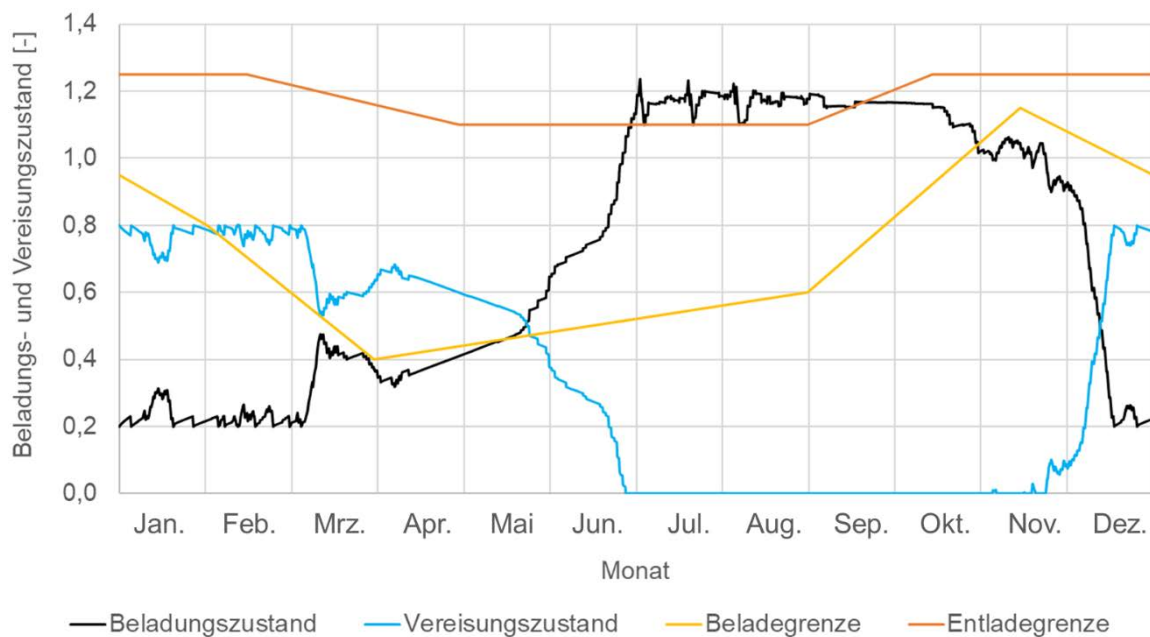


Abbildung 4-42: Saisonaler Verlauf des Beladungszustands bzw. „State of Charge“ (SoC) für ein Verhältnis der Wärmekapazität des Eisspeichers zum Heizwärmebedarf von $R = 0,15 a$.

Der Einfluss des Verhältnisses von der thermischen Kapazität des Eisspeichers zum Heizwärmebedarf (R) ist in Abbildung 4-43 dargestellt. Der Gesamtkühlbedarf wurde bei den dargestellten Ergebnissen jeweils um den gleichen Faktor wie der Heizwärmebedarf skaliert.

Der Verlauf des Beladungszustands für $R = 0,15 a$ wird durch die rote gestrichelte Linie dargestellt. Die weitgehende Entladung des Eisspeichers auf den minimalen Beladungszustand von 0,2 bereits im Dezember zeigt, dass der Eisspeicher für den bestehenden Heizwärmebedarf eher klein dimensioniert ist.

Der saisonale Verlauf des Beladungszustands (SoC), der sich für ein Verhältnis von Wärmekapazität des Eisspeichers zum Heizenergiebedarf von $R = 0,3 a$ ergibt, wird durch die durchgezogene schwarze Linie dargestellt. Hier ist die langsamere Entladung im Winter und Beladung im Sommer aufgrund der geringeren Bedarfe im Vergleich zu $R = 0,15 a$ gut sichtbar. Bei einem großen Verhältnis von Eisspeicherkapazität zu Heizenergiebedarf von $R = 0,59 a$ wird der Eisspeicher bereits nur zeitweise entladen. Wird für diese Konfiguration die Beladegrenze Mitte März erreicht, ist der Heizwärmebedarf für eine weitergehende Entladung des Eisspeichers bereits zu gering.

Der Einfluss der Beladegrenze auf den saisonalen Verlauf des Beladungszustands ist in Abbildung 4-43 für einen Wert von $R = 0,3 a$ dargestellt. Bei der Wahl der durchgezogenen gelben Beladegrenze BG1 ist ersichtlich, dass der zugehörige in grau dargestellte Beladungszustand Ende März bis Mitte April unterhalb dieser Grenze gehalten wird. Der Eisspeicher wird also gezielt entladen. Bei Wahl der gelben gestrichelten Beladegrenze BG2 beginnt diese gezielte Entladung bereits Mitte März und auf einem niedrigeren Niveau. Dadurch wird zu Beginn der Kühlperiode ein deutlich geringerer Beladungszustand bzw. höherer Eisanteil erreicht. Die Ge-

bäudekühlung kann damit länger über den natürlichen Kühlbetrieb, d.h. die Enteisung des Eisspeichers erfolgen und somit elektrische Antriebsenergie der Wärmepumpe für die aktive Kühlung eingespart werden. Durch die weitere Entladung des Eisspeichers kann auch der gesamtjährige elektrische Energiebedarf der Wärmepumpen verringert werden. Dabei wird die Arbeitszahl der Wärmepumpe nur gering durch die leicht geringere Eintrittstemperatur in die Wärmepumpe, die durch den Eisaufbau entsteht, verringert. Die Einsparung der elektrischen Energie durch die Verringerung des aktiven Kühlbedarfs überwiegt. Die Jahresarbeitszahl für die Kühlung bei Verwendung von BG 2 steigt von 5,2 auf 8,7. Der gesamte elektrische Energiebedarf der Wärmepumpe im Jahr wird durch die Verwendung der Beladegrenze BG 2 um ca. 4,7 MWh bzw. 7,6 % im Vergleich zur Verwendung von BG 1 reduziert.



Abbildung 4-43: Saisonaler Verlauf des Beladungszustands bzw. „State of Charge“ (SoC) für unterschiedliche Verhältnisse der Wärmekapazität des Eisspeichers zum Heizenergiebedarf ($R = 0,59 a$, $R = 0,3 a$ und $R = 0,15 a$) und zwei unterschiedliche saisonale Verläufe der Beladegrenze (BG 1 und BG 2) bei $R = 0,3 a$. Der Gesamtkühlbedarf wurde ebenfalls mit gleichem Faktor des Heizbedarfs skaliert.

Die Entladegrenze (EG) bestimmt, ab welcher Eisspeichertemperatur die Vorkühlung des Eisspeichers zur Vorbereitung auf die natürliche Kühlung einsetzt (siehe Juli und Aug. in Abbildung 4-43). Für die untersuchte Anlage ist eine maximale Kühleintrittstemperatur von 15 °C gefordert. Da die Kühleintrittstemperatur der Eisspeichertemperatur entspricht besteht hinsichtlich der Entladegrenze kein großer Optimierungsspielraum. Deshalb liegt der Fokus der Minimierung des gesamtjährigen elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe, wie sie in Abschnitt 5.4.2 beschrieben ist, auf der Variation der Beladegrenze.

Tabelle 4-2: JAZ_{Gen} der Wärmepumpe für die in Abbildung 4-43 dargestellten Simulationsergebnisse.

Variante	JAZ_{Gen}	$JAZ_{Gen,Heizen}$	$JAZ_{Gen,Kühlen}$
R = 0,59 a (BG 2)	5,55	4,46	576
R = 0,3 a (BG 1)	5,14	5,12	5,20
R = 0,3 a (BG 2)	5,56	5,12	8,73
R = 0,15 a (BG 2)	5,48	5,18	7,3

Die geringeren $JAZ_{Gen,Heizen}$ während der Heizperiode bei den Varianten mit einem R-Wert größer als 0,15 a ist darin begründet, dass die Leistung der Wärmepumpe nicht entsprechend dem geringeren Heiz- und Kühlbedarf verringert wurde und dadurch größere Wärmeverluste durch eine häufigere Taktung der Wärmepumpe entstehen. Diese Wärmeverluste durch die häufigere Taktung können nur teilweise kompensiert durch eine höhere Eintrittstemperatur in den Verdampfer. Diese ergibt sich durch die geringeren abgerufenen Quellenleistungen und somit höhere Austrittstemperaturen sowohl aus dem Luft-Sole-Kollektor als auch aus dem Eisspeicher. Je größer R, desto seltener steht der Eisspeicher aufgrund des zu geringen SoC als Quelle außerdem nicht zur Verfügung. Die sehr hohe $JAZ_{Gen,Kühlen}$ für eine Wert von R = 0,59 ist darin begründet, dass die Eisspeicherkapazität von 75,6 MWh den Kühlbedarf von ca. 31,5 MWh/a deutlich übersteigt und der Kühlbedarf damit fast vollständig durch die natürliche Kühlung gedeckt werden kann. Für die Varianten mit R = 0,3 a wird deutlich, dass sich hier die Wahl der Beladegrenze praktisch nur auf die Arbeitszahl für den Kühlbetrieb auswirkt. Die Arbeitszahl für den Heizbetrieb bleibt unverändert. Durch den deutlich größeren Heizwärmebedarf wirkt sich dieser deutlich stärker auf die gesamte Jahresarbeitszahl aus als der kühlenergiebedarf. Dadurch ist die JAZ_{Gen} deutlich näher an der $JAZ_{Gen,Heizen}$ als die $JAZ_{Gen,Kühlen}$. Die oben beschriebene Co-Simulation mittels TRSYS und MATLAB sowie MATLAB/Simulink erfordert einen hohen Rechen- und damit auch Zeitaufwand. Zur Untersuchung z. B. der Optimierungsansätze für die Systemregelung (Abschnitt 5.4) oder der Anwendbarkeit des Systems auf Bestandsgebäude und andere Gebäudetypen (Abschnitt 6.1) war teils eine große Anzahl an Simulationen notwendig. Deshalb wurde an diesen Stellen die Systemsimulation unter Verwendung der vereinfachten Systemregelung verwendet. Zur Untersuchung dieser Fragestellungen wird die Verwendung der vereinfachten Regelung als ausreichend eingeschätzt.

Diese Annahme basiert vor allem darauf, dass der elektrische Energiebedarf der Wärmepumpe für die Kühlung mittels vereinfachter Regelung ähnlich auf eine Veränderung der Beladegrenze reagiert wie unter Verwendung der Standardregelung (Abbildung 4-46).

Zur Einordnung der späteren Ergebnisse sind in Abbildung 4-44 die Ergebnisse der Systemsimulation mittels der vereinfachten Regelung für die Randbedingungen der in Abbildung 4-41

dargestellten Ergebnisse aufgeführt. Zur Vergleichbarkeit wurde der gleiche anfängliche Beladungszustand des Eisspeichers verwendet. Der saisonale Verlauf des Beladungszustands mittels vereinfachter Regelung ist in Abbildung 4-45 dargestellt. Mittels vereinfachter Regelung wird der Eisspeicher weniger stark für die Wärmebereitstellung genutzt und damit entladen. Dies wird vor allem im Dezember deutlich. Ebenso gelingt es mittel vereinfachter Regelung im Vergleich zur Standardregelung nicht so gut auf den LSK als Wärmequelle zuzugreifen. Dies ist vor allem auf den in der Standardregelung priorisierten und sehr effizienten Mischbetrieb unter Verwendung des Quellenmischers zurückzuführen. Resultierend ist der mittels vereinfachter Regelung (TRNSYS) benötigte elektrische Energiebedarf für die Wärmepumpe um ca. 40 % größer als bei Verwendung der Standardregelung (TRNSYS / MATLAB / SIMULINK).

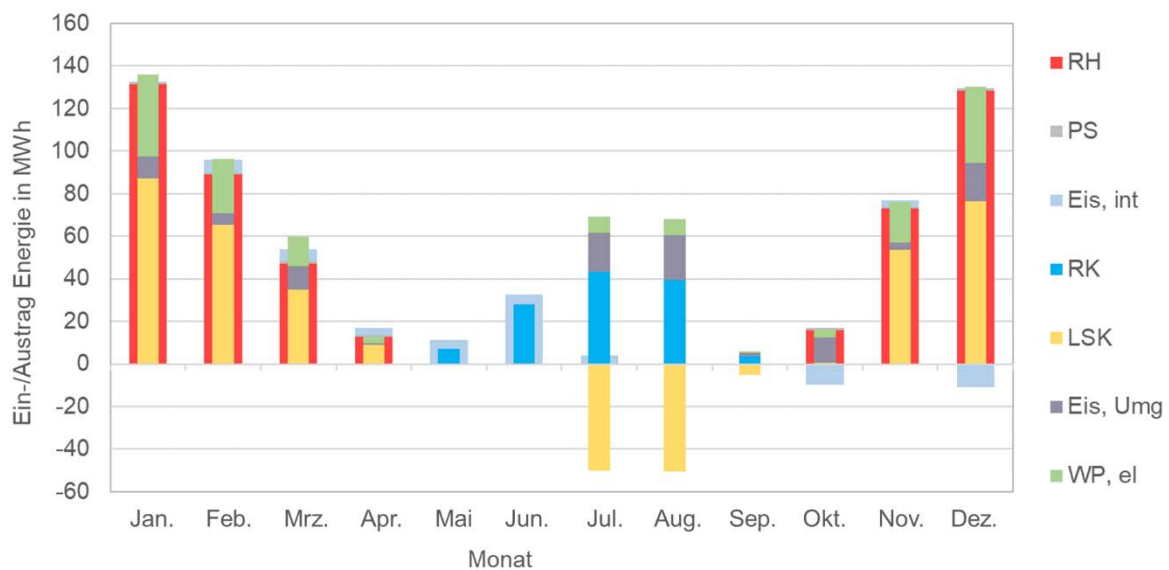


Abbildung 4-44: Mittels Anlagensimulation unter Verwendung der **vereinfachten Regelung (TRNSYS)** ermittelte Energie-Einträge (positive schmale Balken oder negative breite Balken) und Energie-Austräge (positive breite oder negative schmale Balken) über ein Jahr. RH: Raumheizung, PS: Pufferspeicher, Eis: Eisspeicher (int: interne Energieänderung, Umg: thermische Umweltgewinne), RK: Raumkühlung, LSK: thermischer Ertrag bzw. Wärmeabgabe aus Luft-Sole-Kollektor, WP,el.: elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpen.

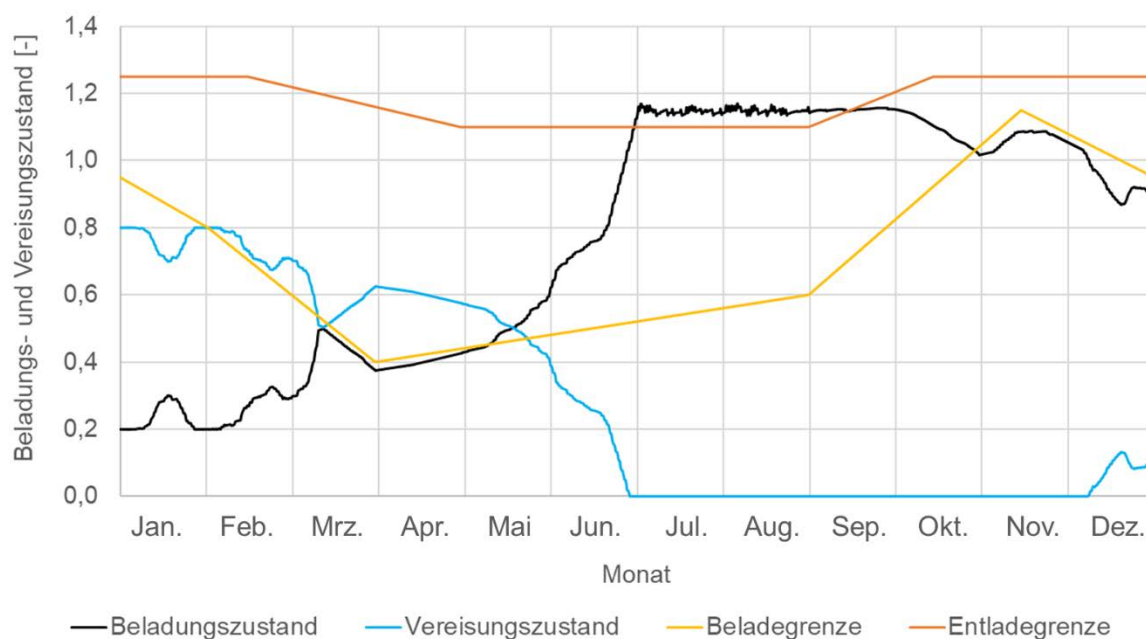


Abbildung 4-45: Saisonaler Verlauf des Beladungszustands bzw. „State of Charge“ (SoC) für ein Verhältnis der Wärmekapazität des Eisspeichers zum Heizenergiebedarf von $R = 0,15 \alpha$ unter Verwendung der vereinfachten Regelung (TRNSYS).

Wesentlich für die Nutzung der Simulation unter Verwendung der vereinfachten Regelung für die in Abschnitt 5.4.2 durchgeführten Parametrierstudie als Basis einer adaptiven Regelungsstrategie ist die Änderung des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe bei Veränderung der Beladegrenze. Ziel ist die Einsparung der zur aktiven Kühlung benötigten elektrischen Energie durch die möglichst weitestgehende Entladung des Eisspeichers zu Beginn der Kühlperiode. Zum Vergleich sind in Abbildung 4-46 der monatliche elektrische Energiebedarf der Wärmepumpe und der mittlere monatliche Beladungszustand des Eisspeichers für die Simulationsmodelle mit Standardregelung (Std) sowie der vereinfachten Regelung (TRN) für die beiden Beladegrenzen BG1 und BG2 aus Abbildung 4-43 dargestellt. Hier wird deutlich, dass ein frühzeitigeres Vereisen des Eisspeichers (BG2) unter Verwendung beider Regelungen zu einer Absenkung des Beladungszustands des Eisspeichers zu Beginn der Kühlperiode führt. Für beide Regelungen führt dies auch zu einer Einsparung des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe bei der Kältebereitstellung. Durch die effizientere Nutzung und stärkere Vereisung des Eisspeichers zu Beginn der Kühlperiode ist dieser Effekt unter Verwendung der Standardregelung größer, ist aber auch unter Verwendung der vereinfachten Regelung (TRN) deutlich erkennbar.

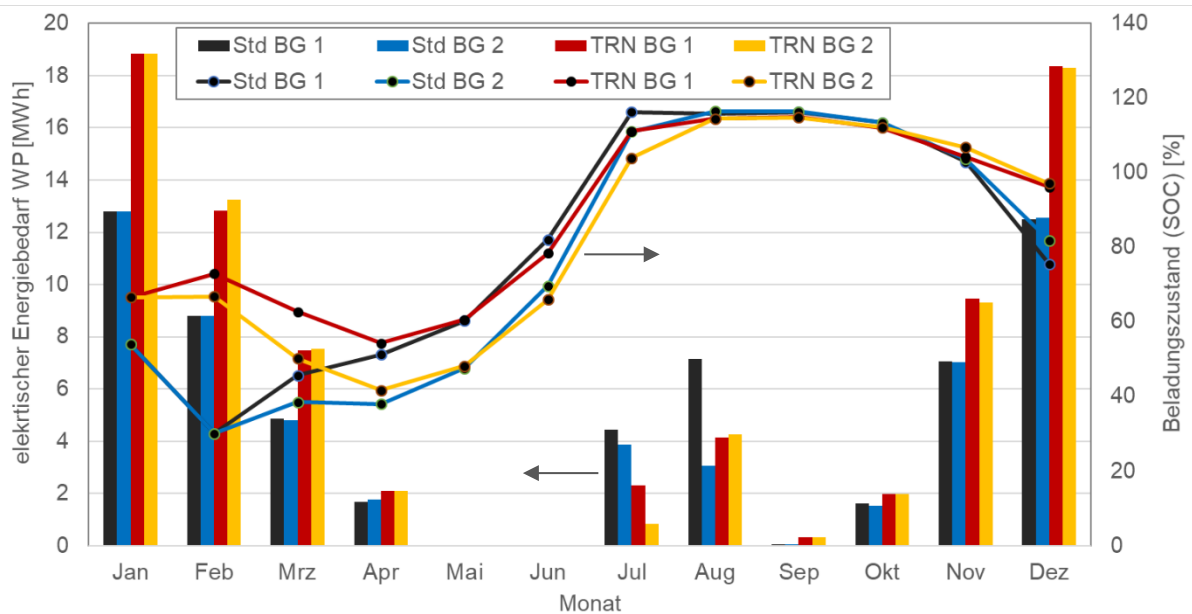


Abbildung 4-46: Monatlicher elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpe unter Verwendung der Standardregelung („Std“) sowie der vereinfachten Regelung („TRN“) und zwei unterschiedlichen Belagegrenzen (BG1 und BG2 aus Abbildung 4-43.)

4.5.6.2 Konzeptlösung 8

Bei der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Konzeptlösung (KL) 8 (siehe Abbildung 4-6) wird die Wärmeversorgung der Gebäude wie bei KL 6 durch dezentrale Wärmepumpen gewährleistet, die mittels eines kalten Wärmenetzes von einem zentralen PVT-Kollektorfeld versorgt werden. Das PVT-Kollektorfeld wird im Folgenden wieder als Luft-Sole-Kollektor oder LSK bezeichnet. Der Unterschied zur oben beschriebenen Konzeptlösung 6 besteht darin, dass in KL 8 kein Eisspeicher verwendet wird. Die mittels LSK gewonnen Umweltwärme wird direkt mittels Netz zu den dezentralen Wärmepumpen transportiert.

Zum Vergleich der beiden Konzeptlösung wurde die in Abschnitt 4.5.2 beschriebene Anlage 2 analog zur KL 6 ohne Eisspeicher als KL 8 in der Simulationsumgebung abgebildet. Dabei wurde für beide Konzeptlösungen die vereinfachte Regelung verwendet. Die Ergebnisse der Anlagensimulation für KL 6 sind in Abbildung 4-47 dargestellt. Die Ergebnisse der vergleichbaren Anlage mit Eisspeicher sind in Abbildung 4-41 enthalten.

Der jährliche elektrische Energiebedarf für die Wärmepumpe zur Wärme- und Kältebereitstellung beträgt für die KL 8 (ohne Eisspeicher) 166,4 MWh/a. Zum Vergleich beträgt der elektrische Energiebedarf für die WP für die gleiche Anlage mit Eisspeicher (KL 6) 155,5 MWh/a. Der Eisspeicher reduziert den elektrischen Energiebedarf damit um ca. 6,6 %. Diese Einsparung ist durch die mittels des Eisspeichers aus der Umgebung gewonnene thermische Energie sowie die durch die natürliche Kühlung eingesparte elektrische Energie zur Gebäudekühlung zu erklären. Der Vergleich zwischen KL 6 und KL 8 erfolgt hier unter Verwendung der vereinfachten Regelung. Da die real verwendete Standardregelung den Eisspeicher deutlich effizienter nutzt als die vereinfachte Regelung dies tut (vgl. Abbildung 4-41 und Abbildung 4-47) ist

davon auszugehen, dass der hier ermittelte Vorteil durch den Eisspeicher eine konservative Abschätzung darstellt und die reale Einsparung elektrischer Energie größer ist.

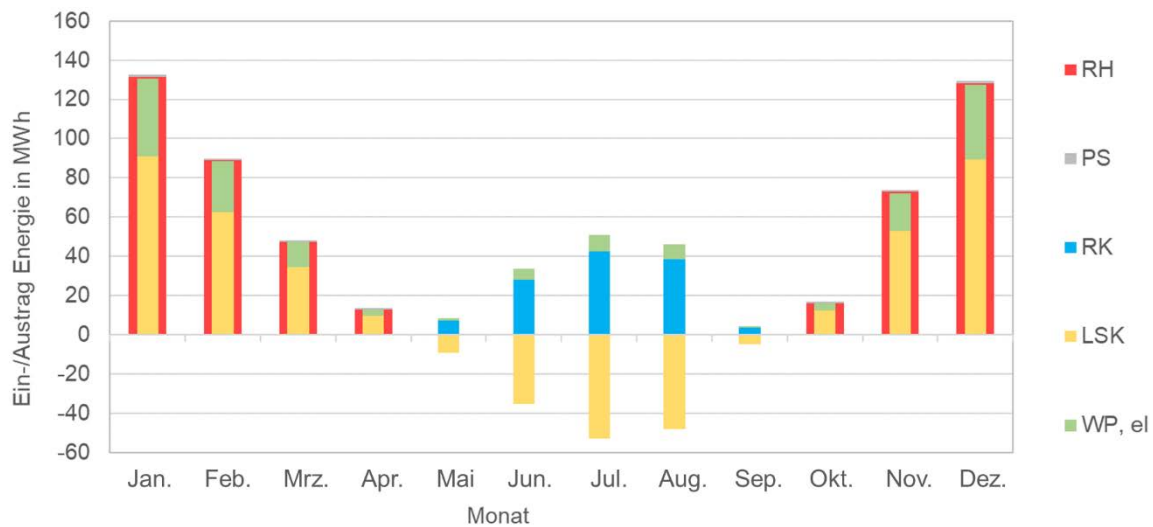


Abbildung 4-47: Mittels Anlagensimulation unter Verwendung der vereinfachten Regelung (TRNSYS) für die Konzeptlösung 8 ermittelte Energie-Einträge (positive schmale Balken oder negative breite Balken) und Energie-Austräge (positive breite oder negative schmale Balken) über ein Jahr. RH: Raumheizung, PS: Pufferspeicher, Eis: Eisspeicher (int: interne Energieänderung, Umg: thermische Umweltgewinne), RK: Raumkühlung, LSK: thermischer Ertrag bzw. Wärmeabgabe aus Luft-Sole-Kollektor, WP, el.: elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpen.

4.5.6.3 Verwendung hocheffizienter Wärmedämmung

Die Verwendung einer hocheffizienten Wärmedämmung sowohl für den Warm- und Kaltwasserspeicher wurde ebenfalls anhand der vereinfachten Regelung in TRNSYS auf das Einsparpotential hin untersucht. Die Randbedingungen für die Systemsimulationen mit hocheffizienter Wärmedämmung sind bzgl. der Randbedingungen mit denen für die übliche Wärmedämmung aus Abbildung 4-44 und Abbildung 4-45 vergleichbar. Sie unterscheiden sich nur durch die Wärmeverlustrate von Warm- und Kaltwasserspeicher. In den oben beschriebenen Ergebnissen wurde für die Warm- und Kaltwasserspeicher jeweils mit einem Volumen von 1.500 L eine Wärmeverlustrate von 6,88 W/K verwendet. Für Warm- und Kaltwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung wurde gemäß den Ergebnissen aus Abschnitt 2.1 eine Wärmeverlustrate von 1,92 W/K verwendet.

Abbildung 4-48 zeigt die monatlichen zu- und abgeführten Wärmemengen bei Verwendung einer hocheffizienten Wärmedämmung. Im Vergleich zur Verwendung einer üblichen Wärmedämmung ergeben sich hierbei erwartungsgemäß keine grundsätzlichen Änderungen. Der gesamtjährliche elektrische Energiebedarf für die Wärmepumpe kann im Vergleich zur Verwendung einer üblichen Wärmedämmung aber von 155,5 MWh/a auf 154,5 MWh/a gesenkt werden. Hinsichtlich des saisonalen Verlaufs des Beladungszustands des Eisspeichers ergeben sich gegenüber der Verwendung einer üblichen Wärmedämmung erwartungsgemäß ebenso keine grundsätzlichen Änderungen.

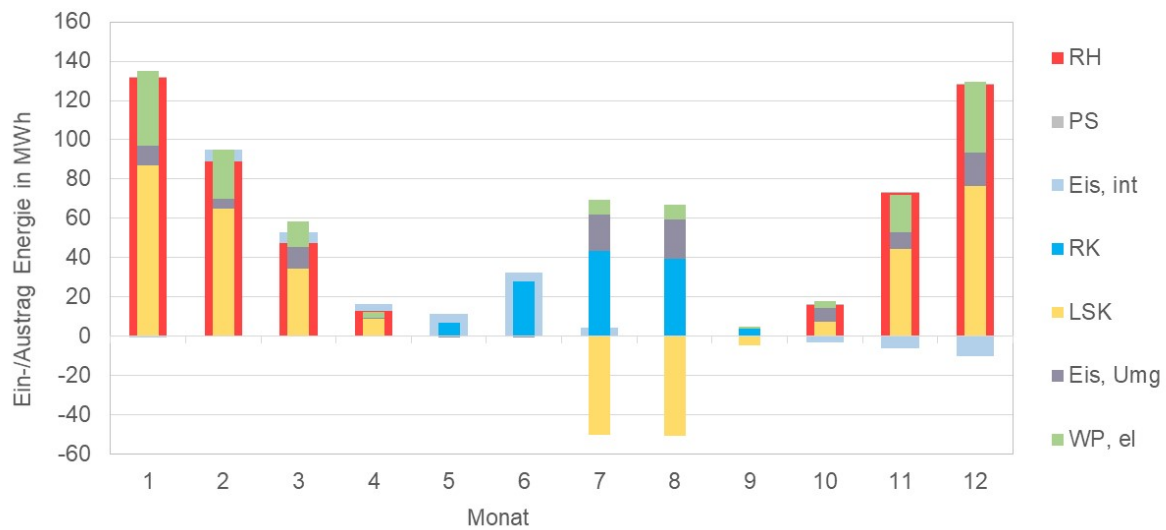


Abbildung 4-48: Mittels Anlagensimulation unter Verwendung der vereinfachten Regelung (TRNSYS) und hocheffizienter Wärmedämmung für Warm- und Kaltwasserspeicher ermittelte Energie-Einträge (positive schmale Balken oder negative breite Balken) und Energie-Austräge (positive breite oder negative schmale Balken) über ein Jahr. RH: Raumheizung, PS: Pufferspeicher, Eis: Eisspeicher (int: interne Energieänderung, Umg: thermische Umweltgewinne), RK: Raumkühlung, LSK: thermischer Ertrag bzw. Wärmeabgabe aus Luft-Sole-Kollektor, WP,el.: elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpen.

Der Einsatz einer hocheffektiven Wärmedämmung reduziert damit den notwendigen Wärmebedarf zur Bereitstellung der Raumheizungswärme um ca. 1 %.

5. Interaktive, adaptive und prädiktive Systemregelung (AP5)

Die Entwicklung einer adaptiven und prädiktiven Systemregelung erfolgte in den in den folgenden Kapiteln beschriebenen Schritten. Zunächst wurden für die Regelaufgaben aller zentralen Systemkomponenten, wie Wärmepumpe, Sonnenkollektoren, PV-Module, Energiespeicher, Anergienetz und ggf. Elektrofahrzeuge definiert. Diese Definitionen sind in Kapitel 5.1 zusammengefasst. Zusätzlich wurde ein Pflichtenheft für die Systemregelung erstellt (vgl. Kapitel 5.2), um die Anforderungen an den Systemregler zu definieren. Auf Basis der oben genannten Vorarbeiten wurden, wie in Kapitel 5.3 beschrieben, entsprechende Regelalgorithmen entwickelt und in den Systemregler implementiert. Diese wurden in einem nachfolgenden Schritt optimiert (Kapitel 5.4). Die Überprüfung und somit synthetische Validierung der korrekten Funktionsweise der Betriebsmodi erfolgte durch Anlagensimulation (vgl. Kapitel 5.5).

5.1 Definition der komponentenspezifischen Regelaufgaben und Schnittstellen

Die in diesem Arbeitspaket zu definierenden Regelaufgaben umfassen sämtliche zentralen Komponenten wie z.B. PV-Module, Sonnenkollektoren, hocheffizienter Warmwasserspeicher, Latentspeicher, Anergienetz, Stromspeicher, Wärmepumpe und ggf. Elektrofahrzeuge.

Die Festlegungen erfolgten zusammen mit den österreichischen Projektpartnern, so dass sich weitgehend alle in „Sol4City“ betrachteten Komponenten wiederfinden und die Schnittstellen einheitlich bleiben.

Für die Definition der komponentenspezifischen Regelaufgaben wird das Gesamtsystem in einzelne, weitgehend autonome Gruppen aufgeteilt. Die Grenze einer Gruppe wird so gewählt, dass die Schnittstelle zur nächsten Gruppe möglichst einheitlich und auf wenige Daten bzw. Übergabewerte begrenzt ist. Die Kriterien für die Bestimmung der Grenze sind:

- Sicherheitsfunktionen für die Geräte bleiben innerhalb der Gruppe
- Die Geräte oder Komponenten innerhalb der Gruppe sind austauschbar (Bsp. Pumpe Hersteller A gegen Pumpe Hersteller B)
- Komponenten sind klar einer Gruppe zugeordnet.

In Tabelle 5-1 sind alle Komponenten bzw. Komponentengruppen aufgeführt, für die Regelaufgaben und Schnittstellen definiert werden mussten. Ebenso ist dort die Zuständigkeit der Bearbeitung durch die Projektpartner gekennzeichnet.

Tabelle 5-1: Komponenten(gruppen) sowie die Zuständigkeit der Bearbeitung im Projekt

Komponenten(gruppen)	Zuständigkeit der Bearbeitung
Energieerzeuger	
Wärmepumpe, Details siehe Anhang A	VCS
PV-System (Module, Wechselrichter)	Kioto
Solarthermie-System (ST-Kollektor, Pumpen, WT)	Sonnenkraft
PVT-System (ST-Kollektor, Pumpen, WT)	Sonnenkraft
thermische Energiespeicher	
Vakuum gedämmte Wärmespeicher	IGTE
Sorptive Wärmespeicher	AEE
Eisspeicher	IGTE
Bauteilaktivierung	AEE
elektrische Systeme	
Stationäre Batterie / Batteriewechselrichter	Kreisel
Ladestationen (E-Mobilität)	Kreisel
E-Mobilität	Kreisel
Verbraucher	
Heizkreise und Kühlkreise	VCS
Frischwassermodul	Sonnenkraft
Haushaltsstrom	AEE
Gebäude (Komfort)	
Lüftung	AEE
Verschattungseinrichtung	AEE

Tabelle 5-2 gibt eine Übersicht über die Control Level, die den unterschiedlichen Komponenten bzw. Komponentengruppen zugeordnet werden. In Tabelle 5-3 - Tabelle 5-5 werden die Control Level für Energieerzeuger, Heiz- und Kühlkreise sowie thermische Energiespeicher erläutert. Details zu den Geräteschnittstellen der einzelnen Komponenten sind am Beispiel der Wärmepumpe in Anhang A dargestellt.

Tabelle 5-2: Definition der Control Level

Kürzel	Name	Erklärung
C1	Basic Control	Minimaler Umfang an Datenpunkten
C2	Standard Control	Nutzt die Standardfunktionen der Komponente
C2+	Standard Control+	Standard Control mit Kommunikationsbus
C3	Control and basic analytics	Integration der Fehlermeldungen der Komponente und Basis-Analysen
C4	Full Integration	Volle Integration der Komponente für Regelung, Analysen und Optimierung

Tabelle 5-3: Control-Level für Energieerzeuger

Control-Level für Energieerzeuger	
C1	<ul style="list-style-type: none"> On/Off Ansteuerung
C2	<ul style="list-style-type: none"> Features des C1 Level Leistungsvorgabe und / oder Soll-Temperatur Betriebsmeldung Störungsmeldung (Sammelstörung)
C2+	<ul style="list-style-type: none"> Features von C2 auch über Kommunikationsbus Daten für Visualisierung
C3	<ul style="list-style-type: none"> Features des C2 Level Detaillierte Alarm- und Fehlersignale Detaillierte Information über den Betrieb (alle erfassten Temperaturen, Soll-Temperatur / Soll-Leistung, Betriebssignale der einzelnen Komponenten im Energieerzeuger)
C4	<ul style="list-style-type: none"> Features des C3 Level Datenpunkte für Diagnose (Reglerzustände, Ein- und Ausgangssignale, interne Sollwerte) Parameter für Optimierung (Bsp. Einsatzgrenzen, Wirkungsgrad)

Tabelle 5-4: Control-Level für Heizkreise und Kühlkreise

Control-Level für Heizkreise und Kühlkreise	
C1	<ul style="list-style-type: none"> • Ein/Aus der Versorgung (Ein/Aus der Pumpe) • Umschalten Heizen / Kühlen (wenn beide Betriebsarten möglich)
C2	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatursensor Vorlauf • Drehzahlvorgabe der Pumpe (wenn vorhanden auch Konstantdruck oder Proportionaldruck) • Soll-Position des Mischers oder von Klappen (wenn vorhanden) • Störmeldung der Pumpe
C2+	<ul style="list-style-type: none"> • Features von C2 auch über Kommunikationsbus
C3	<ul style="list-style-type: none"> • Features des C2 Level • Temperatursensor Rücklauf • Detaillierte Fehlerliste der Pumpe • Betriebsmeldung der Pumpe • Rückmeldung der Position des Mischers • Rückmeldung der Position von Klappen und Ventilen (wenn vorhanden)
C4	<ul style="list-style-type: none"> • Features des C3 Level • Volumenstrom der Pumpe (aus Pumpendaten oder separate Messung) • Aktuelle Wärmeleistung

Tabelle 5-5: Control-Level für thermische Energiespeicher

Control-Level für thermische Energiespeicher	
C1	<ul style="list-style-type: none"> • Ein Temperatursensor
C2	<ul style="list-style-type: none"> • Features des C1 Level • Mehrere Temperatursensoren über die Höhe verteilt (abhängig vom Speichervolumen 4 bis 20 Stück)
C2+	<ul style="list-style-type: none"> • Features von C2 auch über Kommunikationsbus
C3	<ul style="list-style-type: none"> • Features des C2 Level • Detaillierte Betriebs-Information (Temperaturen an den Anschlüssen)
C4	<ul style="list-style-type: none"> • Features des C3 Level • Datenpunkte für Diagnose (Durchflussmengen an den Anschlüssen)

5.2 Erstellung Pflichtenheft Systemregelung

Die 28 für die Eignung als Versuchsanlage detaillierter untersuchten Anlagen (siehe Kapitel 4.1.4) wurden hinsichtlich ihrer umgesetzten Betriebsarten untersucht und eingeordnet. Die Betriebsarten einer Eisspeicheranlage sind beispielsweise:

- Heizen mit der Wärmepumpe, Quelle ist der Eisspeicher („Entzugsbetrieb“)
- Heizen mit der Wärmepumpe, Quelle ist der Solarabsorber („Absorber-Direktbetrieb“)
- Heizen mit der Wärmepumpe, Quellen sind Solarabsorber und Eisspeicher („Mischbetrieb“)
- Heizen mit der Wärmepumpe, Quelle ist die Kälteversorgung des Gebäudes („AC-Dualbetrieb“)
- Beheizung des Eisspeichers durch den Solarabsorber („Regenerationsbetrieb“)
- Kälteversorgung des Gebäudes mit der Kälte des Eises des Eisspeichers („NC-Betrieb“)
- Kälteversorgung durch die Wärmepumpe, Restwärme wird an die Umgebung abgegeben („AC-Betrieb“)

Weitere Anforderungen an die Regelungstechnik und Hydraulik einer Einzelanlage sind:

- Ausgewählte Betriebsarten müssen gleichzeitig möglich sein, beispielsweise „Heizen mit der Wärmepumpe“ und „Kälteversorgung des Gebäudes“
- Die Kälteerzeugung durch die Wärmepumpe soll im Eisspeicher zwischengepuffert werden, wenn das Gebäude die aktuelle Kälteleistung nicht vollständig aufnehmen kann.
- Eine Prognose über den jährlichen Verlauf des Beladungszustands des Eisspeichers muss möglich sein. Sie ist die Basis für die Entscheidung für den Heizbetrieb aus Solarabsorber oder Eisspeicher.
- Zu Beginn der Kühlperiode soll der Eisspeicher durch die Entladung im Heizbetrieb eine optimale Vereisung erreicht haben, d. h. er soll beispielsweise zu 70 % vereist sein.

Lösungen, die die oben genannten Anforderungen erfüllen, wurden erarbeitet (vgl. Kapitel 4.3).

Die parallel zur Versuchsanlage aufgebaute Simulationsumgebung sowie die Auswertung der Messdaten der Anlage 2 geben Aufschluss über die Energieeffizienz und Optimierungsmöglichkeiten.

Die Anlage hat folgende weitere Besonderheiten, die auf die Optimierung und die Regelungstechnik einen Einfluss haben:

- Die Stromerzeugung der PVT-Kollektoren soll möglichst direkt für die Gebäudebeheizung und die Warmwasserbereitung genutzt werden
- Der Energiebedarf der dezentralen Warmwasserbereitung mit elektrischen Durchlauferhitzern muss in ausreichend hoher Zeitauflösung erfasst und für die Optimierung der Eigenstromnutzung der Regelung als Momentwerte zur Verfügung gestellt werden.

- Die Beheizung und die Kühlung erfolgen wohnungsweise über eine Baukernaktivierung. Ein abwechselnder Heiz- und Kühlbetrieb innerhalb von Stunden oder weniger Tage ist bei diesem sehr trägen Wärmeverteilsystem aus Effizienzgründen zu vermeiden. Ein Lösungsansatz besteht daher in der Integration einer Wetterprognose und einer daraus abgeleiteten Prognose der Raumtemperaturen.
- Die Heiz- und Kälteleistung wird wohnungsweise gemessen und muss der Regelung für die Optimierung in ausreichender Zeitauflösung bereitgestellt werden.
- Für das Forschungsvorhaben sollen Eisspeicher, Wärmepumpe und PVT Kollektor bezüglich ihrer elektrischen und thermischen Energiebilanz gemessen werden. Diese Daten werden ebenfalls in ausreichend hoher Zeitauflösung für die Optimierung des Gesamtenergieversorgungssystems benötigt.
- Die Wettermesstechnik erfasst Außentemperatur, Luftfeuchte, Windgeschwindigkeit, Windrichtung und Solarstrahlung. Diese Daten werden sowohl für die Charakterisierung des PVT-Kollektors als auch für die Optimierung der Anlage mit modellprädiktiven Verfahren benötigt.

Das Pflichtenheft „Systemregelung“ dient als Basis für die Weiterentwicklung der im Projekt Sol4City zu entwickelnden und zu implementierenden Regelalgorithmen.

Der neu zu entwickelnde Regler soll viele Anforderungen erfüllen:

- Hohe Jahres-Energieeffizienz der Anlage
- Umsetzung der Anforderungen der Verbraucher hinsichtlich Heizen und Kühlen
- Keine Betriebssituation zulassen, die Einzelkomponenten schädigt
- Leicht erweiterbare Schnittstelle für Algorithmen der Funktionsüberwachung
- Beachtung der Eigenschaften aller Energiequellen, d. h. PVT-Kollektoren, Solarabsorber und Luft-Sole-Wärmeübertrager
- Hydraulisch unabhängig, Möglichkeit zur kundenspezifischen Anpassung
- Integration von Testmöglichkeiten in den unterschiedlichen Entwicklungsschritten vom Konzept bis zur realisierten Anlage auf der Baustelle
- Integration von Komponenten der unterschiedlichen Control-Level (C1 bis C4)
- Manuelle Ansteuerung und Sperre von bestimmten Betriebssituationen für Inbetriebnahme und Wartung
- Reaktion auf externe Anforderungen, beispielsweise separate Steuerung der Wärmepumpen oder Heiz-Kühlkreise
- Externe Vorgabe von Sollwerten oder Betriebssituationen beispielsweise einer prädiktiven Regelung (siehe folgendes Kapitel)

Anmerkung: Die oben aufgeführten Anforderungen stellen eine grundsätzliche Erweiterung des bisherigen Reglers für Eisspeicheranlagen dar. Die vor Projektstart des Vorhabens

Sol4City umgesetzten Regelungsfunktionen konnten nur auf Basis von Momentanwerten zwischen Solarabsorber und Eisspeicher umschalten. Ebenso wurde der Kühlbetrieb komplett unabhängig zugeschaltet. Weitere o.g. Anforderungen insbesondere im Hinblick auf eine hohe Energieeffizienz über das gesamte Jahre wurden nicht erfüllt.

Der Systemregler soll durch verschiedene Betriebsmodi eine in Abhängigkeit vom Lastzustand und meteorologischen Bedingungen eine optimale Nutzung sowohl des Luft-Sole-Kollektors als auch des im Erdreich installierten Eisspeichers ermöglichen. Vorrangiges Ziel ist die Einbindung eines maximalen Anteils von Umgebungswärme. Die beiden Wärmequellen werden daher derart angesteuert, dass sich eine optimale Jahres-Arbeitszahl der Wärmepumpe einstellt.

Der Systemregler übernimmt alle Funktionen zum Betrieb des Eisspeicher- und das Management der Wärmequellen. Das Ziel ist die Bestimmung des Betriebsmodus, der zur maximalen Jahreseffizienz führt, ohne andere Anforderungen zu verletzen. Diese Bestimmung erfolgt in einem neuentwickelten Zustandsautomaten und stellt den Kern der Regelung dar, der die vorausgeschaltete Sicherheitskette und Vorberechnungen mit dem nachgelagerten Aktorenhandling verbindet. Unter Aktorenhandling ist der Prozess der Übersetzung des Betriebsmodus in Aktorenstellungen und -sollwerte anhand einer hydraulisch angepassten Zuordnungsmatrix mit anschließender Umsetzung durch Regler zu verstehen. Der Zustandsautomat und die konkrete Umsetzung des Betriebsmodus in einer spezifischen Anlage werden somit unabhängig.

Das entwickelte Regelverhalten zur Bestimmung des notwendigen Betriebsmodus wurde mit Hilfe eines Zustandsautomaten in MATLAB -Simulink Stateflow [94] implementiert. Durch eine eigens aufgebaute Testumgebung mit Hilfe des Carnot-Blocksets [69] konnte die Entwicklung durch parallele Prüfung abgesichert werden. Dazu wurden verschiedene Testszenarien durch Definition von Zeitprofilen mit zugehörigen Erwartungen generiert, die nach Simulation automatisiert durch einen Vergleich der Ausgabe des Zustandsautomaten (Ist-Wert) und der Erwartung (Soll-Wert) geprüft wurden.

Der Zustandsautomat unterstützt einen Heiz- und Kühlbetrieb sowie eine Vorkonditionierung des Eisspeichers und eine Rückkühlung. Vorkonditionierung bezeichnet hierbei Maßnahmen zur Erhöhung oder Erniedrigung des Beladungszustandes des Eisspeichers, um einen stetigen Heiz- und Kühlbetrieb zu gewährleisten.

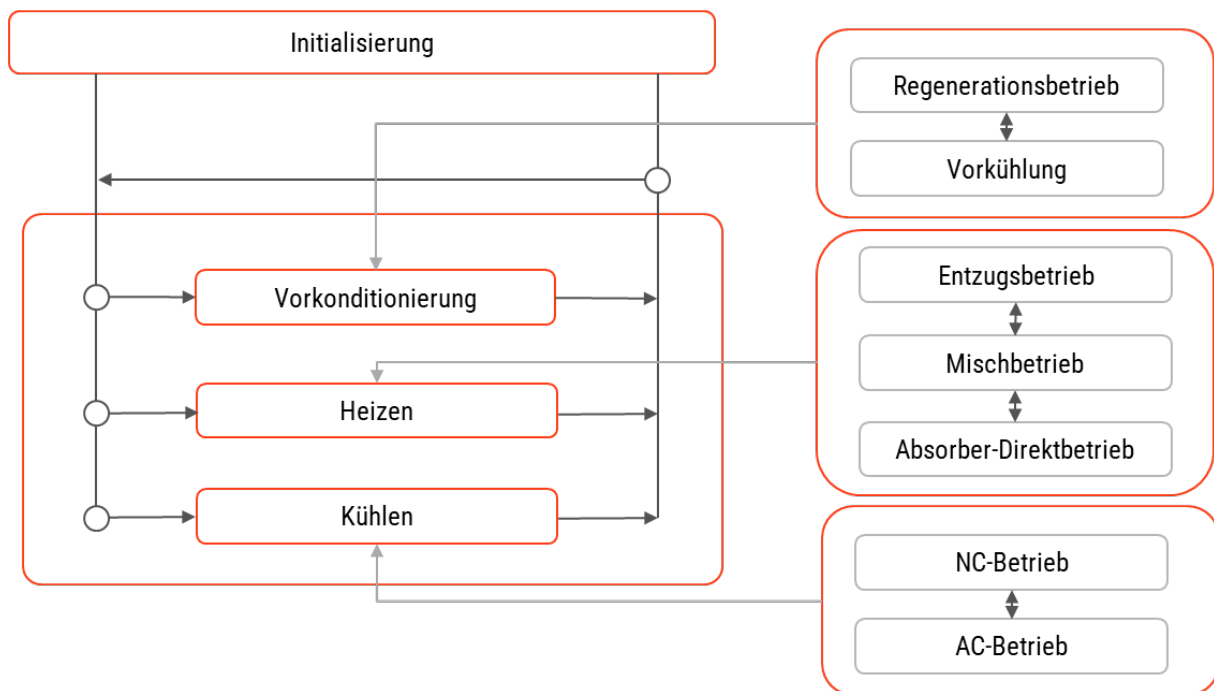


Abbildung 5-1: Zustandsautomat mit den wichtigsten Betriebszuständen des Quellenmanagements.

Der Heizbetrieb umfasst die Betriebsmodi Entzugs-, Misch- und Absorber-Direktbetrieb. Der Entzugsbetrieb führt zu ausschließlicher Nutzung des Eisspeichers, während der Absorber-Direktbetrieb eine ausschließliche Nutzung des Solar-Absorber als Energiequelle vorsieht. Durch den Mischbetrieb aus beiden Quellen wird die zur Verfügung stehende regenerative Energie maximal genutzt. Der Regenerationsbetrieb führt zu einer Erwärmung des Eisspeichers für den Heizbetrieb, während die Vorkühlung eine Abkühlung ermöglichen, damit der Eisspeicher stetig genügend Kühlenergie in der Kühlperiode bereitstellen kann. Heiz- und Eisspeicher-Vorkonditionierungsbetrieb werden eigenständig durch ein Konzept basierend auf dem Beladungszustand aktiviert. Die Ansteuerung des Kühlbetriebs mit den Betriebsmodi natürliche (NC) - und aktive Kühlung (AC) erfolgt durch das Management der Verbraucherkreise. Insbesondere bei Gebäuden mit hohem Kältebedarf oder wenn eine Kälteversorgung kontinuierlich also 24/7, sichergestellt werden muss, kann ein Rückkühler zur sicheren Restwärmeabfuhr bei sommerlichen Temperaturen erforderlich sein. Eine Restwärmeabgabe an die Umgebung ist auch mit den Solarabsorbern, z.B. dem Typ Charger, möglich. Die Absorber Typ Charger werden bisher jedoch im Schwerpunkt für die Wärmegewinnung und nur ergänzend zur Wärmeabfuhr eingesetzt. Durch die hohen Temperaturen der Absorber bei solarer Einstrahlung ist die Wärmeabfuhr zu diesen Zeiten nicht möglich. Ein zuverlässiger Kühlbetrieb erfordert ein ausreichendes Vorkühlen des Eisspeichers in der Nacht oder die Installation eines Rückkühlers.

Generell liegt der Fokus der Anlagennutzung auf der doppelten Nutzung des Wärmepumpenbetriebs, heißt der Kältenutzung und der Wärmenutzung und Zwischenspeicherung der

Wärme und Kälte z.B. im Eisspeicher. Liegt ein höherer Wärmebedarf vor, so ist ein Solarabsorber zur Wärmegewinnung vorteilhaft, bei höherem Kältebedarf die effiziente Wärmeabfuhr mit einem Rückkühler. Aus den Anforderungen an die Anlage und dem Wärme- und Kältebedarf ergibt sich somit die Auswahl des insgesamt effizienteren Wärmeaustauschelements mit der Umgebung und dessen Einbindung in der Regelung.

Für die Versuchsanlagen wurde die Hydraulik für alle Betriebsarten fertig gestellt. In der Systemregelung sind alle Betriebsarten im Zustandsautomat abgebildet sowie alle zugehörigen Regelungsfunktionen implementiert.

5.3 Entwicklung der Regelalgorithmen und Implementierung in Systemregler

Die grundsätzlichen Regelaufgaben für die Komponenten sowie für das Gesamtsystem sind in Abschnitt 5.1 und 5.2 beschrieben. Diese Regeaufgaben wurden von der Firma VCS im Rahmen des Projektes in einer Systemregelung zusammengefasst und in der Simulationsumgebung wie in 5.2 beschrieben in MATLAB/Simulink implementiert. Sie basiert auf einem Zustandsautomaten, der abhängig von den aktuellen Anforderungen und dem Anlagenstatus einen passenden von mehr als 15 zur Verfügung stehenden Betriebsmodi auswählt.

Die grundsätzlichen Regelaufgaben werden im Folgenden anhand der Konzeptlösung 6 beschrieben. Die Regelfunktionen sind aber identisch für die anderen Konzeptlösungen, sofern sie über die notwendigen Komponenten verfügen.

Bei der in Abschnitt 4.3 beschriebenen Konzeptlösung 6 (siehe Abbildung 4-7) wird die Wärmeversorgung der Gebäude durch dezentrale Wärmepumpen gewährleistet, die mittels eines kalten Wärmenetzes von einem zentralen PVT-Kollektorfeld und einem zentralen Eisspeicher versorgt werden. Das PVT-Kollektorfeld wird im Folgenden auch als Luft-Sole-Kollektor oder LSK bezeichnet.

Im Winter wird der Eisspeicher zur Wärmebereitstellung genutzt und dabei entladen bzw. vereist. Im Sommer wird der Eisspeicher zur Kühlung der Gebäude genutzt und dabei regeneriert, d. h. beladen. Das Nahwärmenetz wird ausschließlich zur Bereitstellung von Wärme und Kälte zur Gebäudetemperierung verwendet. Das Trinkwarmwasser wird diesem Beispiel elektrisch im Durchlauf bereit. Ein vereinfachtes Hydraulikschema der Konzeptlösung 6 ist in Abbildung 5-2 abgebildet, eine ausführlichere Darstellung der Hydraulik ist in Abbildung 4-20 in 4.5.2.1 dargestellt.

Zur Gebäudebeheizung wird das geringe Temperaturniveau des Nahwärmenetzes, in Orange dargestellte Hydraulik in Abbildung 5-2, durch die dezentralen Wärmepumpen auf ein höheres Temperaturniveau angehoben und den nachgeschalteten Pufferspeichern zugeführt; in Rot dargestellte Hydraulik in Abbildung 5-2. Der Wärmebedarf für die Raumheizung in den Gebäuden wird dann von den Pufferspeichern aus bereitgestellt. Der Eisspeicher und der Luft-Sole-Kollektor können entweder einzeln oder auch gleichzeitig als Wärmequellen für die Wärmepumpen genutzt werden (nicht in Abbildung 5-2 dargestellt). Für jeden dieser Fälle ist ein ent-

sprechender Betriebsmodus, hier Entzugsbetrieb, Absorberbetrieb und Mischbetrieb, vorhanden. Dabei wird der Mischbetrieb priorisiert. Der Entzugsbetrieb wird nur verwendet, wenn Misch- und Absorberbetrieb nicht verwendet werden können. Der Eisspeicher wird mittels des Luft-Sole-Kollektors im Regenerationsbetrieb beladen bzw. regeneriert; grün dargestellte Hydraulik in Abbildung 5-2.

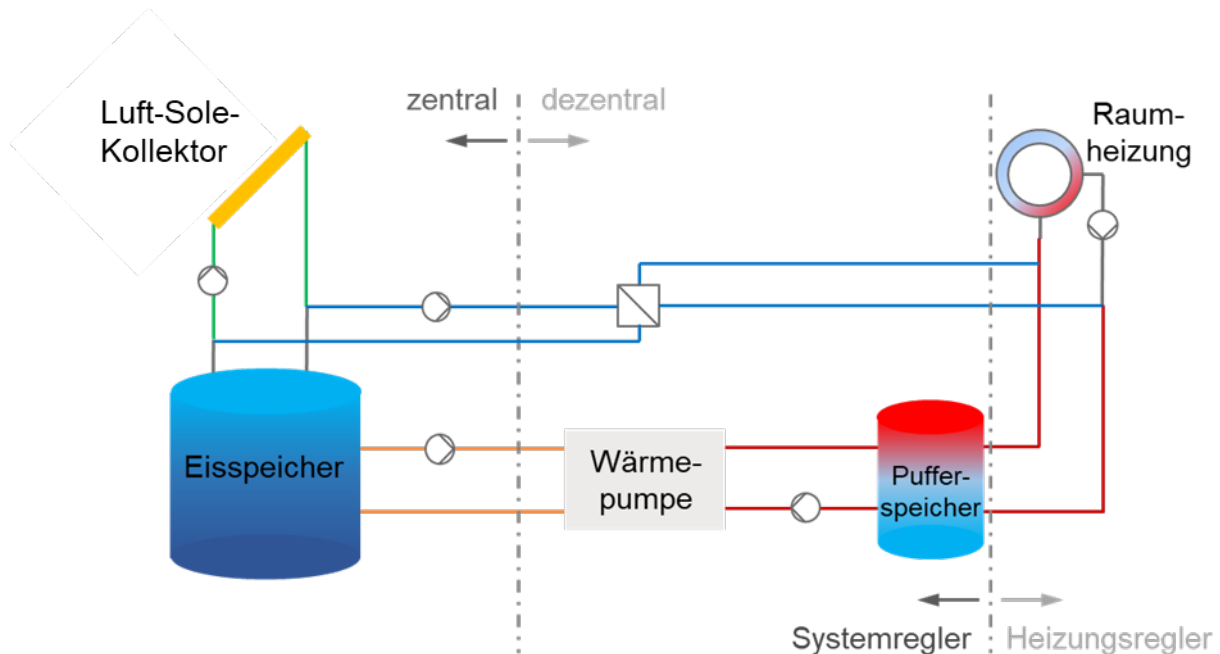


Abbildung 5-2: Vereinfachtes Hydraulikschema einer Wärme- und Kälteversorgung auf Basis der Konzeptlösung 6 mit einem kalten Nahwärmenetz mit zentralem Eisspeicher und Luft-Sole-Kollektor sowie dezentralen Wärmepumpen in den Gebäuden; ein detailliertes Schema ist in Abbildung 4-20 dargestellt.

Zur Kühlung der Gebäude im Sommer stehen analog zum Heizbetrieb verschiedene Betriebsarten des Nahwärmenetzes zur Verfügung. Die direkte Beladung, d. h. die Regeneration des Eisspeichers durch die Gebäude wird dabei als natürliche Kühlung bezeichnet (blau dargestellte Hydraulik in Abbildung 5-2). Ist die natürliche Kühlung aufgrund eines zu hohen Temperaturniveaus im Eisspeicher nicht mehr möglich, kann die sog. aktive Kühlung verwendet werden (nicht in Abbildung 5-2 dargestellt). Hierbei werden die Wärmepumpen zur Kühlung genutzt. Die bei der aktiven Kühlung entstehende überschüssige Wärme wird dabei über den Luft-Sole-Kollektor an die Umgebung abgeführt. Analog zur aktiven Gebäudekühlung kann der Eisspeicher im Sommer mit der sogenannten aktiven Vorkühlung für den natürlichen Kühlbetrieb mittels Wärmepumpe aktiv entladen werden. Die Regelung der Raumheizung bzw. -kühlung erfolgt über separate Zweipunktregler.

Die wichtigsten, bereits zuvor erwähnten, Betriebsarten bzw. Betriebsmodi sind in Tabelle 5-6 aufgeführt. So stehen z. B. zur Beladung des Pufferspeichers durch die Wärmepumpe die Betriebsmodi „Entzugs-Betrieb“, „Mischbetrieb“ und „Absorber-Direktbetrieb“ zur Verfügung. Als Beispiel für die Ansteuerung der Aktoren durch den Zustandsautomaten ist das Ansteuerungssignal für die Wärmepumpen (an/aus) dargestellt.

Tabelle 5-6: Betriebsarten (Betriebsmodus) des Zustandsautomaten, die als Standardregelung für die Konzeptlösung 6 dient. Die Nummerierung dient der Ansprache der Betriebsmodi innerhalb der Simulation.

Betriebsmodus	Nr.	Zweck	Ansteuerung Wärmepumpen
Entzugs-Betrieb	2	Heizbetrieb mit Eisspeicher als Wärmequelle	an
Misch-Betrieb	3	Heizbetrieb gleichzeitig mit Eisspeicher und Luft-Sole-Kollektor als Wärmequellen	an
Absorber-Direktbetrieb	4	Heizbetrieb mit Luft-Sole-Kollektor als Wärmequelle	an
Regenerationsbetrieb	5	Beladen des Eisspeichers durch Luft-Sole-Kollektor	aus
Aktive Vorkühlung Eisspeicher	7	Wärmeentzug aus dem Eisspeicher (Entladen) durch Wärmepumpen und Abgabe der Überschusswärme durch Luft-Sole-Kollektor an die Umgebung	an
Natürliche Kühlung	8	Kühlen der Gebäude durch Beladen bzw. Regenerieren des Eisspeichers	aus
Aktive Kühlung	12	Kühlen der Gebäude durch Wärmepumpen mit Wärmeabgabe über Luft-Sole-Kollektor	an

Der meistverwendete Betriebsmodus ist der Mischbetrieb. Dabei soll sowohl möglichst viel Umweltwärme genutzt werden und gleichzeitig die Wärmepumpe effizient betrieben werden. Zur Sicherstellung dieser beiden Anforderungen teilt der sogenannte Quellenmischer den Netzmassenstrom zwischen LSK und Eisspeicher so auf, dass die Temperatur des wieder zusammengemischten Netzmassenstroms am Eintritt der Wärmepumpen innerhalb eines festgelegten Bereichs liegt. Der erforderliche Temperaturbereich erstreckt sich von einer minimalen Soll-Eintrittstemperatur in den Verdampfer, der sogenannten „Hochhaltung“ bis hin zu einer maximalen Soll-Eintrittstemperatur in den Verdampfer, der sogenannten „Tiefhaltung“. Der LSK wird dabei im Mischbetrieb als Wärmequelle priorisiert. Können die Temperaturgrenzen der Hoch- bzw. Tiefhaltung mit den Kollektoren als Wärmequelle nicht eingehalten werden, wird mittels des Quellenmischers nur so viel thermische Energie von der Wärmequelle Eisspeicher entnommen, dass die entsprechende Soll-Eintrittstemperatur in den Verdampfer erreicht wird. Dadurch wird der Eisspeicher bewusst nur als sekundäre Wärmequelle verwendet, um unnötig große Speichervolumina bzw. eine zu starke Entladung zu vermeiden. Der Quellenmischer befindet sich hydraulisch auf der Primär- bzw. Verdampferseite der Wärmepumpe. Da der Mischbetrieb die priorisierte Betriebsweise des Systems ist, ist die Implementierung

des Quellenmischers und seines Reglers (als PID-Regler ausgeführt) wesentlich für die korrekte Abbildung des Betriebsverhaltens der realen Versuchsanlagen und damit auch wesentlich für aussagekräftige Simulationsergebnisse. In Abbildung 5-3 ist das Betriebsverhalten des Quellenmischers in Form der Ein- und Austrittstemperaturen der Wärmequellen sowie der zugehörige Betriebsmodus dargestellt. Hier wird die Solltemperatur am Eintritt der Wärmepumpe aufgrund zu geringer Quellenleistung nicht erreicht. Bei ausreichender Quellenleistung kann die Eintrittstemperatur der WÜ aber bei min. -4 °C gehalten werden.

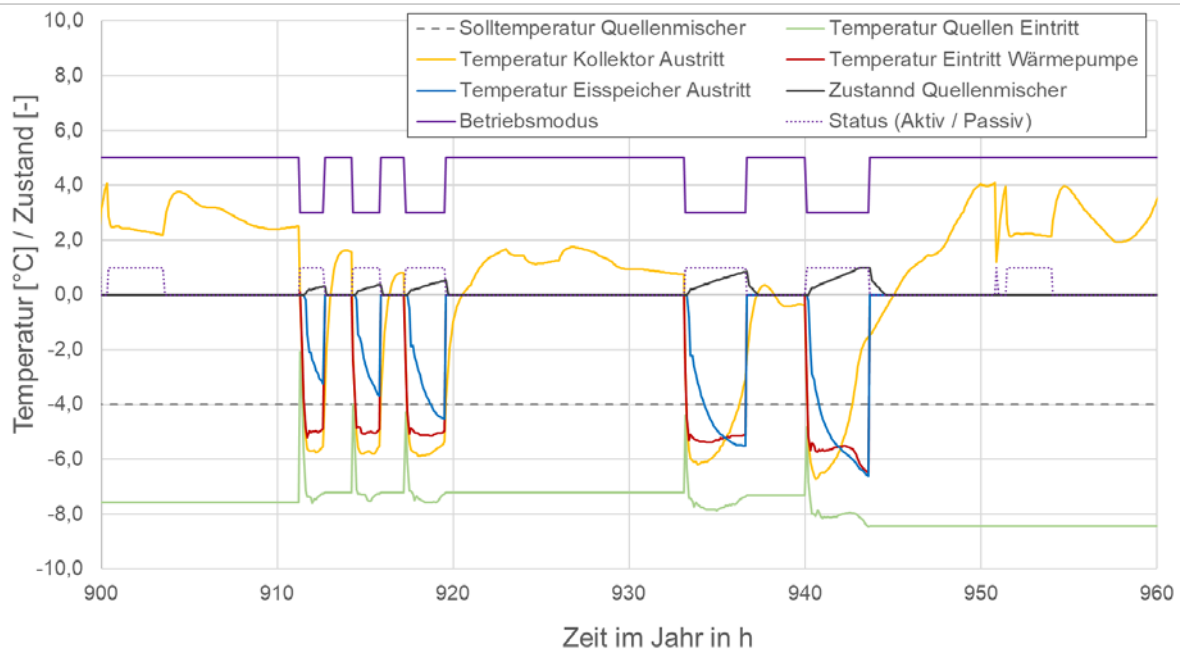


Abbildung 5-3: Temperaturen der am Ein- und Austritt der Wärmequellen sowie Mischtemperatur am Eintritt der Wärmepumpe und Betriebsmodus inkl. Status (aktiv/passiv) sowie der Zustand des Quellenmischers (Volumenstrom über 0: SLK, 1: Eisspeicher).

Da der Eisspeicher als saisonaler thermischer Energiespeicher zum Heizen und Kühlen genutzt werden soll, ist es zweckmäßig, wenn er zu Beginn der Heizperiode möglichst vollständig beladen bzw. eisfrei und zu Beginn der Kühlperiode möglichst vollständig entladen bzw. vereist ist. Um den Beladungszustand oder auch „State of Charge“ (SoC) des Eisspeichers aktiv zu beeinflussen wird dieser als messbare Kenngröße definiert. Er nimmt den Wert 0 an bei vollständiger Vereisung und den Wert 1 bzw. 100 % in vollständig flüssigem Zustand bei 0 °C . Eine detaillierte Definition des Beladungszustands befindet sich in Abschnitt 2.6.1.1.

Der Beladungszustand wird verwendet, um den Beladungszustand des Eisspeichers innerhalb definierter Grenzen zu halten, die Be- und die Entladegrenze. Über- oder unterschreitet der Beladungszustand eine Grenze werden von der Regelung gezielt diejenigen Betriebsmodi ausgewählt, die Eis im Eisspeicher auf- bzw. abbauen. Steigt der Beladungszustand des Eisspeichers im Frühjahr z. B. über die Beladegrenze (blaue Kurve in Abbildung 5-4), so wird bei einer Heizanforderung der Entzugsbetrieb vor den anderen möglichen Betriebsmodi (Mischbetrieb oder Absorberbetrieb) priorisiert um den Eisspeicher gezielt zu entladen und somit für den Kühlbetrieb mittels natürlicher Kühlung (Betriebsmodus 8 in Tabelle 5-6) vorzubereiten bzw. Vorkonditionieren. Diese Vorkonditionierung ist definiert durch einen Anfangszeitpunkt

und die Dauer, wie in Abbildung 5-4 dargestellt. Die Be- und Entladegrenze bilden den Ansatz für den in Abschnitt 5.4.2 beschriebenen adaptiven Regelungsstrategie.

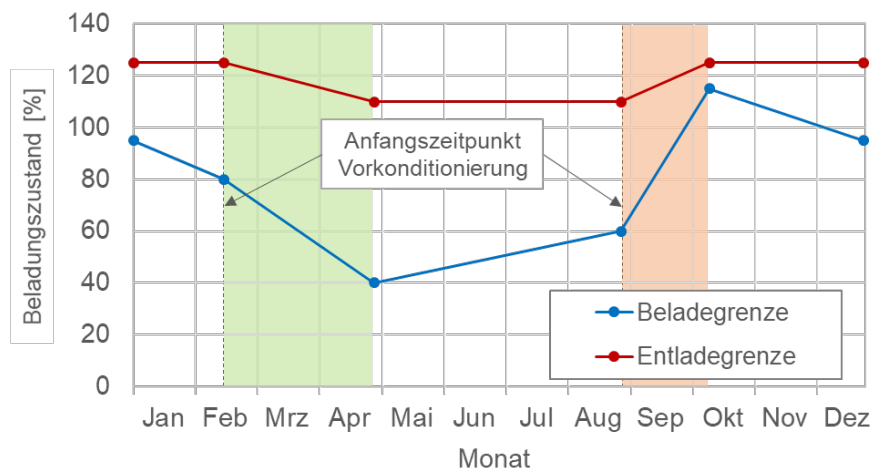


Abbildung 5-4: Saisonaler Verlauf der Grenzen für die Beladung (Beladegrenze: blau) und die Entladung (Entladegrenze: rot) des Eisspeichers zur Vorkonditionierung des Eisspeichers vor der Kühlperiode (grüner Bereich) und vor der Heizperiode (roter Bereich).

Die Prüfung des eingebetteten Regelkonzepts in den SPS-basierten Systemregler Vitocontrol (siehe AP 5.2) wurde mittels HIL (Hardware in the Loop) Tests durchgeführt.

Die Eingänge des am Prüfstand installierten Systemreglers wurden dabei mit Sensordaten aus einem in MATLAB Simulink modellierten Energiesystem beaufschlagt. Das Energiesystem beinhaltet die nachgebildete Quellenanlage aus Eisspeicher, regenerative Energiequelle, Wärmepumpe und Pufferspeicher sowie ein Gebäudemodell, welches die Verbraucherkreise simuliert. Die Quellenanlage bildet den Hydraulikplan für Eisspeicheranlagen ab. Die Ausgänge des Systemreglers, insbesondere die Stellsignale für Aktoren, werden dem numerisch modellierten Energiesystem zurückgegeben.

Die korrekte Ansteuerung von Aktoren wie Mischer, Pumpen und Ventilen sowie die korrekte Wahl des Betriebsmodus wurde unter Echtzeitbedingungen und gezielter Herbeiführung kritischer Betriebssituationen geprüft. Die in AP 5.2 definierten Anforderungen an das implementierte Quellenmanagement konnten erfolgreich validiert werden.

Dabei halfen die Erkenntnisse aus den Versuchsanlagen bei der weiteren Optimierung der Ansteuerung der Aktoren.

Das Ziel der entwickelten Schutzfunktion ist eine hinreichend lange Laufzeit und die Vermeidung einer kurzen, taktenden Betriebsweise insbesondere von Wärmepumpen mit Ein/Aus-Regelung oder festen Leistungsstufen im Falle einer geringen Lastabnahme oder niedrigen Kühlsolltemperaturen. Zur Umsetzung der Anforderungen wurden zwei weitere Regler mit dynamischer Sollwertführung implementiert, welche auf den Quellenmischer wirken und zu einem ergänzenden Wärmeentzug aus dem Eisspeicher, zur Verringerung der Kühlleistung am Entzugswärmeübertrager sorgen. Durch die Reduktion der Entzugs- bzw. Kühlleistung wird eine Hochhaltung der primärseitigen Eintrittstemperatur am Entzugswärmeübertrager ermög-

licht. Neben einer Laufzeitverlängerung der Wärmepumpe wird eine Absicherung gegen Frostgefahr erzielt. Das implementierte Konzept der Restwärmeumschaltung umfasst die Option, die im AC-Betrieb anfallende Restwärme vor Abfuhr über die regenerative Energiequelle, zur Aufheizung des Heizwasser-Pufferspeichers bis zum anliegenden Temperatursollwert, zu verwerten.

Weiterhin wurde der Betriebsmodus duale natürliche Kühlung (kurz, Dual NC: Natural Cooling), in welchem der parallele Heizbetrieb ehemals als Mischbetrieb umgesetzt wurde, in die Modi natürliche Kühlung mit Entzugs-, Misch- und Absorber-Direktbetrieb separiert. Mit der vorgenommenen Aufteilung entscheidet der Zustandsautomat analog zum reinen Heizbetrieb unter Beachtung der Beladungsgrenzen und der Verfügbarkeit der Modi über die Wahl der Wärmequelle und die Freigabe des Reglers für den Quellenmischer. Durch den Betriebsmodus natürliche Kühlung mit Entzugsbetrieb kann der Vereisungszustand des Eisspeichers in Abhängigkeit von der Parametrierung über die Kühlperiode gezielt gesteigert respektive gehalten werden. Diese Aufteilung dient vor allem in Anlagen ohne Option AC als zusätzliche Maßnahme zur Gewährleistung der Betriebsbereitschaft des Eisspeichers zur natürlichen Kühlung.

Die beschriebene Erweiterung des Zustandsautomaten wurde unter Herbeiführung kritischer Betriebssituationen geprüft. Die entwickelte Schutzfunktion der Wärmepumpe konnte durch gezielte Fehldimensionierungen, wie ein zu klein dimensionierter Entzugswärmeübertrager und Kühlpuffer, sowie Kühlkreise ohne Pufferspeicher, mit der daraus resultierenden geringen Lastabnahme bei gleichzeitiger Variation der eingesetzten Wärmepumpenleistung abgesichert werden.

5.4 Optimierung der Regelalgorithmen

Zur Optimierung der Regelalgorithmen wird im Folgenden die in Abschnitt 4.3 beschriebene Konzeptlösung (KL) 6 in Form der Anlage 1 verwendet da hier bereits Simulationsergebnisse unter Verwendung der Standardregelung al Vergleich zur Verfügung stehen. Die Anlage ist in Abschnitt 4.5.2. detailliert beschrieben. Die Ergebnisse der vorausgehenden Systemsimulationen zur Anlage unter Verwendung der Standardregelung sind in Abschnitt 4.5.6.1 beschrieben.

Ziel ist eine möglichst umfassende Optimierung der Systemregelung. Dabei stand bereits zu Anfang des Vorhabens der Ansatz einer modellprädiktiven Regelung (MPR) im Fokus. Dies ist ein häufig genutztes Optimierungsverfahren und wird in Abschnitt 5.4.1 detailliert beschrieben. Aufgrund begrenzter Vorhersagemöglichkeiten ist dieses Verfahren aber auf einen Zeitraum von wenigen Tagen beschränkt. Um saisonale Effekte wie den in Abschnitt 4.5.6.1 beschriebenen Einfluss des saisonalen Beladungszustands des Eisspeichers auf den gesamtjährlichen elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe abzubilden wird daher die MPR um einen adaptiven Regelanteil ergänzt. Diese Ergänzung des adaptiven Regelanteils ist in Abschnitt 5.4.1 näher beschrieben und Abbildung 5-5 in schematisch dargestellt.

5.4.1 Modellprädiktive Regelung (MPR)

Die Temperatur innerhalb von Gebäuden ist u. a. stark abhängig von Störfaktoren wie der Sonneneinstrahlung, der Umgebungslufttemperatur oder von internen Wärmequellen wie z. B. Haushaltsgeräte oder Personen. Heizungsregelungen berücksichtigen üblicherweise nur aktuelle Messgrößen wie z. B. die aktuelle Umgebungslufttemperatur oder die aktuelle Raumtemperatur. Modellprädiktive Regelungen (MPR) nutzen Vorhersagen, wie z. B. die Wettervorhersage, um die Störfaktoren bereits bei der aktuellen Regelentscheidung zu berücksichtigen. Dabei werden Simulationsmodelle verwendet, um das Anlagenverhalten in Abhängigkeit von den Regelentscheidungen sowie von den Vorhersagen für die Störfaktoren über den sogenannten Prädiktionshorizont hinweg zu bestimmen. Die Regelentscheidungen können dann mithilfe der Simulation so lange variiert werden, bis ein gewünschtes Anlagenverhalten bzw. Ziel erreicht ist. Dieses Ziel kann beispielsweise die Minimierung des Endenergiebedarfs über den betrachteten Prädiktionshorizont hinweg sein. Das gewünschte Anlagenverhalten wie z. B. das Halten von Raumtemperaturen innerhalb definierter Betriebsgrenzen kann dabei durch die Vorgabe von Randbedingungen gewährleistet werden. Damit ergibt sich mit Hilfe einer MPR die Möglichkeit durch Lastverschiebungen den Endenergiebedarf bei gleichbleibendem Komfort zu senken. Das bedeutet, dass durch die Berücksichtigung von vorhergesagten Störgrößen z. B. verhindert werden kann, dass Räume auf festgelegte Solltemperaturen aufgeheizt und kurz darauf durch Sonneneinstrahlung überhitzt werden. Auch lassen sich beispielsweise die Wärmeverluste von Wärmespeichern verringern, indem sie nur dann aufgeheizt werden, wenn Wärme tatsächlich benötigt wird. Aufgrund der eingeschränkten Zuverlässigkeit von z. B. längerfristigen Wettervorhersagen eignen sich MPR aber nur für kurzzeitige Lastverschiebungen von bis zu 10 Tagen.

Eine Optimierung für den Betrieb des Eisspeichers als Kernkomponente der Anlage erfordert aber aufgrund der großen thermischen Kapazität und des damit verbundenen saisonalen Verlaufs des Beladungszustands (siehe Abbildung 4-42) eine deutlich langfristige Strategie. Diese Optimierungsstrategie muss die saisonal unterschiedliche Zielsetzung der Eisspeicherverwendung berücksichtigen. Während der Eisspeicher in der Heizperiode als Wärmequelle für die Wärmepumpen dient, wird er wie in Abschnitt 5.3 beschrieben in der Kühlperiode als Wärmesenke verwendet. Als messbare Kenngröße für die Regelung des Eisspeicherzustands wird der in Abschnitt 5.3 beschriebene bzw. Abbildung 5-3 dargestellte Beladungszustand des Eisspeichers verwendet. Als Führungs- bzw. Steuergrößen werden die in Abschnitt 5.3 beschriebenen bzw. in Abbildung 5-4 dargestellten Be- und Entladegrenzen verwendet. Die Bestimmung der langfristig günstigsten Be- und Entladegrenzen ist in Abschnitt 5.4.2 beschrieben. Im Folgenden ist die Integration in die MPR dargestellt.

Das Ziel einer optimierten Betriebsführung bzw. Gesamtregelung ist die Minimierung des jährlichen Endenergiebedarfs der Anlage. Das bedeutet in der untersuchten KL 6 die Minimierung des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpen. Wie in Abschnitt 4.5.6.1 dargestellt kann eine kurzfristig vermeintlich ungünstigere Betriebsführung dabei langfristig eine günstigere Betriebsführung sein. Z. B. kann eine stärkere Nutzung des Entzugsbetriebs vor Beginn der Kühl-

periode durch geringere Quelltemperatur zu einer Verringerung der $JAZ_{Gen,Heizen}$ der Wärmepumpe in dieser Zeit führen. Durch eine stärkere Vereisung des Eisspeichers kann dadurch aber ggf. Antriebsenergie der WP zur aktiven Kühlung reduziert werden. Da das langfristige Regelziel außerhalb des Horizonts der MPR ist wird es hier ähnlich einer Randbedingung in die MPR integriert und damit faktisch priorisiert.

Die adaptive Regestrategie gibt dabei die günstigsten Grenzwerte des Beladungszustands für den Eisspeicher vor. Die Beladegrenzen gehen in die Zielfunktion der MPR ein und beeinflussen darüber das Regelverhalten der MPR bzw. der Gesamtregelung. Die Kombination aus adaptiver und prädiktiver Regelung ist in Abbildung 5-5 schematisch dargestellt. Um eine möglichst gute Optimierung zu erreichen, werden diese Grenzwerte wie die Sollwerte als stetige Funktionen in die Zielfunktion der MPR integriert.

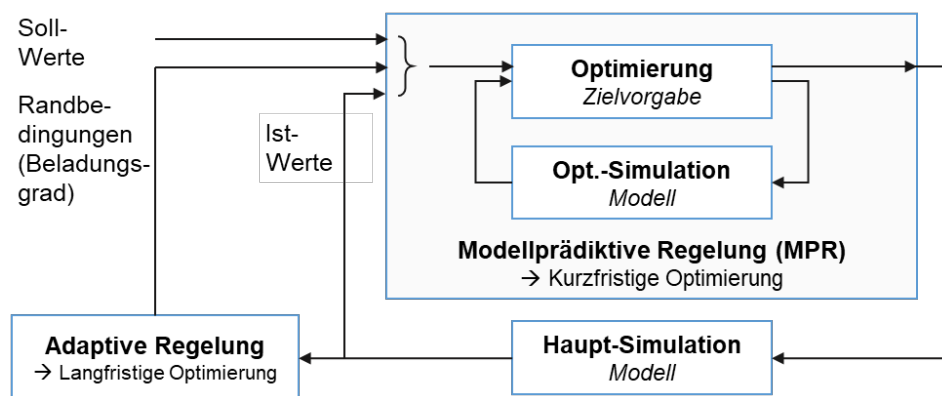


Abbildung 5-5: Verfahren der Anlagensimulationen unter Verwendung einer modellprädiktiven Regelung (MPR) inklusive einer adaptiven Regelung zur optimalen saisonalen Betriebsführung des Eisspeichers in einem kalten Nahwärmenetz zur Wärme- und Kälteversorgung.

Die Anlagensimulationen unter Verwendung der adaptiven und modellprädiktiven Regelung werden analog zur Anlagensimulation unter Verwendung der Standardregelung (mittels Zustandsautomat, siehe Abschnitt 4.5.6.1) mittels TRNSYS durchgeführt. Dabei wird ebenfalls die Anlage 1 verwendet und analog die Regelung der Raumheizung mittels Zweipunktregler durchgeführt. Die MPR wurde in MATLAB mit Hilfe eines genetischen Algorithmus zur Optimierung implementiert und mittels des TRNSYS Type 155 (TRNSYS-MATLAB-Schnittstelle) in die Anlagensimulation integriert.

Die MPR wird verwendet, um den zeitlichen Verlauf des Betriebsmodus zu berechnen, für den der elektrische Energiebedarf der Wärmepumpen möglichst gering ist. Der Betriebsmodusverlauf stellt die zeitliche Abfolge der unterschiedlichen Betriebsmodi dar, wobei zu jedem Zeit- bzw. Regelschritt von der Regelung nur je ein Betriebsmodus ausgewählt werden kann. So können z. B. der Entzugsbetrieb (siehe Nr. 2 in Tabelle 5-6) und der Regenerationsbetrieb (siehe Nr. 5 in Tabelle Tabelle 5-6) nur nacheinander, aber nicht gleichzeitig stattfinden. Die Menge der gewonnenen Umgebungswärme und Sonnenenergie soll dabei möglichst groß sein. Dazu werden Optimierungssimulationen mit Hilfe des Anlagenmodells in TRNSYS durchgeführt, welches auch für die Hauptsimulation des kalten Nahwärmenetzes verwendet wird.

Der Verlauf des Betriebsmodus über den Prädiktionshorizont (ca. 1 bis 3 Tage) hinweg wird bei jeder durchgeführten Optimierungssimulation variiert (vgl. Abbildung 5-5). Die Auswertung der Ergebnisse dieser Optimierungssimulationen erfolgt mittels der sogenannten Zielfunktion. In der Zielfunktion werden alle Energiemengen aufsummiert, die mittels der Regelung Einfluss auf das Anlagenverhalten nehmen sollen. Das Ergebnis der Zielfunktion „S“ ist ein Skalar, der wie in Gleichung (5-1) beispielhaft dargestellt berechnet wird:

$$S = \min \left(\begin{aligned} & E_1 \cdot \sum_{k=0}^{N_p} \left((E_2 \cdot Q_{el,k})^{E_3} \right) - F_1 \cdot \sum_{k=0}^{N_p} (Q_{\Delta T,k})^{F_2} \\ & + H \cdot \sum_{k=0}^{N_p} (Q_{renewable,k}) \\ & + I_1 \cdot \sum_{k=0}^{N_p} (I_2 \cdot Q_{PSloss,k})^{I_3} + J_1 \cdot \sum_{k=0}^{N_p} (J_2 \cdot Q_{\Delta SoC,k})^{J_3} \end{aligned} \right) \quad (5-1)$$

mit

S	Ergebniswert der Zielfunktion [kWh]
k	aktueller Zeitschritt im Prädiktionshorizont [-]
$Q_{el,k}$	elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpen [kWh]
$Q_{renewable,k}$	Ertrag an thermischer Umweltenergie, d. h. Umgebungswärme und Sonnenenergie [kWh]
$Q_{\Delta T,k}$	Differenz zwischen aktuell in den Räumen vorhandener Energiemenge und bei Solltemperatur in den Räumen vorhandener Energiemenge [kWh]
$Q_{PSloss,k}$	Wärmeverluste der dezentralen Pufferspeicher [kWh]
$Q_{\Delta SoC,k}$	Differenz zwischen aktueller Energiemenge und Energiemenge beim Sollwert des Beladungszustands [kWh]
E_i, F_i, H, I_i, J_i	Gewichtungsfaktoren für die elektrische Energie der WP (E_i), die Raumtemperatur (F_i), den Ertrag erneuerbarer Energien (H), die Warmhalteverluste des Pufferspeichers (I_i) und den Beladungszustand des Eisspeichers (J_i) [-]
N_p	Anzahl der Zeitschritte im Prädiktionshorizont [-]

Der Skalar als Zielfunktionswert wird dann durch einen genetischen Algorithmus (GA in MATLAB) minimiert. Ein großer positiver Wert des Skalars, der einem hohen Endenergiebedarf entspricht, wird von dem GA also als ein unerwünschtes Ergebnis interpretiert. Die Optimierung geschieht durch Wiederholung der Optimierungssimulation mit unterschiedlichen Betriebsmodus-Verläufen, bis der Zielfunktionswert „S“ ein Minimum erreicht.

Die Einhaltung der Soll- bzw. Grenzwerte als Randbedingungen wird ebenfalls durch ihre Integration in die Zielfunktion erreicht. Um die Lösungsfindung für den Algorithmus möglichst zu

erleichtern, werden sie dabei als stetige Funktion definiert. Die Abweichungen von den Sollwerten werden innerhalb der Zielfunktion grundsätzlich auch in Form von Energiemengen berücksichtigt. Dies gilt z. B. für die Abweichung der Raumlufttemperatur vom Sollwert oder die Abweichung vom zulässigen Beladungszustand des Eisspeichers. Dadurch wird die Verrechnung mit z. B. dem elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe vereinfacht und physikalisch grundsätzlich interpretierbar. Durch die Einführung von Gewichtungsfaktoren (siehe Gleichung (5-1)) kann das Verhalten der MPR angepasst werden, d. h. einzelne Komponenten bzw. Sollwerte in ihrer Relevanz für die Regelentscheidung vergrößert oder verringert werden. Dabei werden die für die restriktiven Beschränkungen berücksichtigten Energiemengen so quadriert bzw. potenziert (vgl. $Q^2_{\Delta T,k}$ in (5-1)), dass sehr hohe Zielfunktionsergebnisse geliefert werden, wenn sie von den Sollwerten abweichen (Voraussetzung: Differenz > 1), und sich dadurch de-facto restriktive Beschränkungen ergeben.

Zur Optimierung der Betriebsführung der Anlage durch die MPR wird, wie bereits erläutert, das für die eigentliche Simulation der Anlage (Haupt-Simulation in Abbildung 5-5) verwendete Modell auch zur Durchführung der Optimierungs-Simulationen verwendet. In TRNSYS müssen die Optimierungs-Simulationen als eigenständige Anlagensimulationen durchgeführt und entsprechend dem jeweiligen Anlagenzustand initialisiert werden, der zu Beginn des Prädiktionshorizonts in der Hauptsimulation herrscht. Bei dem in TRNSYS zur Verfügung stehenden Gebäudemodell (Type 56) kann allerdings nur die Raumlufttemperatur initialisiert werden, jedoch nicht die Temperaturen der Wände bzw. deren Einzelbestandteile. Dies kann zu hohen Abweichungen zwischen Raumlufttemperaturen während der Optimierungssimulation und während der Hauptsimulation führen. Diese Abweichung wird in Abbildung 5-6 durch die Differenz zwischen den Raumtemperaturen in der Hauptsimulation und der Optimierungssimulation („Opt.-Sim. ohne Einschwingzeit“) dargestellt.

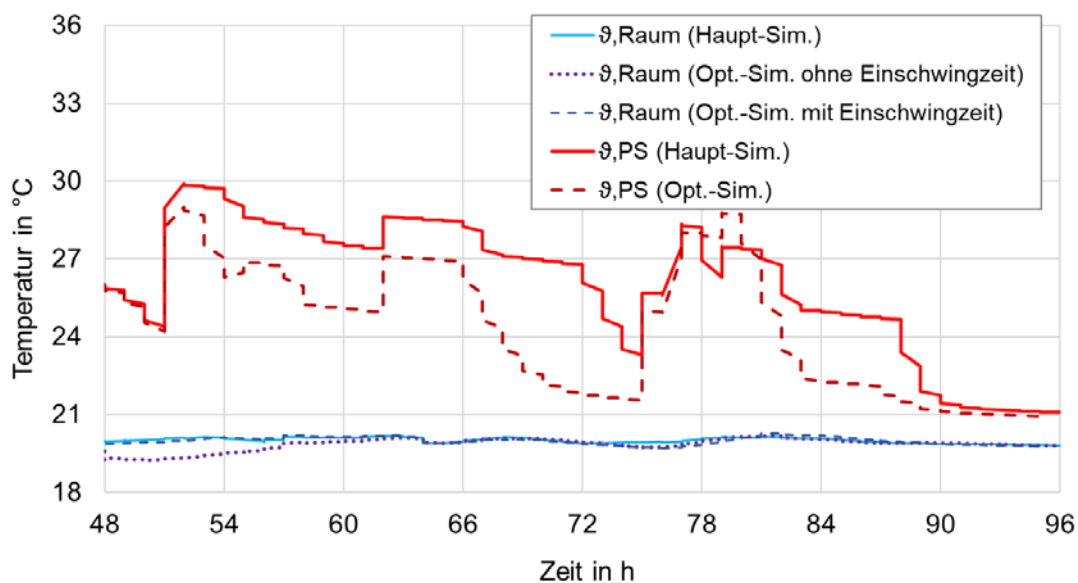


Abbildung 5-6: Vergleich zwischen Raumlufttemperatur (ϑ_{Raum}) und Pufferspeichertemperatur (ϑ_{PS}) während der Haupt- (Haupt-Sim.) und der Optimierungssimulation (Opt.-Sim.) sowie zwischen der Raumlufttemperatur mit und ohne „Einschwingzeit“.

Um zu Beginn der Optimierungssimulation dennoch möglichst den tatsächlichen Anlagenzustand während der Hauptsimulation abzubilden, wurde zur Quasi-Initialisierung eine sog. Einschwingzeit eingeführt. D. h. der Beginn der Optimierungs-Simulation liegt um die Dauer der Einschwingzeit vor dem Beginn des Prädiktionshorizonts. Während der Einschwingzeit wird der vorher ermittelte Betriebsmodusverlauf der Hauptsimulation verwendet. Es wird bei einem Prädiktionshorizont von 48 h eine Einschwingzeit von 48 Stunden als Kompromiss zwischen dem zusätzlichen Simulationsaufwand bzw. der dafür benötigten Rechenzeit und der Qualität der Initialisierung der Optimierungs-Simulation verwendet.

Abbildung 5-7 zeigt für eine Anlagensimulation mit MPR beispielhaft die Raumluft-, Umgebungsluft- und Pufferspeichertemperaturen sowie den Betriebsmodus, in dem sich die Anlage befindet, über den Zeitraum einer Heizperiode. Diese Ergebnisse zeigen, dass die MPR in der Lage ist, die Solltemperatur von 20 °C während des größten Teils der Heizperiode einzuhalten. Der Temperaturabfall in den Räumen 2 und 3 am Ende der Heizperiode ist auf einen hohen Temperaturanstieg in Raum 1 zurückzuführen. In der hier verwendeten Zielfunktion werden die Abweichungen der 3 Räume von den Solltemperaturen zunächst addiert und dann mit den Gewichtungsfaktoren verrechnet. Dadurch können Abweichungen von der Solltemperatur in einzelnen Räumen durch andere Räume ausgeglichen werden, ohne dass sie zu einem hohen Wert der Zielfunktion führen und dieses Verhalten damit „bestraft“ wird. Eine separate Gewichtung aller einzelnen Abweichungen der Raumtemperaturen vom Sollwert korrigiert dieses unerwünschte Verhalten.

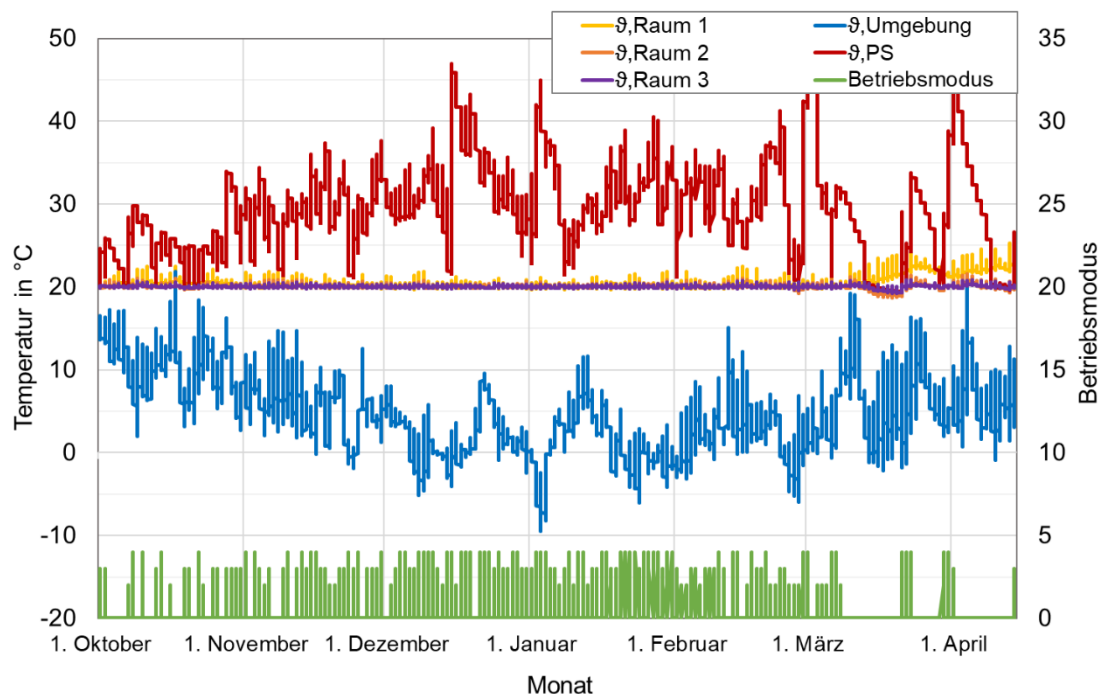


Abbildung 5-7: Raumluft- (ϑ ,Raum), Umgebungsluft- (ϑ ,Umgebung) und Pufferspeichertemperaturen (ϑ ,PS), ermittelt durch Anlagensimulationen unter Anwendung der modellprädiktiven Regelung (MPR) sowie der Verlauf des Betriebsmodus (siehe Tabelle 5-6) während der Heizperiode von Oktober bis April.

Durch die MPR werden Lastverschiebungen durchgeführt. So liegt die Pufferspeichertemperatur während der Wintermonate hauptsächlich zwischen 25 °C und 35 °C und erreicht nur bei sehr geringen Umgebungslufttemperaturen Werte von 40 °C oder höher (siehe Abbildung 5-7). Der Pufferspeicher wird also nur dann aufgeheizt, wenn ein erhöhter Wärmebedarf prognostiziert wird. In Abbildung 5-8 ist dieses Verhalten an Tag 5 gut zu beobachten, wenn der Pufferspeicher in der ersten Tageshälfte auf über 40 °C aufgeheizt wird (1), aber die Umgebungslufttemperatur erst in der zweiten Tageshälfte abfällt (2) und der Heizbedarf steigt. Die modellprädiktive Regelung nutzt also die Flexibilität des Systems zur Lastverschiebung aus.

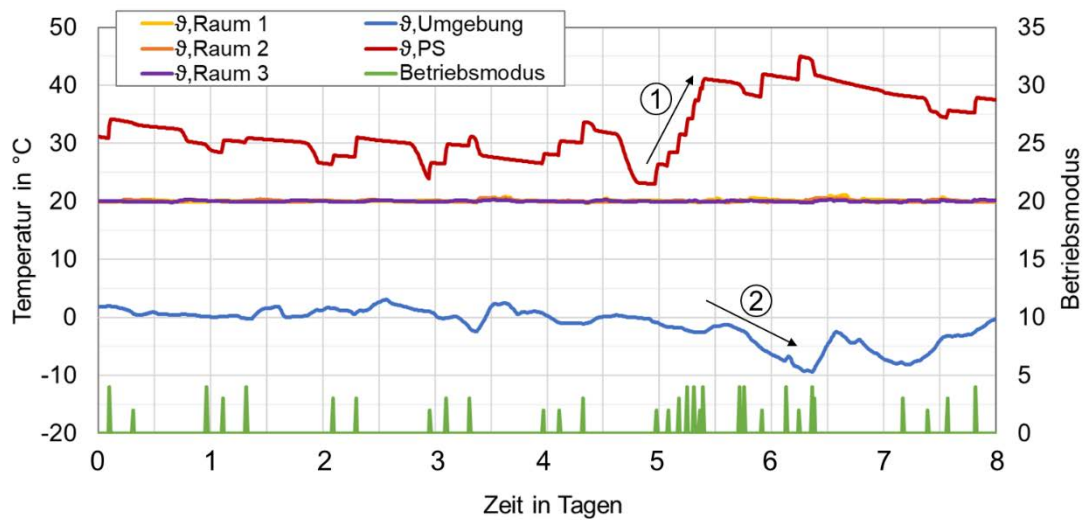


Abbildung 5-8: Lastverschiebung der modellprädiktiven Regelung (MPR): Erhöhung der Pufferspeichertemperatur (ϑ_{PS}) auf > 40 °C (1) erst vor dem Absinken der Umgebungstemperatur (2) bzw. Erhöhung der Heizlast (Betriebsmodi siehe Tabelle 5-6).

Das Regelverhalten der MPR ist stark abhängig von den in (5-1) gewählten Gewichtungsfaktoren der Zielfunktion. In Tabelle 5-7 sind die Gewichtungsfaktoren für unterschiedliche Varianten der Zielfunktion dargestellt, die im Folgenden für einen Vergleich mit der in Abschnitt 4.5.6 verwendeten Standardregelung verwendet wurden.

Tabelle 5-7: Koeffizienten der für die Varianten a bis e verwendeten Zielfunktionen für die modellprädiktive Regelung. Alle anderen Gewichtungsfaktoren erhalten den Wert 1.

Variante	Koeffizienten der Zielfunktion						
	E_1	E_2	E_3	F_1	F_2	H	I_1
a	1	3,5	1,5	50	2.1	40	10
b	1	3	1,25	50	2.5	40	10
c	1	3,25	1,25	50	2.3	40	15
d	3,5	1	1,25	50	2.3	40	15
e	5	1	1,25	50	2.3	40	15

Beispielhaft für die Einhaltung der Raumtemperaturen sind in Abbildung 5-9 die 3 Raumtemperaturen, die Temperatur des Pufferspeichers sowie die Umgebungslufttemperatur und der Betriebsmodus über die Dauer von 2 Wochen am Jahresanfang dargestellt. Dabei wurden die Gewichtungsfaktoren der Variante c aus Abbildung 5-9 verwendet. Abbildung 5-10 enthält die gleichen Größen unter Verwendung der Standardregelung.

Hierbei zeigt sich wie oben, dass der Warmwasserspeicher bei geringeren Umgebungslufttemperaturen auf ein höheres Temperaturniveau aufgeheizt wird als bei höheren Umgebungslufttemperaturen. Werden die Gewichtungsfaktoren für die Abweichung von der Raumsolltemperatur wie hier entsprechend hoch gewählt führt dies zu einer sehr guten Einhaltung dieser. Die Einhaltung der Solltemperatur gelingt hier ebenso gut wie bei Verwendung der Standardregelung.

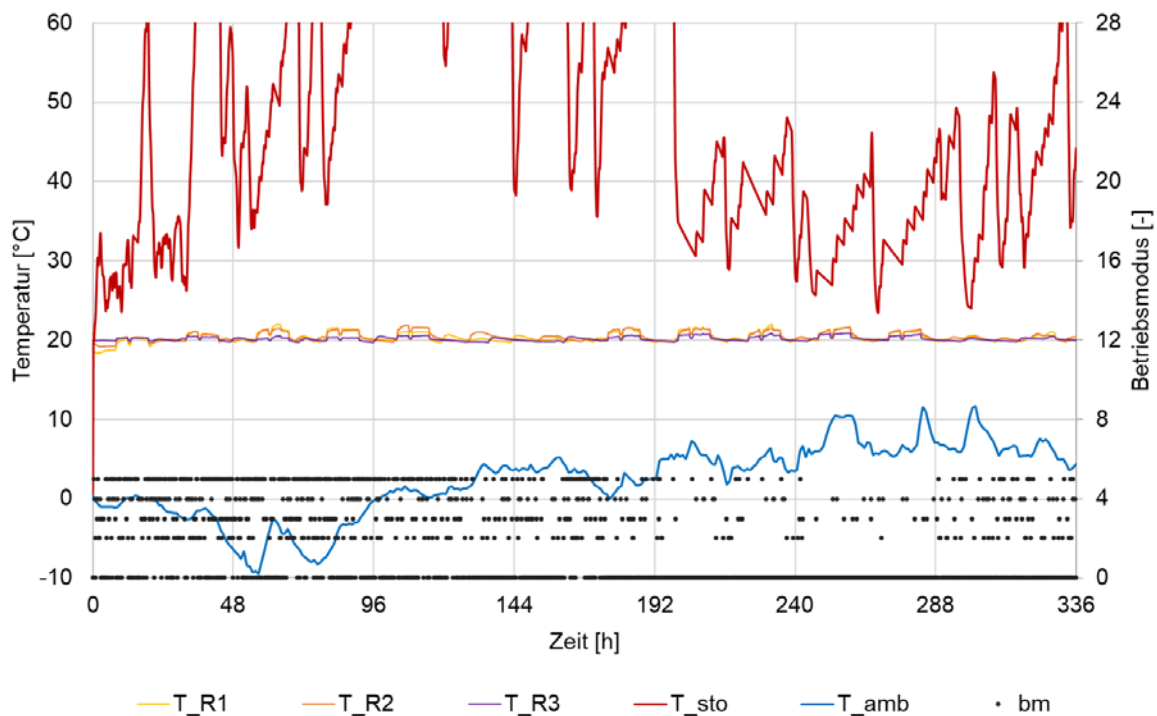


Abbildung 5-9: Raumtemperaturen, Umgebungslufttemperatur sowie Speichertemperatur und Betriebsmodus (Nummer siehe Tabelle 5-6) über die Dauer von 2 Woche mittels MPR.

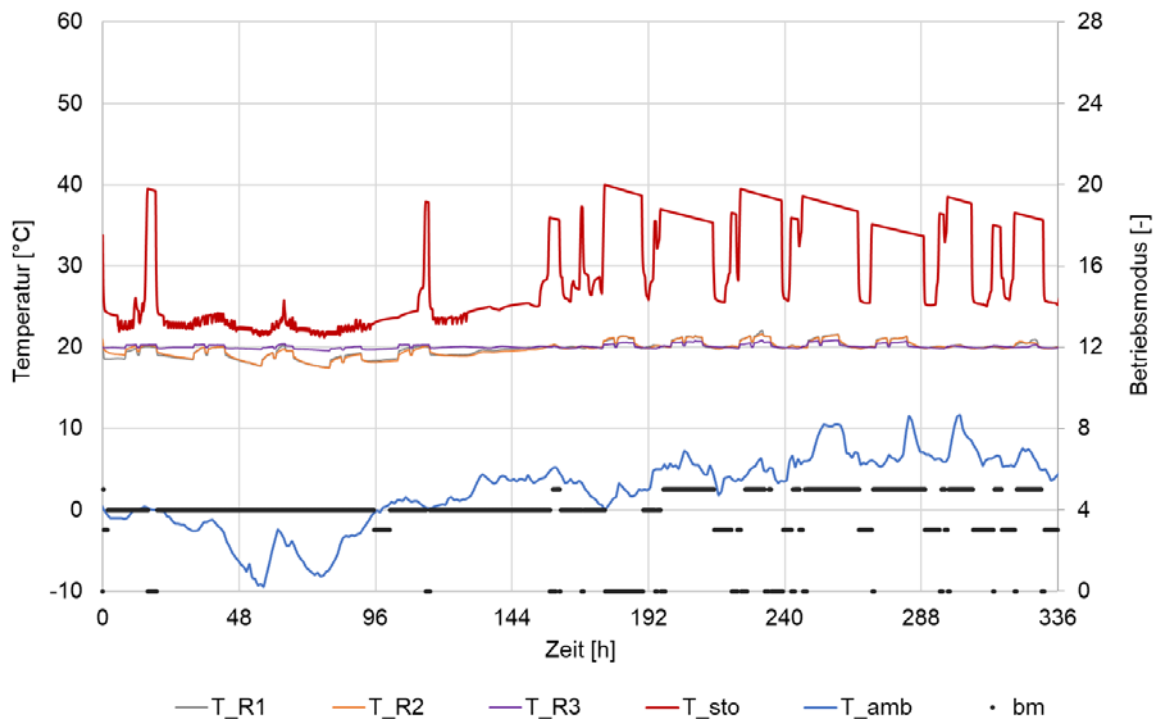


Abbildung 5-10: Raumtemperaturen, Umgebungslufttemperatur sowie Speichertemperatur und Betriebsmodus (Nummer siehe Tabelle 5-6) über die Dauer von 2 Woche mittels Standardregelung.

Die kurzzeitige Unterschreitung der Solltemperatur mittel Standardregelung innerhalb der ersten Woche ist auf eine zu geringe Quellenleistung des Luft-Sole-Kollektors zurückzuführen und ist so einmalig innerhalb der Jahressimulation. Ursache hierfür ist der Verbleib im Absorber-Direktbetrieb (Nr 4) da der Eisspeicher seinen minimalen Beladungszustand erreicht hat und nicht weiter entladen werden kann. Die MPR gleicht diesen Umstand durch ein frühzeitiges Aufheizen des Warmwasserspeichers aus und kann dadurch die Solltemperatur einhalten. Die genauere Einhaltung der Raumsolltemperatur erfordert aber einen größeren elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe. Dies wird anhand des in Abbildung 5-11 dargestellten elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe für die ersten 5 Tage der in Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 dargestellten Ergebnisse deutlich. Hier wird mittels Variante c im Vergleich zur Standardregelung deutlich mehr Energie aufgewendet.

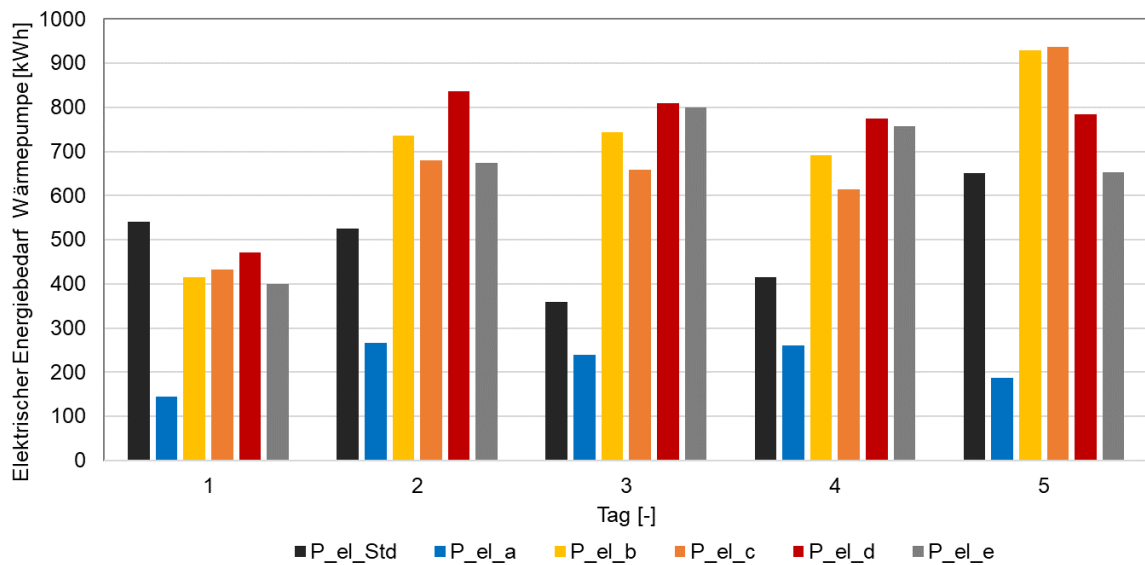


Abbildung 5-11: Elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpe der ersten 5 Tage der in Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 dargestellten Ergebnisse für die Standardregelung (Std) sowie für die in Tabelle 5-7 dargestellten Varianten der Zielfunktionen der MPR.

Der Vergleich der entsprechenden gemittelten Abweichungen von der Raumsolltemperatur ist in Abbildung 5-12 in Kh dargestellt. Dabei sind die Ergebnisse der Varianten c, d und e sehr ähnlich.

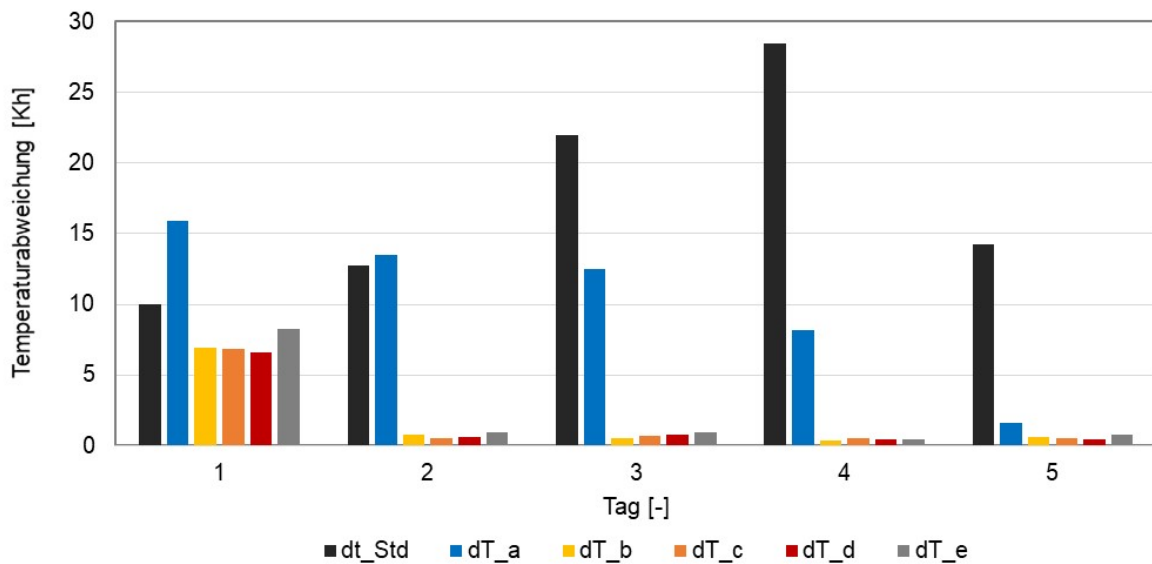


Abbildung 5-12: Abweichung von der Raumsolltemperatur der ersten 5 Tage der in Abbildung 5-9 und Abbildung 5-10 dargestellten Ergebnisse für die Standardregelung (Std) sowie für die in Tabelle 5-7 dargestellten Varianten der Zielfunktionen der MPR.

Die Ergebnisse der Variante b zeigen, dass eine geringere Gewichtung der Raumsolltemperatur (S) im Vergleich zu den anderen Varianten der MPR zwar zu einer deutlichen Reduzierung des Energiebedarfs aber gleichzeitig zu einer deutlichen Erhöhung der Abweichung von

der Raumsolltemperatur führt. Ein Vergleich von Variante b mit den hier dargestellten Ergebnissen der Standardregelung ist nicht sinnvoll, da mittels der Standardregelung die Raumsolltemperatur im übrigen Jahr sehr gut eingehalten wird.

Es wird davon ausgegangen, dass eine weitere Verbesserung der Gewichtungsfaktoren der Zielfunktion zu einer Energieeinsparung bei gleichzeitig vergleichbarer Einhaltung der Raumsolltemperatur gegenüber der Standardregelung führen kann.

Weitere Systemsimulationen haben gezeigt, dass die Verwendung der gleichen Gewichtungsfaktoren innerhalb der Zielfunktion sowohl für die Kühlperiode als auch für die Heizperiode nicht zu guten Regelungsergebnissen führt. Dies ist in den unterschiedlichen Anwendungszwecken der Komponenten zu den unterschiedlichen Zeiten begründet. So ist z. B. während des Heizbetriebs ein Wärmeeintrag durch den Luft-Sole-Kollektor erwünscht, während der Kühlperiode aber ein Wärmeausstrag. Die Verwendung unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren für die Heiz- und Kühlperiode ist daher zweckmäßig. Die Bestimmung geeigneter Gewichtungsfaktoren für die Kühlperiode wurde hier nicht weiter untersucht

5.4.2 Adaptive Regelung

Der saisonale Verlauf des Beladungszustands (SoC) wird, wie in Abschnitt 4.5.6.1 gezeigt, sowohl vom Verhältnis von Wärmekapazität des Eisspeichers zu Heiz- und Kühlenergiebedarf als auch vom Anfangs- bzw. Endzeitpunkt für die Vorkonditionierung des Eisspeichers beeinflusst (siehe Abbildung 4-43). So kann der Eisspeicher vor dem Sommer z. B. nur bei auftretendem Wärmebedarf entladen bzw. vorkonditioniert werden. Verfügt der Eisspeicher über eine hohe Wärmekapazität im Verhältnis zum Heiz- bzw. Kühlbedarf der gesamten Anlage, muss der Anfangszeitpunkt der Vorkonditionierung auf einen früheren Zeitpunkt verschoben werden, da sich dadurch die erforderliche Dauer für die Vorkonditionierung vergrößert. Gleichzeitig soll die Vorkonditionierung aber so spät wie möglich stattfinden, da mit einem unnötigen Einsatz des Entzugsbetriebs eine geringere Eintrittstemperatur in die Wärmepumpe und damit eine geringere Arbeitszahl verbunden sind.

Es wird davon ausgegangen, dass sich für jede Anlagenkonfiguration hinsichtlich des jährlichen elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe je eine bestmögliche Be- und Entladegrenze ergibt (siehe Abbildung 5-4).

Der hier gewählte Ansatz zur Bestimmung der möglichst optimalen Be- und Entladegrenzen ist das Lernen aus Erfahrungswerten. Dabei sollen für unterschiedliche Dimensionierungen von thermischer Kapazität des Eisspeichers und anderen Parametern die jeweils günstigen Be- und Entladegrenzen ermittelt und dann für die MPR abrufbar gespeichert werden. Dafür stellt ein künstliches neuronales Netz (KNN) ein gut geeignetes Werkzeug dar. Die Erfahrungswerte können während eines Trainings im KNN gespeichert und dann aus der MPR heraus abgerufen werden. Dabei kann auch zwischen den erlernten Datensätzen interpoliert werden. Die Erfahrungswerte bzw. die Trainingsdaten wurden mittels einer Parameterstudie anhand von Anlagensimulationen ermittelt. Die Ein- und Ausgabedaten für das Training der KNN sind in Abbildung 5-13 dargestellt.

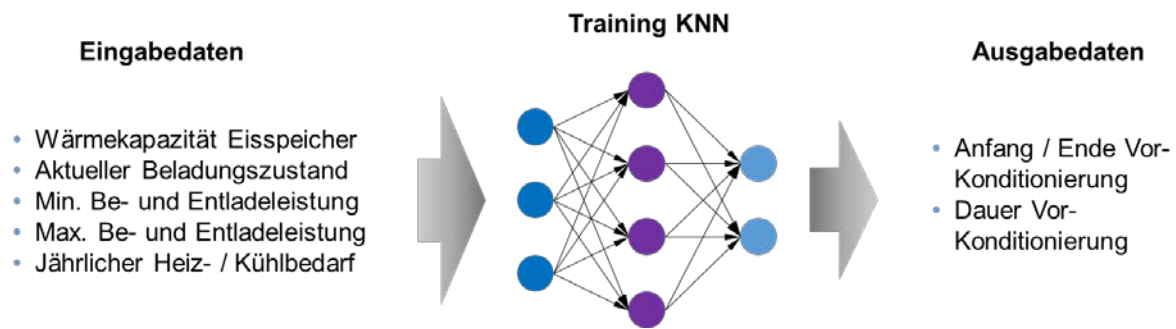


Abbildung 5-13: Ein- und Ausgabedaten für das künstliche neuronale Netz (KNN) zur Vorhersage der bestmöglichen saisonalen Be- und Entladegrenzen des Eisspeichers und deren Integration in die MPR.

Aufgrund der langen Simulationsdauern unter Verwendung der Standardregelung (Abschnitt 4.5.6.1) wurde zur Durchführung der Parameterstudie die vereinfachte Regelung verwendet. Ein Vergleich der Simulationsergebnisse für die Anlage 1 ist ebenfalls in Abschnitt 4.5.6.1 dargestellt. Da das größte Potential zur Einsparung des elektrischen Energiebedarfs der Wärmepumpe in der Reduzierung des aktiven Kühlbedarfs gesehen wird, lag der Fokus der Optimierung auf dem bestmöglichen Zeitpunkt für die gezielte Vereisung des Eisspeichers. Zur Bestimmung dieses Zeitpunkts sind in Abbildung 5-14 unterschiedliche Beladegrenzen dargestellt, die für die Systemsimulationen verwendet wurden. Dabei wurden vor allem der Zeitpunkt, zu dem der minimale Beladungszustand erreicht werden sollte zwischen Ende Februar und Ende Mai variiert. Wird die Beladegrenze „0“ gewählt bedeutet dies hier, dass der Regelung keine Sollwerte bzgl. des Beladungszustand des Eisspeichers vorgegeben werden. Der minimal zulässige Beladungszustand des Eisspeichers beträgt aus Sicherheitsgründen 0,2.

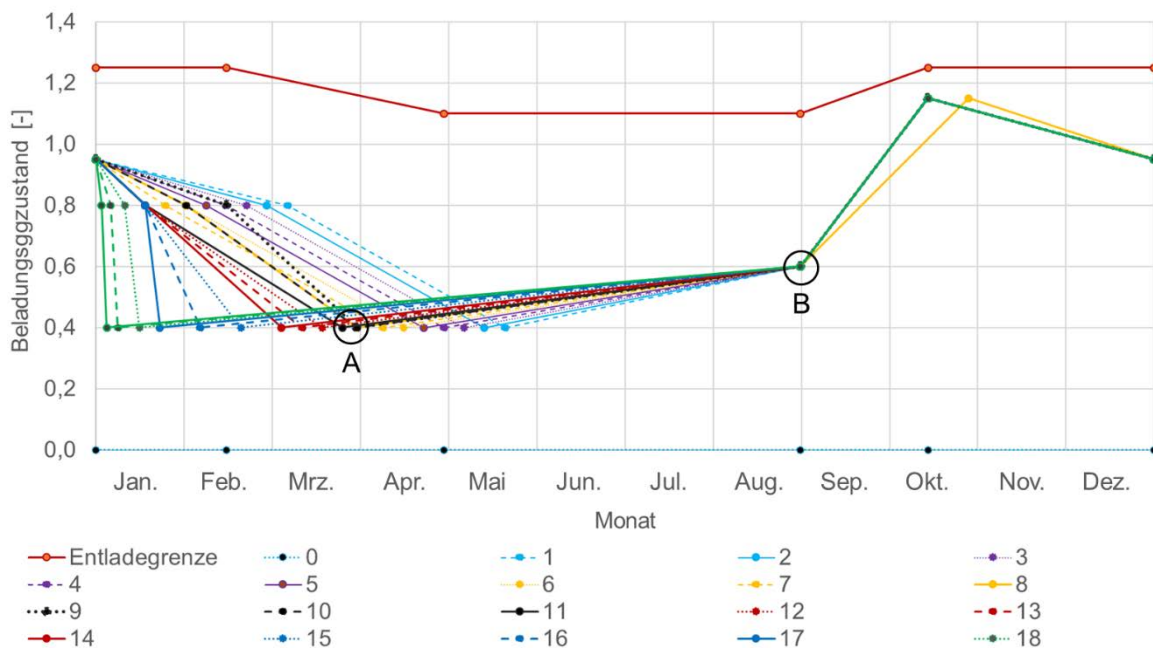


Abbildung 5-14: Variation der Beladegrenze zur Bestimmung des günstigsten Zeitpunkts zur gezielten Vereisung des Eisspeichers. Die unterschiedlichen Beladegrenzen sind aufsteigend nummeriert vom spätesten (1) zum frühesten (20) Zeitpunkt der gezielten Eisspeicher-vereisung im Jahr.

Der Einfluss der Variation der Beladegrenze auf den elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe ist in Abbildung 5-15 für den vollständigen in Abschnitt 4.5.6.1 verwendete Heiz- (500 MWh/a) und Kühlbedarf (120 MWh/a) dargestellt. Als Referenz wurde hier die Beladegrenze 1 gewählt. Ohne Vorgabe einer Beladegrenze (0) kann sich der Bedarf deutlich erhöhen. Der maximale Bedarfsunterschied der günstigsten Beladegrenze (16) gegenüber der ungünstigsten (10) beträgt etwa 2 %. Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Beladegrenzen 9, 10 und 11 wird deutlich, dass eine Verkürzung der Dauer zur gezielten Vereisung des Eisspeichers von ebenso entscheidender Bedeutung für die Menge der benötigten elektrischen Energie ist wie die Wahl des Zeitpunkts, zu dem der Eisspeicher vollständig konditioniert sein soll (A in Abbildung 5-14). Ist die Entladeleistung des Eisspeichers, wie dies üblicherweise der Fall ist, auf eine zeitweise alleinige Deckung des Heizwärmebedarfs dimensioniert, ergibt sich hierdurch keine praktische Beschränkung in der Wahl der Beladegrenze. Um die Dauer der Konditionierung möglichst kurz zu halten ist vor allem ein ausreichender Heizwärmebedarf notwendig. Eine zu frühzeitige Vereisung des Eisspeichers kann zum einen eine Verringerung der JAZ_{Gen} für den Heizwärmebedarf durch eine Verringerung der Eintrittstemperatur zur Folge haben. Zum anderen kann bei gewählter Beladegrenze durch den Punkt B in Abbildung 5-14 der Eisspeicher bei sehr frühzeitiger Vereisung zum Ende der Heizperiode Mitte April einen höheren Beladungszustand aufweisen als bei Wahl einer späteren Vereisung. Dieser Effekt ist aber von untergeordneter Bedeutung.

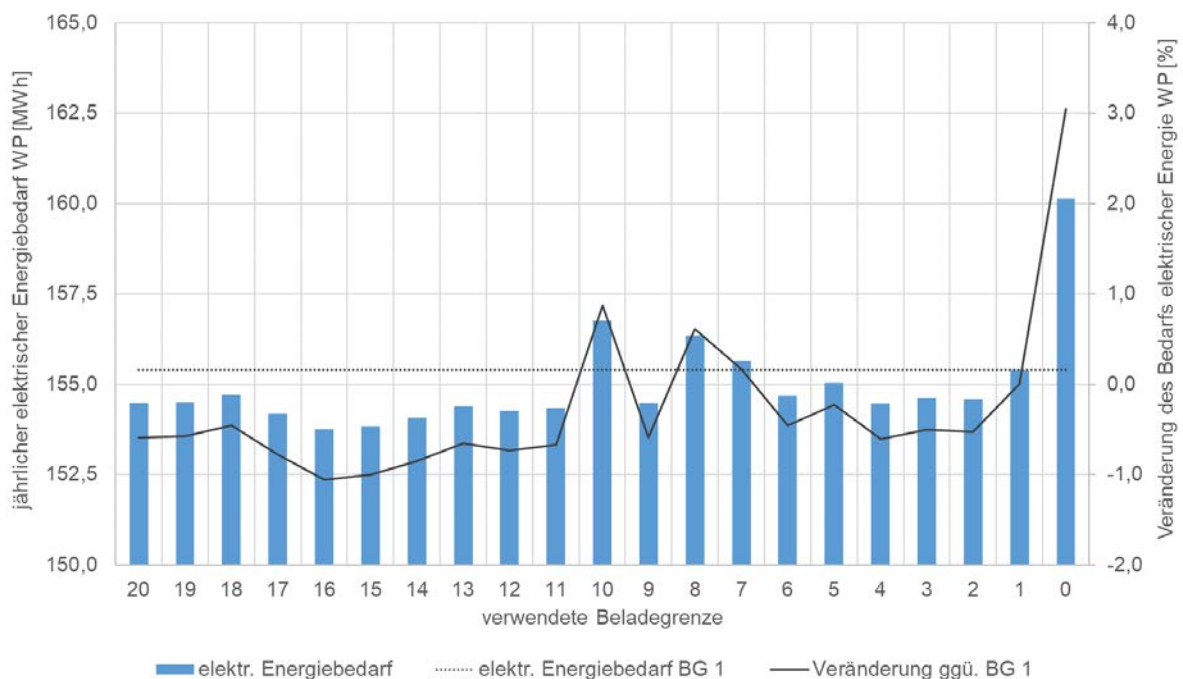


Abbildung 5-15: Jährlicher elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpe in Abhängigkeit der gewählten Beladegrenze aus Abbildung 5-14 für den vollständigen Heiz- und Kühlbedarf der Anlage 1 ($Q_{RH} = 500$ MWh/a, $Q_{RK} = 120$ MWh/a).

In Abbildung 5-16 ist der Einfluss der Variation der Beladegrenze auf den elektrischen Energiebedarf der Wärmepumpe bei Verwendung je 2/3 des vollständigen Heiz- und Kühlbedarfs

der Anlage 1 dargestellt. Auch hier ist eine möglichst kurze Konditionierungsdauer von Vorteil in Bezug auf den elektrischen Energiebedarf. Bei diesem geringeren Heiz- und Kühlbedarf besteht bei frühzeitiger Konditionierung ein noch größeres Einsparpotential im Vergleich zur als Referenz gewählten Beladegrenze.

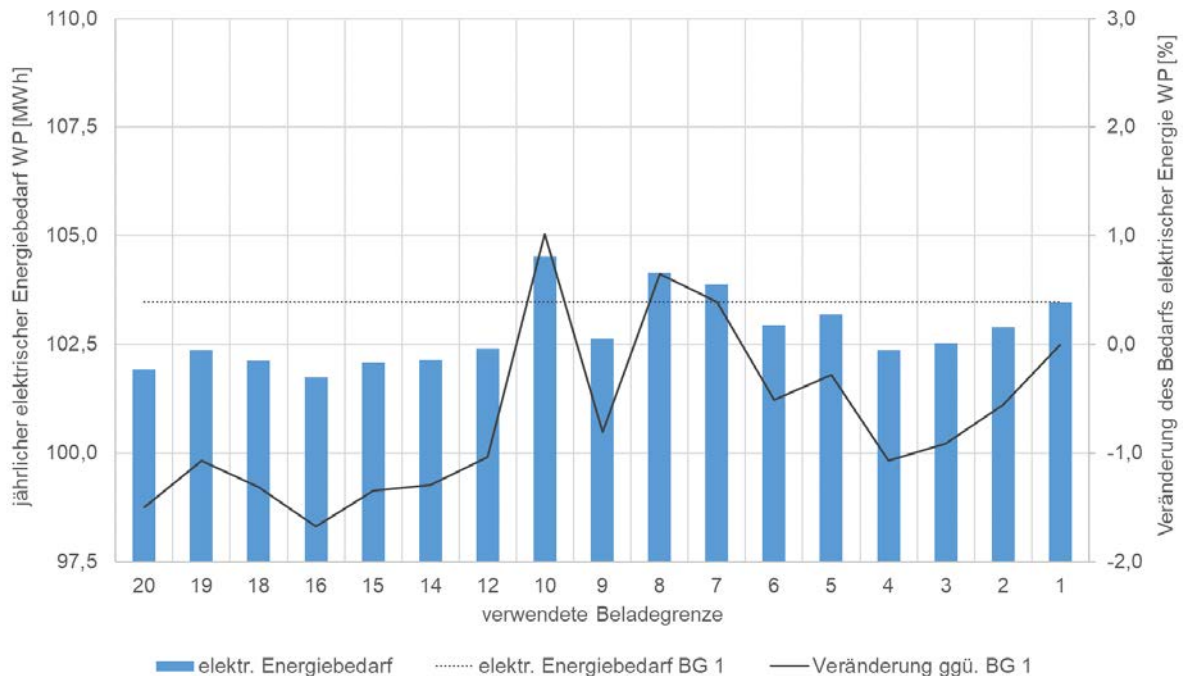


Abbildung 5-16: Jährlicher elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpe in Abhängigkeit der gewählten Beladegrenze aus Abbildung 5-14 für 2/3 des vollständigen Heiz- und Kühlbedarfs der Anlage 1 ($Q_{RH} = 333,3 \text{ MWh/a}$, $Q_{RK} = 80 \text{ MWh/a}$).

Werden der Heiz- und Kühlbedarf noch weiter auf 1/3 des vollständigen Heiz- und Kühlbedarfs der Anlage 1 gesenkt ist der Vorteil einer frühzeitigen Vereisung des Eisspeichers nicht mehr klar ersichtlich (Abbildung 5-17). Der Kühlbedarf kann zu einem großen Teil über die natürliche Kühlung, d.h. das Enteisen des Eisspeichers, gedeckt werden. Der elektrische Energiebedarf zur aktiven Kühlung ergibt daher nur einen Anteil von ca. 10 % am gesamten elektrischen Energiebedarf. Der Vorteil hoher Eintrittstemperaturen in die WP, die durch den relativ groß dimensionierten Luft-Sole-Kollektor erreicht werden, überwiegen.

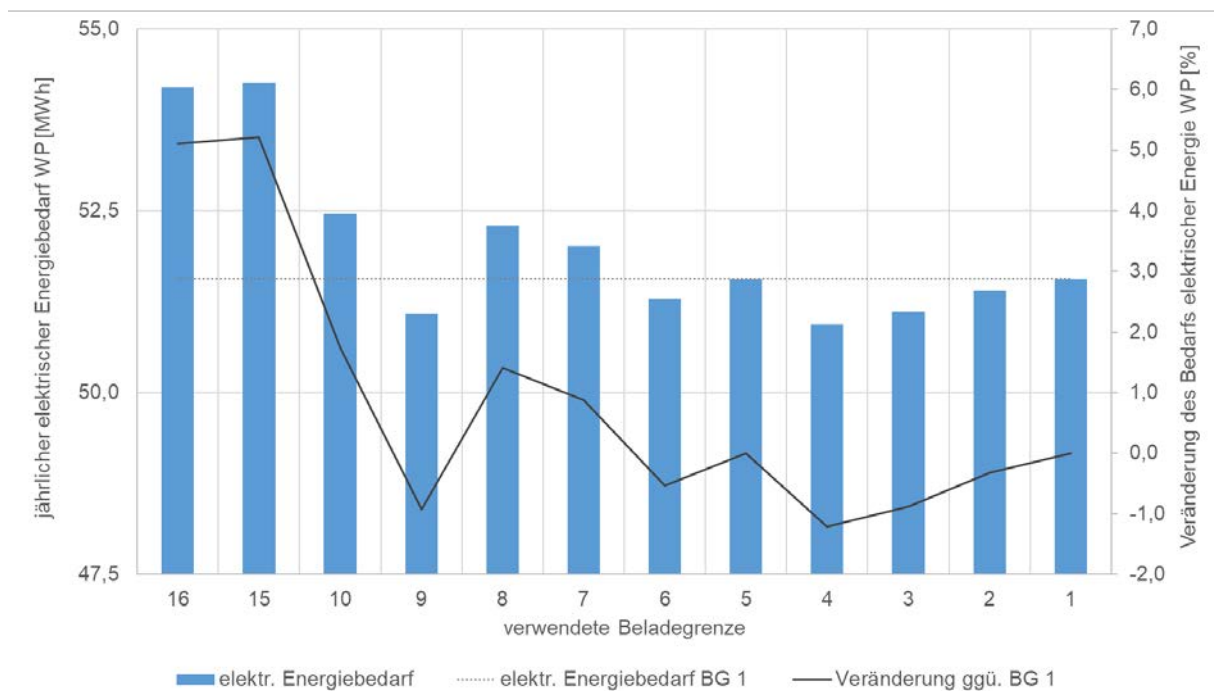


Abbildung 5-17: Jährlicher elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpe in Abhängigkeit der gewählten Beladegrenze aus Abbildung 5-14 für 1/3 des vollständigen Heiz- und Kühlbedarfs der Anlage 1 ($Q_{RH} = 166,7/a$ MWh, $Q_{RK} = 40$ MWh/a).

Da die in Abschnitt 4.5.6.1 beschriebene Standardregelung einen effizienteren Einsatz des Eisspeichers aufweist, wird davon ausgegangen, dass das Einsparpotential größer ist als das der hier für die vereinfachte Regelung beschriebenen Ergebnisse.

Für ein Training eines KNN bzw. den Einsatz in einer Regelung muss die beschriebene Untersuchung weiter ausgedehnt werden. So müssen z. B. die Beladegrenze sowie der Heiz- und Kühlbedarf weiter variiert werden. Der Fokus sollte hier auf der Verkürzung der Konditionierungsdauer liegen.

5.5 Validierung der Regelalgorithmen

Die in AP 5.3 beschriebene und für das Gesamtsystem entwickelte Regelung wurde in die Anlagensimulation integriert (siehe Abschnitt 4.3). Dabei handelt es sich um eine exakte Kopie der Regelung (1:1 Kopie) wie sie denen in den Abschnitten 4.5.2 bis 4.5.5 beschriebenen Anlagen verwendet wird. So konnte auch in der Anlagensimulation bereits teilweise die Überprüfung der korrekten Funktionsweise und somit die synthetische Validierung erfolge. Dabei wurde die Anlagensimulation nur anhand der Anlage 1 durchgeführt, bei der nicht alle möglichen Betriebsmodi zur Verfügung stehen. Maßgeblich für den korrekten Betrieb ist hierbei vor allem die Wahl des korrekten Betriebsmodus bei gegebenen Betriebsbedingungen. Ebenso ist die korrekte Ansteuerung der Aktoren für die Funktion der Anlage Voraussetzung für ein korrektes Betriebsverhalten des Gesamtsystems. Das Ziel ist letztendlich die Einhaltung der

vorgegebenen Sollgrößen, d. h. konkret der Sollwerte für die Raumtemperaturen. Die Überprüfung wurde anhand der in Abschnitt 4.5.6.1 beschriebene Anlagensimulation, in die der Regler als Co-Simulation eingebunden wurde, durchgeführt.

Die Überprüfung wurde mit unterschiedlich großen Gesamtwärme- und kältelasten bei gleichbleibend großem Eisspeicher durchgeführt. Dabei wurden bei den im vorliegenden Bericht verwendeten Lasten jeweils die korrekte Wahl des Betriebsmodus, die korrekte Ansteuerung der Aktoren und die Einhaltung der Solltemperaturen ($\vartheta_{Soll,Winter} > 20\text{ °C}$ und $\vartheta_{Soll,Sommer} < 26\text{ °C}$) festgestellt.

Auch die Funktionsweise des Quellenmischers (PID-Regler) konnte mittels Systemsimulation überprüft werden. Der Quellenmischer teilt den Netzmassenstrom zwischen Absorber und Eisspeicher so auf, dass nach der Mischung der beiden Austrittsmassenströme am Eintritt in die Wärmepumpe mindestens die Grenzeintrittstemperatur der Wärmepumpe erreicht wird. Bei den durchgeführten Simulationen wurde trotz Variation der Regelparameter für die Anlage 1 häufig noch nicht die erforderliche Grenztemperatur von min. -4 °C für den Eintritt in die Wärmepumpe eingehalten. Die Ursache hierfür sind die zu diesen Zeiten nicht ausreichenden Wärmeleistungen der beiden Wärmequellen Absorber und Eisspeicher. Die Grenztemperatur am Eintritt des Verdampfers der Wärmepumpe kann im Mischbetrieb erwartungsgemäß bei ausreichender Quellenleistung, d. h. ausreichender Leistung von Absorber und Eisspeicher, eingehalten werden. Nachträgliche Änderungen der Einstellung der Regelparameter können aber ggf. noch weitere Verbesserungen bewirken.

Da die Überprüfung bzw. synthetische Validierung anhand der Anlagensimulation weitestgehend durchgeführt wurde und die Überprüfung lediglich anhand der einer Auswahl an Umgebungsbedingungen erfolgte besteht jedoch aufgrund der großen Komplexität die Möglichkeit, dass noch nicht alle Anlagensituationen in der Prüfung dargestellt und überprüft wurden. Da die Überprüfung nur anhand der Anlage 1 erfolgte und hier einige wenige Betriebsmodi wie z. B. die Rückkühlung der Gebäude über ein Rückkühlwerk nicht zur Verfügung stehen, konnte diese ebenfalls nicht überprüft werden.

Für eine vollständige Überprüfung möglichst aller Anlagensituationen ist die gezielte Aufprägung entsprechender Betriebsbedingungen sowie eine automatisierte Auswertung unter Vorgabe von Gütekriterien erforderlich. Manuell ist eine solche vollständige Überprüfung nicht darstellbar. Die Verwendung der Regelung 1:1 in einer Anlagensimulation ermöglicht aber eine solche vollständige Überprüfung grundsätzlich. Allerdings ist sowohl die Erarbeitung der notwendigen Betriebsbedingungen für die Prüfung als auch die Erstellung einer automatisierten Auswertung mit einem hohen Aufwand verbunden.

6. Übertragbarkeit, Dissemination und IEA-Task (AP6)

In diesem Kapitel werden die Aktivitäten des Projektteams in Hinblick auf die Bekanntmachung und Weitergabe der Projekterkenntnisse, den Austausch mit anderen Akteuren aus dem Forschungsgebiet, sowie Überlegungen zur Übertragbarkeit der Projektergebnisse auf andere Anwendungsgebiete - konkret auf Bestandsgebäude und andere Gebäudetypen (vgl. Kapitel 6.1) – dargestellt.

Die Dissemination der Forschungsergebnisse erfolgte über Veröffentlichung in einschlägigen Journals und Fachzeitschriften (Kapitel 6.2), Präsentation von Forschungsergebnissen bei einschlägigen Tagungen bzw. Konferenzen (Kapitel 6.3) sowie das Einbringen der Ergebnisse in Arbeitsgruppen der Internationalen Energie-agentur (IEA) und in weiteren Gremien (Kapitel 6.4). Positiv hervorzuheben ist außerdem die Zusammenarbeit mit den österreichischen Projektpartnern.

Die wesentlichen Vorteile dieser Zusammenarbeit waren aus deutscher Sicht:

- Eine intensive Kooperation in Zusammenhang mit der IEA SHC Task 66 und hier insbesondere die gemeinsame Initiierung der Task 66 sowie die Leitung der Subtask D durch Österreich
- Die Bereitstellung von Messdaten für Eisspeicher durch österreichische Partner für Validierung von Rechenmodellen von großen Eisspeichern durch deutsche Partner
- Die Möglichkeit einen Einblick in Produktionsstätten der österreichischen Partner: Sonnenkraft, Kioto PV, GreenOneTec. zu bekommen. Diese hat auch zu einer engeren Kooperation und dem fachlichen Austausch einzelner Industriepartner, insbesondere bezüglich der Entwicklung und dem Bezug von Großanlagenkollektoren, geführt.
- Die gemeinsame Erarbeitung einheitlicher Definitionen von Bewertungsgrößen bzw. KPIs (Key Performance Indicators)
- Der inhaltliche Know-How Transfer und die synergetischen Ergänzungen der Arbeiten zum Thema Modellprädiktive Regelung (MPR bzw. MPC: Model Predictive Control). Hierbei fokussierten die Arbeiten der österreichischen Partner auf Kurzzeitbetrachtungen und die der deutschen Partner auf die Kombination von Kurzzeit- und Langzeitbetrachtungen bzw. der Entwicklung prädiktiver und adaptiver Regelungsstrategien

6.1 Übertragbarkeit auf Bestandsgebäude und andere Gebäudetypen

Die Untersuchung der Übertragbarkeit auf Bestandsgebäude und andere Gebäudetypen erfolgte mittels des Anlagenmodells für die Anlage 1 aus Abschnitt 4.3, das die vereinfachte Regelung verwendet und auch für die Parameterstudie genutzt wurde. Hierbei wird das für die Anlage verwendete Lastprofil skaliert sowie die Heiz- und Kühlperioden verlängert bzw. verkürzt.

Die Skalierung ist in Abbildung 6-1 beispielhaft dargestellt. Im dargestellten Beispiel sind die Heiz- und Kühllast zum einen mit dem Faktor 1,05 multipliziert. Weiter wurde eine Verlängerung der Heizperiode vorgenommen, sodass der Umschaltzeitpunkt von der Heizperiode zur

Kühlperiode in der ersten Jahreshälfte von Stunde 2500 auf Stunde 2800 verschoben wurde. Der Umschaltzeitpunkt von der Heiz- zur Kühlperiode in der zweiten Jahreshälfte wurde von Stunde 6500 auf Stunde 6200 vorgezogen. Dadurch verlängert sich die Heizperiode. Die Steigung des Heizbedarfs wurde jeweils durch einen linearen Ansatz erhöht. Dabei wird der skalierten Heizlast im ersten Jahreshälftenverlauf der Wert $6 \cdot \left(1 - \frac{\text{Stunde}}{4300}\right) \text{ kWh}$ und in der zweiten Jahreshälfte der Wert $\frac{6}{(8760-4300)} \cdot (\text{Stunde} - 4300) \text{ kWh}$ addiert, wobei Stunde die aktuelle Stunde im Jahr bezeichnet. Nach Skalierung und Anpassung des zeitlichen Verlaufs sowie der Verschiebung der Heizperiode ergibt sich der in Abbildung 6-1 dargestellte Verlauf des Heiz- und Kühlbedarfs. Die Kühllast wird im Beispiel mit dem Faktor 1,05 skaliert. Für die Heizlast ergibt sich im gesamten Jahr ein Faktor von 1,5 gegenüber der ursprünglichen Heizlast der Anlage. Die im Folgenden verwendeten Wetterdaten sind gegenüber den verwendeten Wetterdaten der Anlage unverändert mit einer Einstrahlungssumme von 1148 kWh/(m² a) und einer mittleren Umgebungslufttemperatur von 10,4 °C.

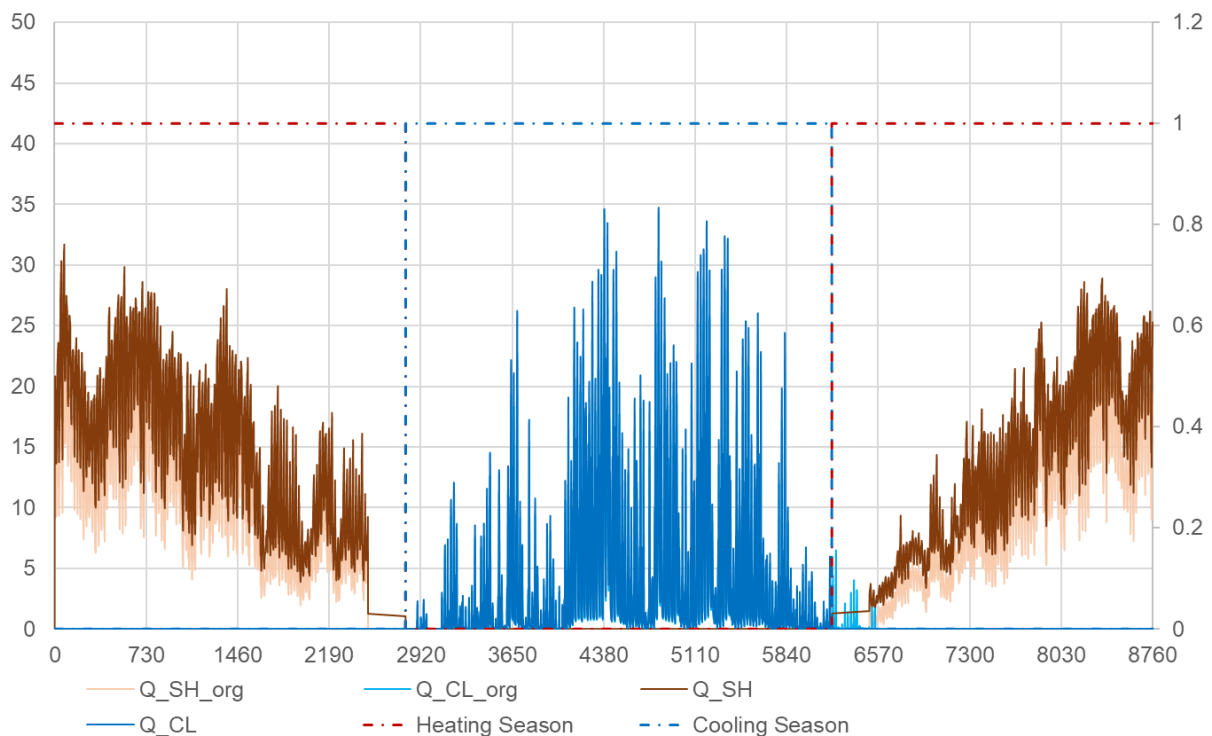


Abbildung 6-1: Skalierung des Lastprofils ausgehend von Lastprofil Anlage 1.

Die monatlichen zu- und abgeführten Wärmemengen für die in Abbildung 6-1 beschriebene Heiz- und Kühllast ist in Abbildung 6-2 dargestellt. Die Darstellung zeigt, dass der Heiz- und Kühlbedarf für jeden Monat sowie für das gesamte Jahr gedeckt werden. Die Deckung von Heiz- und Kühlbedarf erfolgt dabei ohne Anpassung der Anlagendimensionierung. Aufgrund der im Vergleich zur Originallast geringeren Quellendimensionierung verringert sich dabei jedoch die JAZ_{Gen} leicht von 3,6 auf 3,4 im Heizbetrieb und von 7,7 auf 5,9 im Kühlbetrieb. Das hier gewählte Heizlastprofil soll die Verwendung der Anlage unter größerer Heizlast wie z. B. einem schlechter wärmegeprägten Gebäude abbilden. Die hier aufgeprägte Heizlast weist

dabei bezgl. Der maximalen Heizleistung einen Faktor von ca. 1,3 auf. Bei Auftreten größerer Faktoren bzgl. der maximalen Heizleistung muss eine Anpassung der Dimensionierung der Anlagenkomponenten vorgenommen werden.

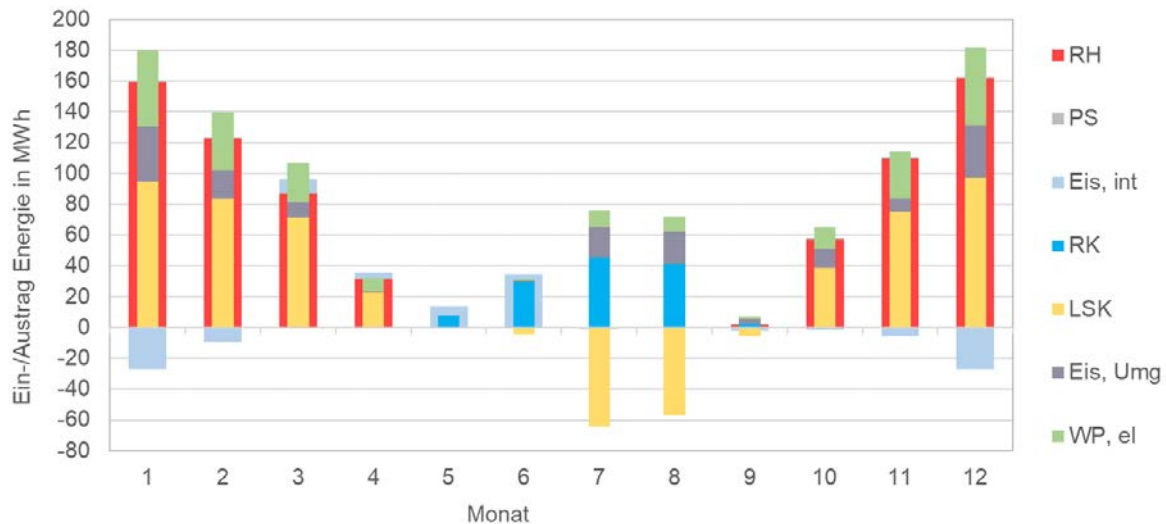


Abbildung 6-2: Mittels Anlagensimulation ermittelte Energie-Einträge (positive schmale Balken oder negative breite Balken) und Energie-Austräge (positive breite oder negative schmale Balken) für eine größere Heizlast gegenüber der Anlage 1 (Abschnitt 4.5.2) über ein Jahr unter Verwendung der vereinfachten Regelung (TRNSYS). RH: Raumheizung, PS: Pufferspeicher, Eis : Eisspeicher (int: interne Energieänderung, Umg: thermische Umweltgewinne), RK: Raumkühlung , LSK : thermischer Ertrag bzw. Wärmeabgabe aus Luft-Sole-Kollektor, WP,el .: elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpen.

Analog zum oben beschriebenen Vorgehen wurde zur Abbildung des Anlageneinsatzes für Gebäude mit besserer Wärmedämmung und gleichzeitig größerer Kühllast die Heizlast mit dem Faktor 0,8 und die Kühllast mit dem Faktor 1,5 multipliziert. In Abbildung 6-3 sind die bei nicht veränderter Dimensionierung der Anlage ermittelten monatlich zu- und abgeführte Energiemengen dargestellt. Dabei können sowohl Heiz- als auch Kühllast ohne Anpassung der Dimensionierung gedeckt werden. Aufgrund der im Vergleich geringeren Dimensionierung des Eisspeichers gegenüber der Dimensionierung in der Anlage 1 sinkt die $JAZ_{Gen,Kühlen}$ von 7,7 auf 5,9. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Eisspeicher durch den natürlichen Kühlbetrieb früher enteist und erwärmt ist und eine stärkerer Einsatz der aktiven Kühlung mittels WP notwendig ist.

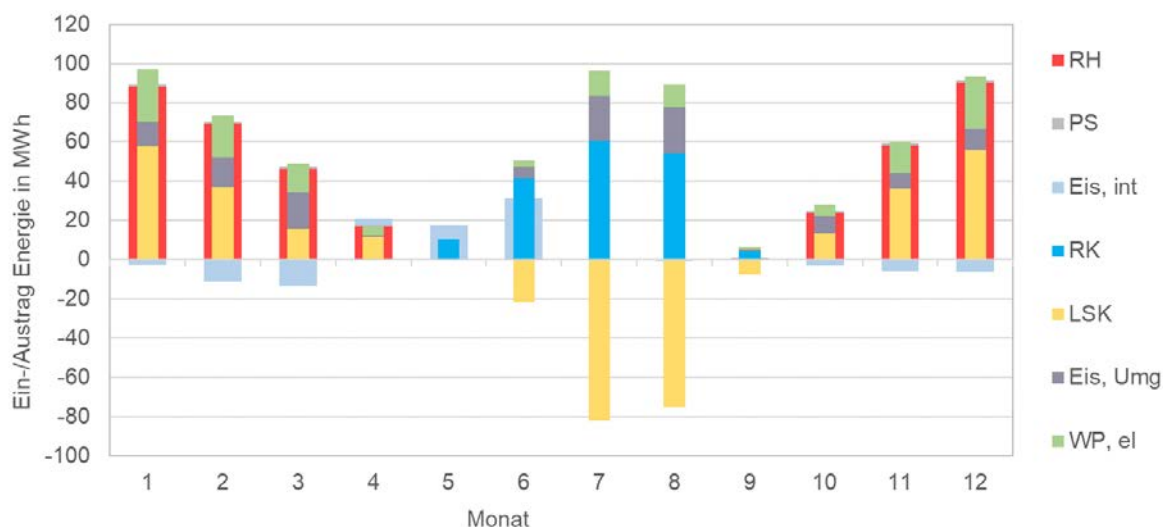


Abbildung 6-3: Mittels Anlagensimulation ermittelte Energie-Einträge (positive schmale Balken oder negative breite Balken) und Energie-Austräge (positive breite oder negative schmale Balken) für eine größere Kühllast gegenüber der Anlage 1 (Abschnitt 4.5.2) über ein Jahr unter Verwendung der vereinfachten Regelung (TRNSYS). RH: Raumheizung, PS: Pufferspeicher, Eis : Eisspeicher (int: interne Energieänderung, Umg: thermische Umweltgewinne), RK: Raumkühlung , LSK : thermischer Ertrag bzw. Wärmeabgabe aus Luft-Sole-Kollektor, WP,el .: elektrischer Energiebedarf der Wärmepumpen.

Die durchgeführten Anlagensimulationen unter Verwendung der vereinfachten Regelung zeigen, dass die Anlage in der Lage ist auch bei relativ geringer Dimensionierung die notwendigen Heiz- und Kühllasten bzgl. der Wärme- und Kältemengen zu decken. Die notwendigen zu- und abgeführten Leistungen dürfen dabei die Leistungsgrenzen der Komponenten nicht überschreiten.

6.2 Veröffentlichung in einschlägigen Journals und Fachzeitschriften

Im Projektverlauf erfolgten zahlreiche Projektvorstellungen und die Präsentation von Projektergebnissen durch Veröffentlichungen in einschlägigen Journals und Fachzeitschriften:

- Artikel mit dem Titel *Solare Konzepte für klimaneutrale Gebäude*, veröffentlicht im Jahrbuch Solarthermie 2021 (<https://www.solarthermie-jahrbuch.de/jahrbuch-2021/>)
- Artikel mit dem Titel *Mit Eis und Sonne heizen*, erschienen in der Fachzeitschrift Gebäudeenergieberater, Ausgabe 07/2021 (<https://gentnershop.de/geb/2107>)
- Artikel mit dem Titel *Solare Energieversorgungskonzepte mit Eisspeicher*, erschienen im HLK-Brief 2021 (<https://vdf.hlk-stuttgart.de/veroeffentlichungen/2021-1>)
- Beitrag mit dem Titel *How to get renewable energy to buildings in dense urban areas* beim 1. Industry Workshop des IEA SHC Task 66 (<https://solarthermalworld.org/news/how-to-get-renewable-energy-to-buildings-in-dense-urban-areas/>)
- Beitrag mit dem Titel *Optimised PVT and heat pump combinations for heating and cooling of buildings* beim 2. Industry Workshop des IEA SHC Task 66 (<https://solarthermalworld.org/news/optimised-pvt-and-heat-pump-combinations-for-heating-and-cooling-of-buildings/#>)

- Artikel mit dem Titel *Wie klimaneutral ist Solarthermie?* im Solarthermie Jahrbuch 2023 (<https://www.solarthermie-jahrbuch.de/>)
- Artikel mit dem Titel *Solar thermal achieves highest level of real climate neutrality* auf der News-Plattform solarthermalworld.org (<https://solarthermalworld.org/news/solar-thermal-achieves-highest-level-of-real-climate-neutrality/>)
- Veröffentlichung mit dem Titel „Betriebsergebnisse einer solaren kalten Nahwärmeversorgung mit Eisspeicher“ im HLK-Brief 2023 (<https://vdf.hlk-stuttgart.de/veroeffentlichungen/hlk-briefe/2023>)

6.3 Präsentationen bei einschlägigen Tagungen bzw. Konferenzen

Einschlägige Projektergebnisse wurden im Projektverlauf durch zahlreiche Präsentationen und Veröffentlichungen bei einschlägigen Tagungen und Konferenzen vorgestellt:

- Vortrag mit dem Titel *Netzgebundene Energieversorgungskonzepte für ländliche Gebiete im Vergleich* beim CEGA Congress für Experten der TGA am 01./02.12.2020 in Baden-Baden
- Posterpräsentation mit dem Titel *Quasi-dynamische Vermessung und numerische Simulation eines solarthermischen Luft-Sole-Wärmeübertragers* beim Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, Bad Staffelstein vom 27.-29. April 2021 (<https://www.symposiumzukunftwaerme.de/konferenz/rueckblicke/rueckblicke-2021>)
- Posterpräsentation mit dem Titel *Development of a sensor for the detection of the charge status of ice storages* bei Enerstock, Ljubljana, Slowenien vom 09-11.06.2021 (<https://www.sciencedirect.com/special-issue/108TN3VFPNR>)
- Kurzvorstellung des Forschungsvorhabens Sol4City und Monitoring-Fragestellungen beim Monitoring-Forum 2021 der Begleitforschung EWB, Online am 07.10.2021
- Posterpräsentation mit dem Titel *Simulation und Messung der Wärmeverluste von Warmwasserspeichern mit und ohne Vakuumwärmedämmung* beim Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, Bad Staffelstein vom 03.-05. Mai 2022 (<https://www.symposiumzukunftwaerme.de/konferenz/rueckblicke/rueckblicke-2022>)
- Posterpräsentation mit dem Titel *Vergleich von Modellen zur numerischen Berechnung von Eisspeichern* beim Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, Bad Staffelstein vom 03.-05. Mai 2022 (<https://www.symposiumzukunftwaerme.de/konferenz/rueckblicke/rueckblicke-2022>)
- Vortrag mit dem Titel *Entwicklung einer Sensorik zur Detektion des Beladungszustandes von Eisspeichern* beim Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, Bad Staffelstein vom 03.-05. Mai 2022 (<https://www.symposiumzukunftwaerme.de/konferenz/rueckblicke/rueckblicke-2022>)
- Vortrag mit dem Titel *Die Definition von Klimaneutralität und ihre Relevanz für die Solarthermie* beim Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, Bad Staffelstein vom 03.-05. Mai 2022 (<https://www.symposiumzukunftwaerme.de/konferenz/rueckblicke/rueckblicke-2022>)
- Posterpräsentation mit dem Titel *Quasi-dynamic testing of sun air collectors and numerical simulations of a cold district heating network* bei der EuroSun Konferenz, Kassel vom 25.-29.09.2022 (<https://www.eurosun2022.org/updates/eurosun-2022-proceedings-now-available>)
- Posterpräsentation mit dem Titel *Development of a combined model predictive and adaptive control strategy for the operation of a cold district heating network* bei der EuroSun Konferenz, Kassel vom 25.-29.09.2022 (<https://www.eurosun2022.org/updates/eurosun-2022-proceedings-now-available>)

- Vortrag mit dem Titel *Definitions for Climate Neutrality and their Relevance for the Assessment of Solar Energy based Heating Systems* bei der EuroSun Konferenz, Kassel vom 25.-29.09.2022 (<https://www.eurosun2022.org/updates/eurosun-2022-proceedings-now-available>)
- Poster des Forschungsprojekts Sol4City auf dem Firmenstand von VCS im Eingangsbereich der EuroSun Konferenz, Kassel vom 25.-29.09.2022
- Posterpräsentation mit dem Titel *Regelungsverfahren für den Betrieb von Eisspeichern in kalten Netzen – Ergebnisse des Projekts Sol4City* beim Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, Bad Staffelstein vom 09.-11. Mai 2023 (<https://www.symposiumzukunftwaerme.de/konferenz/rueckblicke/rueckblicke-2023>)
- Vortrag mit dem Titel *Entwicklung einer prädiktiven und adaptiven Regelung für die Wärme- und Kälteversorgung mittels eines kalten Nahwärmenetzes* beim Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, Bad Staffelstein vom 09.-11. Mai 2023 (<https://www.symposiumzukunftwaerme.de/konferenz/rueckblicke/rueckblicke-2023>)
- Posterpräsentation mit dem Titel *Detaillierte energetische Bilanzierung von Eisspeichern unter Berücksichtigung des Beladungszustandes* beim Symposium „Solarthermie und innovative Wärmesysteme“, Bad Staffelstein vom 09.-11. Mai 2023 (<https://www.symposiumzukunftwaerme.de/konferenz/rueckblicke/rueckblicke-2023>)

Zusätzlich wurde am 23.05.23 wurde in Zusammenhang mit dem Projekt „Sol4City“ beim „TGA-Kongress 2023“ in Berlin ein Workshop zum Thema „Energieversorgungskonzepte mit Sonne und Eis“ durchgeführt. Die zentralen Aspekte des Workshops waren die Vorstellung von innovativer Anlagentechnik für die Wärme- und Kälteversorgung von Quartieren durch Dr. Harald Drück (IGTE) sowie ein Bericht über die Betriebserfahrungen mit realisierten Anlagen durch Dr. Bernd Hafner (Fa. VCS). Der Workshop war mit ca. 40 teilnehmenden Personen sehr gut besucht.

Am 9.10.23 erfolgte die Teilnahme am 4. Industry-Workshop der IEA SHC Task66 (Solar Energy Buildings) in Graz (Österreich) mit folgenden Beiträgen

- General Overview Sol4City Project
- Solar heat and ice storages in cold district heat networks for heating and cooling - operation and control aspects

Am 24.10.23 wurde bei der Veranstaltung „Grüne Wärmetransformation“ in Stuttgart über ausgewählte Ergebnisse des Projekts „Sol4City“ berichtet. Diese Veranstaltung wurde von ca. 200 Personen besucht.

6.4 Einbringen der Ergebnisse in Arbeitsgruppen der Internationalen Energieagentur (IEA) und weiteren Gremien

6.4.1 Arbeiten in der IEA Task 66 und im Executive Committee der SHC

Die wesentlichen Inhalte dieses Arbeitspakets sind die Initiierung, Leitung und Mitarbeit einer neuen Arbeitsgruppe bzw. Task im Solar Heating and Cooling Programm (SHC) der IEA zum Thema „Solar Energy Buildings - Integrated solar energy supply concepts for climate-neutral buildings and communities for the "City of the Future““

Im Hinblick auf die Etablierung einer neuen Arbeitsgruppe bzw. Task im Solar Heating and Cooling Programm (SHC) der IEA zum Thema „Solar Energy Buildings - Integrated solar energy supply concepts for climate-neutral buildings and communities for the "City of the Future“ wurde von Harald Drück vom IGTE am 25.03.2020 ein sogenannter „Task Definition Workshop“ durchgeführt. Ursprünglich war geplant diesen Workshop als Präsenzveranstaltung in Stuttgart durchzuführen. Hierfür waren auch bereits die entsprechenden Vorbereitungen wie die Reservierung eines Tagungsraums und von Hotelzimmern erfolgt. Aufgrund der Corona-Pandemie wurde jedoch dann relativ kurzfristig beschlossen, den Task Definition Workshop ausschließlich als internetbasierte Veranstaltung durchzuführen. Mit fast 50 Teilnehmern bzw. Teilnehmerinnen war der Workshop gut besucht und es herrschte, trotz Virtualität, eine konstruktive Diskussionsatmosphäre.

Beim dem ebenfalls als Web-Meeting stattfindenden Treffen des Executive Committees (ExCo) des SHC der IEA am 03.06.20 wurde von Harald Drück über den aktuellen Stand der Arbeiten zur Etablierung einer neuen IEA SHC Task zum Thema „Solar Energy Buildings“ berichtet.

Beim Treffen des Executive Committees des SHC der IEA am 04.11.20 wurde von Harald Drück der Vorschlag für eine neue IEA SHC Task zum Thema „Solar Energy Buildings“ offiziell vorgestellt. Der Vorschlag fand die Zustimmung des ExCo, so dass der Beginn der entsprechenden Aktivität als „Task 66“ zum 01.07.2021 terminiert wurde, mit einer Laufzeit von 3 Jahren, d. h. bis zum 30.06.2024.

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IGTE arbeiteten in der Projektlaufzeit maßgeblich in den folgenden Subtasks mit:

- In der Subtask A bei der Definition von Bewertungsgrößen und Referenzgebäuden,
- in der Subtask C bei der Definition von ökonomischen und ökologischen Energieversorgungskonzepten mit hohen solaren Deckungsanteilen für den Gebäudebestand, Neubauquartiere und Kommunen,
- in der Subtask D im Hinblick auf die Beschreibung aktueller und zukünftiger Technologien.

In der Subtask C erfolgt die Leitung einer Arbeitsgruppe zur Erstellung eines Leitfadens für das Monitoring und die Berichterstattung von den Energieversorgungskonzepten mit hohen solaren Deckungsanteilen durch Stefanie Lott.

Am 30.03.2020 wurde ein „Task Preparation Workshop“ als Onlineveranstaltung durchgeführt, um einen erfolgreichen Start der Task 66 vorzubereiten. An dem Workshop nahmen ca. 45 Personen aus 14 verschiedenen Ländern teil.

Das erste Treffen bzw. „Kick-off Meeting“ der Task 66 erfolgte am 1. und 2. Juli 2021 jeweils als Onlineveranstaltung und wurde von Harald Drück als „Operating Agent“ geleitet. An diesem Treffen nahmen 40 Personen aus 14 Ländern teil.

Das 2. Arbeitstreffen der Task 66 wurde am 4. und 5. November ebenfalls als Online-Veranstaltung mit ähnlich vielen Teilnehmenden durchgeführt. Beide Treffen wurden von Harald Drück als „Operating Agent“ geleitet.

Ebenso erfolgte von Harald Drück die Teilnahme am Treffen des Executive Committees des Solar Heating and Cooling Programs (SHC) der Internationalen Energieagentur, das vom 16.-18. November 2021 als Online-Veranstaltung stattfand. Bei dem Treffen wurde von Harald Drück über die aktuellen Arbeiten der Task 66 berichtet. Zusätzlich wurden von ihm die entsprechenden, vom ExCo geforderten Berichte zur Task 66 erstellt.

Am 23. und 24. März 2022 fand das 3. Arbeitstreffen der Task 66 mit ca. 29 teilnehmenden Personen aus 12 Ländern als Online-Veranstaltung statt. Am 23. März 2022 wurde der erste Industry-Workshop mit 56 teilnehmenden Personen aus 14 Ländern ebenfalls als Online-Veranstaltung durchgeführt. Beide Treffen wurden von Harald Drück als „Task Manager“ geleitet. Ebenso erfolgte die Teilnahme vom Harald Drück am Treffen des Executive Committees (ExCo) des Solar Heating and Cooling Programs (SHC) der Internationalen Energieagentur, das vom 01.-03. Juni 2022 in Rapperswil (Schweiz) sowie als Online-Veranstaltung stattfand. Bei dem Treffen wurde von Harald Drück über die aktuellen Arbeiten der Task 66 berichtet. Zusätzlich wurden von ihm die entsprechenden, vom ExCo geforderten Berichte zur Task 66 erstellt.

Am 29. und 30. September 2022 erfolgte in Kassel das 4. Arbeitstreffen der Task 66 mit ca. 17 teilnehmenden Personen aus 7 verschiedenen Ländern. Das Treffen erfolgte erstmals als physisches Treffen, was dazu führte, dass die Zahl der teilnehmenden Personen geringer war als bei den bisher online durchgeführten Treffen. Der Vorteil war jedoch, dass aufgrund der persönlichen Begegnungen die fachlichen Diskussionen intensiver waren.

Am 29. September 2022 wurde der zweite Industry-Workshop mit 31 teilnehmenden Personen aus 9 verschiedenen Ländern ebenfalls als Präsenzveranstaltung in Kassel durchgeführt. Die Rückmeldungen, insbesondere auf den Industry-Workshop, waren sehr positiv. Beide Treffen wurden von Harald Drück als „Task Manager“ geleitet.

Wie weiter oben erläutert, erfolgte in der Subtask C die Leitung einer Arbeitsgruppe zur Erstellung eines Leitfadens für das Monitoring und die Berichterstattung von den Energieversorgungskonzepten mit hohen solaren Deckungsanteilen durch Stefanie Lott. Die Erarbeitung des Leitfadens wurde im 2. HJ 2022 abgeschlossen. Der Leitfaden wurde beim 4. Arbeitstreffen

der Task 66 vorgestellt im September 2022 in Kassel vorgestellt. Eine Veröffentlichung des Leitfadens wird im Rahmen der ersten Ergebnisse der Subtasks C im ersten Quartal 2023 erfolgen.

Ebenso erfolgte die Teilnahme von Harald Drück am Treffen des Executive Committees (ExCo) des Solar Heating and Cooling Programs (SHC) der Internationalen Energieagentur, das vom 03.-05. Dezember 2022 in Kapstadt (Südafrika) sowie als Online-Veranstaltung stattfand. Bei dem Treffen wurde von Harald Drück über die aktuellen Arbeiten der Task 66 berichtet. Zusätzlich wurden von ihm die entsprechenden, vom ExCo geforderten Berichte zur Task 66 erstellt.

Am 6. Februar 2023 fand das 5. Arbeitstreffen der Task 66 mit ca. 25 teilnehmenden Personen aus 9 verschiedenen Ländern als Online-Veranstaltung statt.

Am 7. Februar 2023 wurde der dritte Industry-Workshop mit 47 teilnehmenden Personen aus 10 verschiedenen Ländern ebenfalls als Online-Veranstaltung durchgeführt. Die Rückmeldungen, insbesondere auf den Industry-Workshop, waren sehr positiv. Beide Treffen wurden von Harald Drück als „Task Manager“ geleitet.

Ebenso erfolgte die Teilnahme vom Harald Drück am Treffen des Executive Committees (ExCo) des Solar Heating and Cooling Programs (SHC) der Internationalen Energieagentur, das am 14. und 15. Juni 2023 in Sophia Antipolis (Frankreich) stattfand. Bei dem Treffen wurde von Harald Drück über die aktuellen Arbeiten der Task 66 berichtet. Zusätzlich wurden von ihm die entsprechenden, vom ExCo geforderten Berichte zur Task 66 erstellt.

Am 9. Oktober 2023 erfolgte in Graz (Österreich) das 6. Arbeitstreffen der Task 66 mit ca. 17 teilnehmenden Personen aus 8 verschiedenen Ländern. Ebenfalls wurde am 9. Oktober 2023 in Graz (Österreich) der 4. Industry-Workshop der Task 66 mit 18 teilnehmenden Personen aus 7 verschiedenen Ländern durchgeführt.

Am 10. Oktober 2023 fand in Graz (Österreich) ein gemeinsamer Workshop von Task 66 und Annex 83 (Positive Energy Districts) des EBC (Energy in Buildings and Communities Programme) der IEA statt, der von 23 Personen aus 5 verschiedenen Ländern besucht wurde. Die Rückmeldungen, insbesondere zum Industry-Workshop und dem gemeinsamen Workshop mit Annex 83, waren sehr positiv.

Das Treffen der Task 66 und der entsprechende Industry-Workshop wurden von Harald Drück als „Task Manager“ geleitet. Der gemeinsame Workshop von Task 66 und Annex 83 wurden von Shokufeh Zamini, (AIT, Österreich) und Harald Drück gemeinsam geleitet.

Ergänzend arbeiten Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IGTE maßgeblich in der Subtask A bei der Definition von Bewertungsgrößen und Referenzgebäuden sowie in der Subtask C bei der Definition von ökonomischen und ökologischen Energieversorgungskonzepten mit hohen solaren Deckungsanteilen für den Gebäudebestand, Neubauquartiere und Kommunen und in der Subtask D im Hinblick auf die Beschreibung aktueller und zukünftiger Technologien mit.

Ebenso erfolgte vom 6. bis 8. November 2023 die Teilnahme vom Harald Drück am Treffen des Executive Committees (ExCo) des Solar Heating and Cooling Programs (SHC) der Internationalen Energieagentur, das als Online-Veranstaltung stattfand. Bei dem Treffen wurde von Harald Drück über die aktuellen Arbeiten der Task 66 berichtet. Zusätzlich wurden von ihm die entsprechenden, vom ExCo geforderten Berichte zur Task 66 erstellt.

6.4.2 Mitarbeit im Forschungsnetzwerk „EnergieWendeBauen“

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IGTE und der Fa. VCS haben während der Projektlaufzeit an folgenden Veranstaltungen des Forschungsnetzwerks „EnergieWendeBauen“ teilgenommen:

- Online-Treffen der AG-Sprecher/innen am 07.03.22 (online) - IGTE
- Projektleitungstreffen am 28.04.22 (online) - IGTE
- Kongress 9.-10.06.22 (Wuppertal und online) - IGTE
- Fokustreffen Trink(warm)wasserinstallation am 21.02.22 (online) - VCS
- Projektleitungstreffen am 10.11.22 (Petershagen und online) - IGTE
- Monitoringforum am 27.06.23 in Wuppertal; IGTE – Stefanie Lott
- Projektleitungstreffen am 26.04.23 in Dresden, Vorstellung des Projekts „Sol4City“ durch Bernd Hafner (Teilnehmerzahl ca. 200)
<https://ewb.innoecos.com/Group/Projektleitungstreffen/Pages/Start/Accordion>
- Teilnahme von Bernd Hafner (VCS) und Harald Drück (IGTE) an der Klausurtagung der Arbeitsgruppe 10 (Solarthermie-Technologie) des BMWi-Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen bzw. der Deutschen Solarthermie-Technologie-Plattform am 22. und 23. November 2023 in Allendorf

6.4.3 Sonstige Aktivitäten

Bei dem von der IEA Task 15 des „Photovoltaic Power System Programs“ (PVPS) online durchgeführten Workshop „BIPV beyond Task 15“ am 23.11.2021 wurde von Harald Drück über die Task 66 berichtet.

7. Verwertung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die wissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Erfolgsaussichten bzw. Verwertungsmöglichkeiten der Projektergebnisse erläutert. Der Zeithorizont des erwarteten Inkrafttretens der Verwertung orientiert sich am jeweils betrachteten Teilaspekt bzw. dem Zeitpunkt der Veröffentlichung der Ergebnisse. Ein Großteil der Verwertung beginnt erfahrungsgemäß mit dem Projektende.

Da sich die Verwertung der Ergebnisse für die beiden am Vorhaben beteiligten Projektpartner, d. h. das IGTE der Universität Stuttgart und die Fa. Viessmann Climate Solutions SE, teilweise signifikant unterscheidet, werden die einzelnen Aspekte der Verwertung für jeden Partner in einem separaten Abschnitt beschrieben.

7.1 Wissenschaftliche Verwertung

Eine Vielzahl der in dem hier vorgeschlagenen Forschungsvorhaben zu bearbeitenden Themen und Fragestellungen ist unter wissenschaftlichen Aspekten sehr anspruchsvoll. Hierzu gehören insbesondere die Entwicklung einer kostengünstigen und großserientauglichen Technologie für die Fertigung hocheffizienter, vakuumwärmegedämmter Warmwasserspeicher, die Erforschung der für eine Sensorik zur Bestimmung des Beladungszustands bzw. des Eisvolumens von Latentspeichern am besten geeigneten physikalischen Effekte sowie die Realisierung der entsprechenden Sensorik und auch die Entwicklung der Algorithmen für die adaptive und prädiktive Regelung des Gesamtenergieversorgungssystems. Um die in diesem Projekt aus wissenschaftlicher Sicht gewonnenen Erkenntnisse zugänglich zu machen, wurden zahlreiche Artikel in einschlägigen Fachjournals und Zeitschriften veröffentlicht (vgl. Abschnitt 6.2). Ebenso wurden Projektergebnisse auf Tagungen und Fachkonferenzen vorgestellt und diskutiert (vgl. Abschnitt 6.3). Eine weitere wichtige Maßnahme, um die Projektergebnisse mit der Fachwelt zu teilen, war die Mitarbeit in einschlägigen Gremien (vgl. Abschnitt 6.4). Nachfolgend wird auf die konkrete wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse durch die beiden deutschen Projektpartner IGTE und VCS eingegangen.

7.1.1 Wissenschaftliche Verwertung IGTE

Wesentliche Aspekte der wissenschaftlichen Verwertung durch das IGTE waren bzw sind:

- Die Durchführung von ca. zehn akademische Arbeiten, d.h. Bachelorarbeiten, Masterarbeiten, Studienarbeiten und Diplomarbeiten die in direktem Zusammenhang mit Teilaspekten des Vorhabens stehen
- 8 Veröffentlichungen in spezifischen Fachzeitschriften bzw. Journals
- 15 Präsentationen bei einschlägigen internationalen Konferenzen
- Initiierung, Leitung und maßgebliche Mitarbeit in der IEA SHC Task 66 „Solar Energy Buildings“

- Mitarbeit des IGTE im ESTTP (European Solar Thermal Technology Panel) in der RHC-TP (European Renewable Heating and Cooling Technology Platform). In diesem Zusammenhang wurde Dr. Harald Drück erneut in das Steering Committee der ESSTP gewählt.
- Präsentation von ausgewählten Projektergebnisse in diversen, vom IGTE durchgeführten Vorlesungen an der Universität Stuttgart
- Direkte Rückkopplung spezifischer Projektergebnisse in die Solarthermie- und Photovoltaikbranche, u. a. durch die aktive Mitarbeit in der Arbeitsgruppe 10 (Solarthermie-Technologie) des BMWK-Forschungsnetzwerks „EnergieWendeBauen“ bzw. der Deutschen Solarthermie-Technologieplattform (DSTTP)
- Initiierung des Forschungsprojekts SolKaN2.0 (Solare kalte Nahwärme der zweiten Generation; FKZ: 03EN6033A+B+C), das zum 01.01.2024 gestartet werden konnte
- Vorbereitung des Forschungsprojekts innoBeLs (Entwicklung und Bewertung von innovativen Behälterkonzepten für Latentspeicher in solaren kalten Nahwärmenetzen) mit avisiertem Starttermin zum Ende des Jahres 2024

7.1.2 Wissenschaftliche Verwertung VCS

Das Vorhaben hat für VCS zu einem deutlichen Aufbau an Wissen in vier verschiedenen Bereichen geführt:

1. Vorgänge im Eisspeicher beim Phasenwechsel
2. Aufbau einer Wärmedämmung für Heizwasser-Pufferspeicher der Effizienzklasse A
3. Regelungsverfahren, insbesondere modellprädiktive Regler (MPR bzw. MPC - Model Predictive Control)
4. Randbedingungen für photovoltaische Luft-Sole-Kollektoren in Wärmepumpen-Anlagen mit Eisspeicher

Ein Schwerpunkt des Vorhabens war die Entwicklung einer Sensorik zu Erkennung des Beladungszustands. Im Verlauf des Projekts mussten viele Ideen und Konzepte verworfen werden, da von einer falschen Vorstellung der Geometrie des entstehenden Eises ausgegangen wurde. Bei der Verbesserung der Wärmedämmung für Pufferspeicher der Effizienzklasse A ist es gelungen, ein weiter nutzbares Rechenmodell aufzubauen, um Konstruktionsentwürfe zu bewerten.

Während der ersten beiden Punkt nur von den deutschen Projektpartner bearbeitet wurde, sei an dieser Stelle explizit auf den fruchtbaren Austausch mit den österreichischen Partnern bei den Punkten 3 und 4 hingewiesen. So ist mit der Bereitstellung von Messdaten für Eisspeicher durch österreichische Partner die Validierung der numerischen Modelle des Eisspeichers viel früher und umfangreicher gelungen, als die bei Antragstellung absehbar war. Bei den MPR ergänzten sich die unterschiedlichen Schwerpunkte der Bearbeitung (österreichische Partner: Kurzzeitbetrachtungen, deutsche Partner: Kombination mit Langzeitbetrachtungen). Umge-

kehrt konnten die österreichischen Partner aus den Berichten und Wissen von VCS aus vergangenen Forschungsvorhaben zu Sorptionstechnologie profitieren (Entwicklung eines innovativen gasbetriebenen Zeolith-Heizgerätes, FKZ 0327435A).

Trotz der massiven Einschränkungen durch die Corona-Pandemie ist in Webkonferenzen und bei zwei physischen Projekttreffen (Graz 2020, Leverkusen 2022) ein guter Wissenstransfer gelungen. Eine einheitliche Definition der Bewertungsgrößen bzw. KPIs (Key Performance Indicators) führte zu einer besseren Vergleichbarkeit unterschiedlicher Systemansätze.

Im Vorhaben wurden drei Themen identifiziert. Diese haben jedoch eine so hohe Unsicherheit in der Umsetzung, dass sie durch Forschungsvorhaben untersucht werden bzw. werden sollen.

- Weiterentwicklung der kalten Netze
(das Projekt SolKan 2.0 FKZ 03EN6033C wurde am 01.01.2024 gestartet)
- Weiterentwicklung der photovoltaischen Luft-Sole-Kollektoren (ebenfalls SolKan 2.0)
- Weiterentwicklung der Eisspeicher-Behälter

7.2 Technische Verwertung

Aus technischer Sicht konnten im Projekt signifikante Fortschritte auf Komponentenebene im Bereich der Erforschung oder Verbesserung der untersuchten Technologien erzielt werden. Zu nennen sind unter anderem Arbeiten zur Fertigung hocheffizienter, vakuumgedämmter Warmwasserspeicher oder die Erforschung einer Alternative zu den herkömmlich eingesetzten Technologien zur Bestimmung des Beladungszustands von Latentspeichern, die einen sicheren, zerstörungsfreien Betrieb insbesondere von Eisspeichern ermöglichen. Auch die Optimierung des Gesamtsystems, beispielsweise durch die Entwicklung von Algorithmen für die adaptive und prädiktive Regelung, war Ziel des Projektes. Nachfolgend wird auf die konkrete technische Verwertung der Projektergebnisse durch die beiden deutschen Projektpartner IGTE und VCS eingegangen.

7.2.1 Technische Verwertung IGTE

im Hinblick auf die technische Verwertung sind für das IGTE vor allem die im Folgenden aufgeführten Aspekte relevant:

- Erweiterung des Wissens bzgl. der Reduktion von Wärmeverlusten von Warmwasserspeichern, u. a. durch den Einsatz von VIPs (Vakuumisolationspaneele)
- Generierung von umfangreichem neuem Wissen im Hinblick auf die Bestimmung des Beladungszustands von Eisspeichern,
- Entwicklung einer neuartigen, auf der Kombination von adaptiven und prädiktiven Ansätzen basierenden Regelung

7.2.2 Technische Verwertung VCS

Folgende Ergebnisse des Vorhabens haben einen technischen Fortschritt erbracht und werden schrittweise in die Umsetzung in den Anlagen gebracht.

Kurzfristig werden vorrangig Ergebnisse umgesetzt, die zu einem effizienteren und sichereren Anlagenbetrieb führen:

- Verbesserte Sensorik für den Beladungszustand
- Verbesserungen in der Planung / Planungsvorgaben
- Absicherung und Optimierung der Regelungsfunktion

Die Vorgänge des Phasenwechsels im Eisspeicher, insbesondere die Geometrie des Eises, konnten durch die umfangreichen und aufwendigen Messungen und optischen Untersuchungen im Labor und am Speichermodell besser erklärt werden. Kombiniert mit den Auswertungen von Anlagen im Betrieb konnte eine bessere, zuverlässige Sensorik ausgearbeitet werden. Die Untersuchungen im Labor wären ohne das Vorhaben nicht durchgeführt worden.

Insgesamt konnten wesentliche Beiträge für die Realisierung von kostengünstigeren, technologisch verbesserten, robusteren und effizienteren solaren kalten Nachwärmearanlagen in Kombination mit Eisspeichern erzielt werden.

Zur kurzfristigen Verwertung zählt auch die im Vorhaben prototypisch eingesetzte Entwicklung von Softwarefunktionen durch den modellbasierten Ansatz. Das in der Software-Entwicklung im Embedded-Bereich etablierte Verfahren (Bsp. Steuergeräte in der Automobilindustrie) ist für die in den Anlagen eingesetzten Speicher-Programmierbaren Steuerungen (SPS) nicht Stand der Technik. Der erfolgreiche Einsatz im Vorhaben und die gewonnene Erfahrung wird für andere Funktionsentwicklungen genutzt.

Weitere Ergebnisse des Vorhabens werden mittelfristig genutzt, hier sind für die Übertragung auf Anlagen oder Produkte noch weitere Maßnahmen (Produktentwicklung, Serienabsicherung) durchzuführen:

- Algorithmen zur Quellenauswahl und Energiemanagement
- Algorithmen zur Netzentlastung
- Übertragung der prototypischen Umsetzung von verbesserten Wärmedämmungen für thermische Speicher auf eine Serienproduktion
- Verbesserung der photovoltaischen Luft-Sole-Kollektoren für Großanlagen

7.3 Wirtschaftliche Verwertung

Leistungsflexible PVT-Hybridkollektoren, die gleichzeitig auch wirtschaftlich konkurrenzfähig sind, sind aktuell noch nicht am Markt etabliert. Ebenso wenig sind weder hocheffiziente Kurzzeitwärmespeicher noch saisonale thermische Energiespeicher mit einem vertretbaren Platzbedarf am Markt erhältlich. Auch eine modular aufgebaute, adaptive und prädiktive Regelung für die thermisch-elektrische Gesamtenergieversorgung von Gebäuden ist bisher nicht am Markt verfügbar. Die Arbeiten in diesem Projekt hatten das Ziel, die Marktetablierung dieser Produkte zu forcieren. Nachfolgend wird auf die konkrete wirtschaftliche Verwertung der Projektergebnisse durch die beiden deutschen Projektpartner IGTE und VCS eingegangen.

7.3.1 Wirtschaftliche Verwertung IGTE

Da das GTE als Universitätsinstitut nicht gewinnorientiert ist, ist ein entscheidender Indikator für den wirtschaftlichen Erfolg des IGTE das Einwerben neuer Forschungsprojekte. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist das am IGTE verfügbare fachspezifische Wissen sowie die einschlägigen Kompetenzen die aus der erfolgreichen Bearbeitung vorangegangener Forschungsprojekte resultieren. Im Hinblick auf das Projekt Sol4City ist durch die folgenden beiden Projekte gelungen:

- Initiierung des Forschungsprojekts SolKaN2.0 (Solare kalte Nahwärme der zweiten Generation; FKZ: 03EN6033A+B+C), das zum 01.01.2024 gestartet werden konnte
- Vorbereitung des Forschungsprojekts innoBeLs (Entwicklung und Bewertung von innovativen Behälterkonzepten für Latentspeicher in solaren kalten Nahwärmenetzen) mit avisiertem Starttermin zum Ende des Jahres 2024

7.3.2 Wirtschaftliche Verwertung VCS

Die direkte wirtschaftliche Nutzung der Ergebnisse des Vorhabens bezieht sich vorrangig auf die Eisspeicheranlagen. Die Sensorik für den Beladungszustand ist zum einen deutlich zuverlässiger als Lösungen, die vor dem Vorhaben eingesetzt wurden, und zudem noch um rund 50 % in den Kosten reduziert. Neuartige, verbesserte Regelungsverfahren (Effizienz, Zuverlässigkeit) wurden prototypisch umgesetzt und werden für die Weiterentwicklung der Seriensoftware genutzt. Weiterhin ist durch die Validierung der Rechenmodelle im Vorhaben eine deutlich verlässlichere Auslegung der Anlagen möglich. Eine Umsetzung der Ergebnisse im Dimensionierungstool wurde unabhängig vom Vorhaben durch das IGTE im direkten Auftrag von VCS durchgeführt. Während bei den Eisspeicher-Anlagen der wirtschaftliche und technische Vorteil der Entwicklungen direkt zu erkennen ist, muss für die Nutzung der Konzepte der verbesserten Wärmedämmung von thermischen Speichern eine neue Kostenbetrachtung durchgeführt werden. Die im Vorhaben zugrunde gelegte Basis 2019 hat sich so stark verschoben, dass die damals gesetzte Obergrenze der Kosten für eine Umsetzung in einem Serienprodukt neu bewertet werden muss.

Auch bei den wirtschaftlichen Aspekten sei die gute Zusammenarbeit mit den österreichischen Projektpartnern erwähnt: Der Einblick in die Produktionsstätten der österreichischen Partner Sonnenkraft, Kioto PV, GreenOneTec bei einem Projekttreffen hat auch zu engerer Kooperation und Austausch der Industriepartner geführt.

8. Zusammenfassung und Ausblick

8.1 Zusammenfassung

Laut der novellierten europäischen Gebäuderichtlinie dürfen ab 2021 nur noch Niedrigstenergiegebäude errichtet werden, welche ihren benötigten Energiebedarf aus erneuerbaren Energiequellen decken, die sich am Standort des Gebäudes oder in seiner unmittelbaren Umgebung befinden.

Diese Forderung der europäischen Union macht hochintegrierte Gesamtenergieversorgungskonzepte für Wärme und Strom notwendig. Die dafür benötigten Einzelkomponenten sind bisher nur zum Teil am Markt verfügbar. Neben den technologischen Lücken, wie z. B. die effektive saisonale Wärmespeicherung sowie flächeneffiziente kombinierte solarthermische und solarelektrische Erzeugertechnologien, sind auch keine übergeordneten, intelligenten Regelungssysteme am Markt, die alle Komponenten, Parameter und externen Einflussgrößen berücksichtigen und so das Gesamtsystem intelligent und adaptiv regeln können.

Die Wärmepumpentechnologie stellt ein weiteres Schlüsselement zur effizienten Wärmeversorgung von Gebäuden dar. Allerdings sind die bisher am Markt verfügbaren Anlagen und Geräte primär für eine dezentrale, individuelle Versorgung von kleineren Gebäuden entwickelt und optimiert worden. Die wärmepumpenbasierte Nutzung der Umweltwärme im großtechnischen Maßstab im urbanen Raum ist daher noch mit einer Vielzahl offener Fragen und entsprechendem Forschungs- und Entwicklungsbedarf verbunden.

Ziel des Forschungsvorhabens „Sol4City“ war die Entwicklung fehlender Schlüsselkomponenten wie effiziente Wärmespeicher und flächeneffiziente photovoltaische Luft-Sole-Kollektoren sowie intelligente Gesamtsystemregler, sowie deren Kombination mit bereits verfügbaren, anderen Komponenten wie Eisspeicher, kalten Nahwärmenetzen und Wärmepumpen zu hocheffizienten Gesamtsystemen.

Basierend auf einer Recherche von Herstellungsverfahren für die Wärmedämmung von Warmwasserspeichern mit der Energieeffizienzklasse A nach der EU-Verordnung Nr. 812/2013 wurde ein detaillierter technischer und wirtschaftlicher Anforderungskatalog erstellt und Lösungen zur Erfüllung dieser Anforderungen skizziert. Daraufhin wurden Simulationsmodelle von Warmwasserspeichern mit unterschiedlichen Volumina und unterschiedlichen Wärmedämmungen im Simulationsprogramm COMSOL Multiphysics erstellt und validiert. An diesen Modellen wurde eine Prüfung der Warmhalteverluste des Speichers mit Wärmedämmung nach DIN EN 12897:2020 simuliert. Dadurch konnten Wärmedämmungen identifiziert und dimensioniert werden, welche die Ziele aus dem Anforderungskatalog möglichst weitgehend erreichen. Von zwei dieser Wärmedämmungen wurden daraufhin Funktionsmuster gefertigt. Diese wurden an einem Prototyp-Speicher mit einem Speichervolumen von 950 L angebracht, um die Handhabbarkeit der Wärmedämmung beurteilen zu können und um eine Prüfung der Warmhalteverluste nach DIN EN 12897:2020 durchzuführen. Bei Wärmedämmung 1 besteht die Mantelwärmedämmung vorwiegend aus aufklebbaren, schaumkaschierten Vakuumisulationspaneelen (VIPs) und grafithaltigem expandiertem Polystyrol (GEPS, Handelsname u. a. „Neopor“).

Bei Wärmedämmung 2 setzt sich die Mantelwärmedämmung vorwiegend aus mit Pentan aufgeschäumtem Polyurethanhartschaum (PUR) und darin eingeschäumten VIPs zusammen. Bei beiden Wärmedämmungen wird Polyesterfaservlies (PFV) zur Vermeidung Konvektion in Hohlräumen und Lücken der Wärmedämmung und für die Wärmedämmung des Bodens verwendet. Als Deckelwärmedämmungen wurden PFV, PUR, sowie Kombinationen aus GEPS und VIP mit PFV simuliert und geprüft. Die Ergebnisse der Speicherprüfungen konnten die Simulationsergebnisse weitgehend bestätigen. Somit können mit beiden Wärmedämmungen die Anforderungen hinsichtlich der Warmhalteverluste erreicht werden.

Für die Wärmedämmung 1 wird ein geringer Aufwand bzgl. der Herstellung, des Transports und des Recyclings erwartet, während bei Wärmedämmung 2 der Aufwand hinsichtlich der Materialkosten und der Anbringung der Wärmedämmung durch Installateure geringer ist. Da die Wärmedämmungen für den gleichen Nutzen hinsichtlich der Wärmedämmwirkung ausgelegt wurden, unterscheidet sich dieser nicht.

Bei den Latentspeichern für Anergienetze konnten in mehreren Bereichen relevante Fortschritte erzielt werden:

- Es konnte gezeigt werden, dass im Anwendungsfall in Anergienetzen mit PVT-Hybridkollektoren oder Luft-Sole-Kollektoren im mitteleuropäischen Klima (Standort Potsdam) das Speichermedium Wasser mit einem Phasenwechsel bei 0 °C schon einen nahezu optimalen Wert für die Phasenwechseltemperatur hat.
- Für die Bestimmung des Beladungszustands in den Latentspeichern wurde eine zuverlässige, ausfallsichere Messtechnik identifiziert und erprobt. Dazu wurden umfangreiche Versuchsreihen im Labor, an einem Versuchsspeicher sowie an Versuchsanlagen durchgeführt.
- Unterschiedliche Modelle des Latentspeicher konnten an Speichern mit Volumina von 800 m³ validiert werden. Dazu zählt auch ein Modell, welches ursprünglich für ein 10 m³ Eisspeicher entwickelt wurde und in einem Dimensionierungstool Anwendung findet. Die Modellierung und Auslegung von Eisspeichern werden dadurch auf eine deutlich breitere, validierte Basis gestellt.

Die solarthermischen Wärmequellen für Anergienetze mit dezentralen Wärmepumpen wurden sowohl in Messungen als auch in CFD-Simulationen betrachtet. Es bestätigte sich bei den Messungen die Erwartung, dass die bislang angewendeten Modelle aus den Kollektornormen (u.a. ISO 9806) für die Abbildung von volumetrischen Luft-Wärmeübertragern nur bedingt geeignet sind. Trotzdem ist es im Vorhaben gelungen, einen Vergleich von verschiedenen photovoltaischen Luft-Sole-Kollektoren durchzuführen. Im Ergebnis konnte gezeigt werden, dass die direkten solaren Gewinne aus den Kollektoren für diesen Anlagentyp von untergeordneter Bedeutung sind, während ein sehr hoher Wärmedurchgang für Gewinne aus der Außenluft anzustreben ist.

Gemeinsam mit den Partnern des österreichischen Sol4City Projekts konnte ein Standard-Gebäude für eine Vergleich festgelegt werden. Dies erlaubt über das einzelne Teilvorhaben hinaus einen besseren Vergleich der Ergebnisse.

Für die im deutschen Teilprojekt betrachteten Gesamtsysteme mit Anergienetz, Latentspeicher, photovoltaischen Luft-Sole-Kollektoren und dezentralen Wärmepumpen wurden Anforderungen an das Gebäude im Bezug auf die Heiz- und Kühlflächen sowie für die Anlagentechnik definiert. Es zeigt sich bei der detaillierten Betrachtung der Systeme, dass insbesondere die Gebäudekühlung bei den Anergienetzen, die (bedingt durch den Eisspeicher) auch unter 0 °C betrieben werden, eine erhöhte Aufmerksamkeit in der Planung verlangt. Entsprechende Vorgaben wurden ausgearbeitet.

Im Rahmen der Modellierung des Gesamtsystems konnte die entwickelte Regelungsstrategie direkt in Form einer Co-Simulation in die Systemsimulation integriert werden. Dies ermöglichte die Überprüfung der Funktionsweise der Regelung auch bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen.

Die Ergebnisse der Anlagensimulation konnten zeigen, dass die entwickelte Regelung ein sehr effizientes Zusammenspiel der Einzelkomponenten ermöglicht. Das Optimierungspotential einer gezielten saisonalen Betriebsführung des Eisspeichers konnte unter Verwendung der auch in den realen Anlagen verwendeten, neu entwickelten Regelung sehr viel deutlicher aufgezeigt werden als unter Verwendung einer ebenfalls abgebildeten vereinfachten Regelung. Aufgrund der langen Rechenzeiten der Co-Simulation war zur Durchführung einer großen Anzahl an Simulationen die Verwendung der vereinfachten Regelung notwendig.

Für sämtliche zentralen Komponenten wie z.B. PV-Module, Sonnenkollektoren, hocheffizienter Warmwasserspeicher, Latentspeicher, Anergienetz, Stromspeicher, Wärmepumpe und ggf. Elektrofahrzeuge wurden die entsprechenden Regelaufgaben und Schnittstellen definiert. Die Festlegungen erfolgten zusammen mit den österreichischen Projektpartnern, so dass sich weitgehend alle in „Sol4City“ betrachteten Komponenten wiederfinden und die Schnittstellen einheitlich bleiben.

Die für den Betrieb einer Eisspeicheranlage notwendigen Regelaufgaben wurden in einem Pflichtenheft zusammengefasst. Die Umsetzung der Regelaufgaben erfolgte in Form eines Zustandsautomaten. Dieser Zustandsautomat wurde sowohl in den realen Anlagen als auch in einer Co-Simulation als Regelung des Gesamtsystems verwendet.

Zur Optimierung der Regelalgorithmen wurde das erarbeitete Anlagenmodell verwendet und eine modellprädiktive Regelung (MPR) zur Reduzierung des elektrischen Energiebedarfs implementiert. Bisher wurde mittels MPR entweder eine Reduzierung des Energiebedarfs bei gleichzeitiger Reduzierung des Komforts oder eine Erhöhung des Energiebedarfs bei gleichzeitiger Verbesserung des Komforts erreicht. Nach den bisherigen Ergebnissen wird es als wahrscheinlich eingeschätzt, dass eine weitere Anpassung der Gewichtungsfaktoren der unterschiedlichen Einflussgrößen in der MPR eine Verringerung des Energiebedarfs bei gleichzeitig gleichbleibendem Komfort bewirken kann. Die bisherigen Untersuchungen bzgl. eines adaptiven Regelungsanteils haben wichtige Erkenntnisse bzgl. einer optimalen saisonalen Betriebsführung des Eisspeichers ergeben. Diese Erkenntnisse konnten bisher nicht in Verbindung mit der entwickelten MPR angewandt und geprüft werden.

Die Co-Simulation unter Verwendung der realen Regelung in Form des Zustandsautomaten wurde auch zur Validierung der Regelalgorithmen verwendet. Der Vergleich mit der Systemsi-

mulation unter Verwendung einer vereinfachten Regelung zeigt, dass die entwickelte Regelung ein sehr effizientes Zusammenspiel der einzelnen Komponenten sowie eine hohe JAZ_{Gen} des Systems bewirkt.

Die mittels Systemsimulationen ermittelten Ergebnisse zeigen, dass die beispielhaft verwendete Anlage 1 eine Lastüberschreitung um den Faktor 1,5 bzgl. des Wärme- und Kältebedarfs in der Menge ohne Anpassung der Dimensionierung ermöglicht. Hinsichtlich der maximalen Heizleistung ist eine Überschreitung um den Faktor 1,3 und der maximalen Kühlleistung um den Faktor 1,5 möglich. Bei größeren Leistungsüberschreitungen ist eine Anpassung der Dimensionierung der einzelnen Komponenten notwendig.

Durch die Vorstellung der Projektergebnisse auf zahlreichen nationalen und internationalen Tagungen und die Veröffentlichung mehrerer Beiträge in einschlägigen Journals und Fachzeitschriften konnten die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse einem breiten Fachpublikum zugänglich gemacht werden. Ein weiterer fachlicher Austausch konnte durch die Mitarbeit in der IEA Task 66 und im Executive Committee der SHC erreicht werden.

8.2 Ausblick

Das Vorhaben hat wichtige Impulse für die Entwicklung einer nachhaltigen Wärmeversorgung gegeben. Kalte Nahwärmenetze sind ein wichtiges Element zur Ausstattung der Gebäude im urbanen Raum, da gerade hier die Erschließung anderer Quellenanlagen schwierig ist. Im Vorhaben konnte die Nutzung von thermischen Speichern auf der Quellenseite (Latentspeicher) und der Verbrauchsseite (Wärmespeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung) voran gebracht werden. Die Entwicklung und systematische Absicherung eines Messverfahrens zur Beladungszustandsmessung des Latentspeichers trägt erheblich zu Betriebssicherheit der Anlagen bei. Es wurden Standards in der Regelung der Gesamtanlage geschaffen, die im Betrieb eine übergeordnete Optimierung erlauben (Entlastung des elektrischen oder thermischen Netzes, minimaler elektrischer Energieverbrauch, maximaler Komfort für die Nutzer, ...). Die Arbeiten wurden umfassend veröffentlicht sowie in Gremien der Internationalen Energieagentur und des Forschungsnetzwerks Energiewendebauen eingebracht. Die Vielzahl von begleitenden studentischen Arbeiten im Rahmen des Vorhabens hat zur Verbreitung des Wissens in der Lehre beigetragen sowie junge Menschen an die Herausforderungen der Wärmewende herangeführt.

Möglichkeiten zu Weiterentwicklung von Komponenten (Latentspeicher – eingereichte Skizze zum Forschungsvorhaben InnoBeLs) sowie des Gesamtsystems (laufendes Forschungsvorhaben SolKaN 2.0, FKZ 03EN6033A/B/C) wurden identifiziert und entsprechende Projekte initiiert.

Die konkreten Ergebnisse des Vorhabens werden künftig schrittweise in die Nutzung übernommen (Sensorik der Latentspeicher, Regelungsverfahren für Anlagen mit Latentspeicher in kalten Nahwärmenetzen) oder für eine weitere Industrialisierung vorbereitet (Vakuumdämmung für Wärmespeicher).

Die internationale Zusammenarbeit sowohl in der IEA Task 66 als auch insbesondere mit den österreichischen Partnern hat dem Projekt einen wertvollen Charakter verliehen. Verschiedene

Lösungsansätze und Ideen wurden offen ausgetauscht und diskutiert, neue Lösungsansätze sind entstanden. Eine vergleichbare internationale Zusammenarbeit sollte bei Forschungsvorhaben noch stärker angeregt werden.

Danksagung

Das Verbundforschungsprojekt „Sol4City (Entwicklung integrierter solarer Versorgungskonzepte für klimaneutrale Gebäude der „Stadt der Zukunft“) wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über den Projektträger Jülich (PTJ) mit den Förderkennzeichen 03ETW019A (IGTE, Universität Stuttgart) und 03ETW019B (Viessmann Climate Solutions SE) gefördert. Das Teilprojekt der österreichischen Partner wurde durch das österreichische Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie gefördert.

Die Autorinnen und Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts.

Literatur

- [1] *Zach, F.*: Innovative Konzepte zur Versorgung großvolumiger städtischer Gebäude/Quartiere mit PV und Geothermie – Ein Projektbericht im Rahmen des Programms Stadt der Zukunft. Urban pv+geotherm. Österreichische Energieagentur, Wien Ausgabe Februar 2016.
- [2] *Abelein, U.; Knirsch, A.; Drück, H.*: CO2 Reduktion bei der Energieversorgung zukünftiger Neubaugebiete mit "Kalter Nahwärme". In: *Conexio GmbH, P.* (Hrsg.): Tagungsband zum Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2019, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2019.
- [3] *Miara et.al.*: Wärmepumpen Effizienz, Messtechnische Untersuchung von Wärmepumpenanlagen zur Analyse und Bewertung der Effizienz im realen Betrieb (FKZ 0327401A) – Abschlussbericht. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE Ausgabe 2011.
- [4] *Poppei, J.; Masset, O.; Wagner, R.*: Grenzabstände bei Erdwärmesonden, Fachstelle Energie und Gebäudetechnik. Amt für Hochbauten der Stadt Zürich Ausgabe 2017.
- [5] *Steinke, G.; Genkinger, A.; Kobler, R.L. et al.*: Integration von Luft/Wasser-Wärmepumpen im städtischen Kontext. Fachhochschule Nordwestschweiz Ausgabe 2018.
- [6] *Henning, H.-M.; Palzer, A.*: 100% erneuerbare Energien für Strom und Wärme in Deutschland – Im Rahmen von Eigenforschung erstellte Studie. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg Ausgabe November 2012.
- [7] *Gunczy, S.; Enzinger, P.; Felberbauer, K.-P. et al.*: Thermostank – Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung eines marktfähigen Wasserwärmespeichers mit Vakuumisolation – Thermoskannenspeicher. Endbericht. Klima- und Energiefonds der österr. Bundesregierung, Graz Ausgabe November 2012.
- [8] *Lang, S.; Gerschitzka, M.; Bauer, D. et al.*: Thermal conductivity of vacuum insulation materials for thermal energy stores in solar thermal systems. *Energy Procedia* 91 172-182 Ausgabe 2016.
- [9] *Minder, S.; Wagner, R.; Mühlebach, M. et al.*: Eisspeicher-Wärmepumpen-Anlagen mit Sonnenkollektoren – Technologiestudie. Schlussbericht. Bundesamt für Energie Ausgabe September 2014.
- [10] *Streit, D.*: Freie Konvektion am horizontalen Rohr in einer Kies/Wasser-Schüttung mit Bildung und Schmelzen von Eis. Dissertation. ITW Universität Stuttgart Ausgabe 1996.
- [11] *Bauer, D.; Drück, H.; Lang, S. et al.*: Weiterentwicklung innovativer Technologien zur solaren Nahwärme und saisonalen Wärmespeicherung (WinterSunN) – Forschungsbericht zum BMWi-Vorhaben. Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS), Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Universität Stuttgart, Stuttgart Ausgabe 2016.
- [12] *van Helden, W.*: COMTES - Combined development of compact seasonal solar thermal storage systems – 7th Framework Programme for Research and Technological Development (2007 - 2014). 2016.

-
- [13] *Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE: IntegraTE - Initiative zur Verbreitung vom PVT-Kollektoren und Wärmepumpen im Gebäudesektor – Projekthomepage*, <https://wp-monitoring.ise.fraunhofer.de/integrate/german/index/index.html> [Zugriff am: 23.08.2024].
- [14] *Photovoltaisch-thermischer Sonnenkollektor – Wikipediaartikel*, https://de.wikipedia.org/wiki/Photovoltaisch-thermischer_Sonnenkollektor [Zugriff am: 23.08.2024].
- [15] *Chow, T.T.: A Review on Photovoltaic/Thermal Hybrid Solar Technology (2010). In: : Applied Energy 87 2, 2010, S. 365-379.*
- [16] *Fischer, S.; Sommer, K.; Drück, H. et al.: Innovativer PVT-Kollektor mit variabel steuerbarer elektrischer und thermischer Leistung. In: : Tagungsband zum 26. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2016.*
- [17] *Henning, H.-M.: Die Entwicklung des Energiesystems und die Rolle netzdienlicher Gebäude. Berliner Energietage – Workshop „Netzdienliche Gebäude und Quartiere, 2016.*
- [18] *Geimer, K.: Marktanalyse Solarregler – durchgeführt im Projekt "KoST – Kostenreduktion in der Solarthermie durch standardisierte Komponenten und Schnittstellen" Ausgabe 2017.*
- [19] *SolSys: Analyse und Optimierung solarer Energieversorgungssysteme; FKZ 032 5558 A+B; gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) über den Projektträger Jülich (PTJ) Ausgabe 2018.*
- [20] *Paschke, F.; et al.: Modellprädiktive Einzelraumregelung auf Basis empirischer Modelle. Fraunhofer IIS/EAS, Institut für Integrierte Schaltungen, Institutsteil Entwicklung Adaptiver Systeme Ausgabe 2016.*
- [21] *IGTE: Measurements carried out by the Institute for Building Energetics, Thermotechnology and Energy Storage of the University of Stuttgart, 2024, <https://www.igte.uni-stuttgart.de/en>.*
- [22] *Urbanek, T.; Lang, S.; Beyer, R.: Oberirdische Speicher in Segmentbauweise für Wärmerversorgungssysteme – OBSERW – Abschlussbericht zum Verbundvorhaben. ISBN 3-9811424-8-9 Ausgabe 2018.*
- [23] *Morgan Advanced Materials: Data sheet Vacupor NT, Windsor, UK Ausgabe 2017.*
- [24] *Lang, S.: Messung und Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen für vakuumwärmedämmte Warmwasserspeicher – doctoral thesis. University of Stuttgart Ausgabe 2022.*
- [25] *Viessmann Deutschland GmbH: Warmwasserbereitung Speicher-Wasserwärmer Vitocell, leaflet, Allendorf Ausgabe 2020.*
- [26] *Fischer, S.; Drück, H.; Ullmann, J. et al.: Verbundprojekt: Entwicklung eines universellen modularen Wärmespeichers und dessen Erprobung in Mehrfamilienhäusern (UniSto) – FKZ: 0325546B. Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen, Stuttgart Ausgabe 2016.*

-
- [27] *Sutheesh, P.M.; Chollackal, A.*: “Thermal performance of multilayer insulation: A review” Ausgabe 2018.
- [28] *Bo, W.; Ruoyin, I.; Hong, C.*: Characterization and monitoring of vacuum pressure of tank containers with multilayer insulation for cryogenic clean fuels storage and transportation, *Applied Thermal Engineering*, vol. 187 Ausgabe 2021.
- [29] *Gottschald, J., Adam, M., Marx, H.*: „Heiztechnik - Langzeitmessergebnisse eines vakuumisolierten Warmwasserspeichers“. *In: HLH Heizung – Lüftung – Haustechnik* (2014), vol. 64, issue 4, pp. 20 – 25.
- [30] *Vakutank*: Research Project “Vakutank - Entwicklung eines Hochvakuum-Wärmespeichers mit maximierter thermischer Isolation, erzeugt durch eine reine hochdichte Vakuumdämmung, eine reflektierende Oberflächenbeschichtung und neuartige Stabilisierungs- und Rohrleitungssysteme”, project duration 01/2019 – 06/2021, Düsseldorf Ausgabe 2019.
- [31] *Gerschitzka, M.; Lang, M.; Rieder, M.e.a.*: Abschlussbericht zum BMWI-Forschungsprojekt Entwicklung großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Dämmung zur Außenaufstellung: Förderkennzeichen 0325992A+B – Project duration: 01/2013 – 12/2015. Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen Ausgabe 2016.
- [32] *Beikircher, T.; Buttinger, F.; Demharter, M.e.a.*: Abschlussbericht Superisolierter Heißwasser-Langzeitwärmespeicher: Fkz: 0325964A. ZAE Bayern, Garching Ausgabe 2013.
- [33] *Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau GmbH*: Vacutherm, 2024, <https://pufferspeicher-sirch.de/start>.
- [34] *Schwab, H.*: Vakuumisoliationspaneel-Gas- und Feuchteintrag sowie Feuchte- und Wärmetransport – doctoral thesis. Julius-Maximilians-Universität, Würzburg Ausgabe 2004.
- [35] *European Commission*: EPRESL - Europäische Produktdatenbank für die Energieverbrauchskennzeichnung – Warmwasserspeicher für Warmwasserbereiter (5 965), 2024, <https://eprel.ec.europa.eu/screen/product/hotwaterstoragetanks>.
- [36] *Springer Verlag*: VDI-Wärmeatlas. Springer Verlag Ausgabe 2013.
- [37] *Lang, S.; Drück, H.; Bestenlehner, D.*: Chapter 8 - Ultrahigh temperature thermal insulation. *In: Datas, A.* (ed.): Ultra-high temperature thermal energy storage, transfer and conversion, Woodhead publishing series in energy. Woodhead Publishing, Duxford, 2021.
- [38] *HANSEPACK24*: Polyesterfaservlies, 2023, <https://hansepack24.com/100-g-m2-Polsterwatte-Vlies-Vlieswatte-Diolenwatte-160cm-breit> [Zugriff am: 03.04.2023].
- [39] *Sprengard, C.; Holm, A.H.*: Numerical examination of thermal bridging effects at the edges of vacuum-insulation-panels (VIP) in various constructions. *In: Energy and Buildings* 85 (2014), Heft 4, S. 638-643. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.027>.
- [40] *Sheridan*: PUR, 2023, <https://hansepack24.com/100-g-m2-Polsterwatte-Vlies-Vlieswatte-Diolenwatte-160cm-breit> [Zugriff am: 20.04.2023].

-
- [41] *Wagner, K.*: Simulation und Optimierung des Wärmedämmvermögens von PUR-Hartschaum. Wärme- und Stofftransport sowie mechanische Verformung. Universität Stuttgart. Institut für Kunststoffprüfung und Kunststoffkunde., Stuttgart Ausgabe 2002.
- [42] *Gianprimo Vaghi & Figli S.R.L.*: EPS, 2022, <https://vaghisrl.it/materiali-isolanti/eps/> [Zugriff am: 26.10.2022].
- [43] *Benedix, R.*: Bauchemie für das Bachelor-Studium. Springer, Wiesbaden, 2017.
- [44] *Enders, E.; Kleser, J.*: Wärmedämmstoffe aus Polyurethan-Hartschaum Herstellung-Anwendung-Eigenschaften. IVPU-Industrieverband, Stuttgart, 2008.
- [45] *Thyssenkrupp Materials Schweiz AG*: Werkstoffdatenblatt Messing, Düsseldorf Ausgabe 2020.
- [46] DIN EN 12667:2001: Bestimmung des Wärmedurchlasswiderstandes nach dem Verfahren mit dem Plattengerät und dem Wärmestrommessplatten-Gerät. DIN EN,
- [47] *Brereton, G.; Emanuel, JR, R.M; Lomax, R.e.a. (Hrsg.)*: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry: Polyurethanes. Wiley-VCH, Weinheim, 2019.
- [48] *Kemona, A.; Piotrowska, M.*: Polyurethane Recycling and Disposal: Methods and Prospects. In: *Polymers*, Vol. 12 (2020), Iss. 8. <https://doi.org/10.3390/polym12081752>.
- [49] *Moro, J.L.; Weißbach, M.; Schlaich, J.*: Baukonstruktion – vom Prinzip zum Detail – Band 1 Grundlagen. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2021.
- [50] *Eyerer, P.*: Polymer Engineering 3 – Werkstoff- und Bauteilprüfung, Recycling, Entwicklung. Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [51] *Gama, N.V.; Ferreira, A.; Barros-Timmons, A.*: Polyurethane Foams: Past, Present, and Future. In: *Materials* (Basel, Switzerland), Vol. 11 (2018), Iss. 10. <https://doi.org/10.3390/ma11101841>.
- [52] *Deutsches Architektenblatt*: Recycling von Dämmung aus Kunststoff: EPS, XPS, PU, 2023, <https://www.dabonline.de/2023/02/01/recycling-daemmung-material-kunststoff-eps-xps-pu-styropor-entsorgung/> [Zugriff am: 08.04.2024].
- [53] *Orth, P.; Bruder, J.; Rink, M.*: Kunststoffe im Kreislauf – Vom Recycling zur Rohstoffwende. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2022.
- [54] *Karami, P.; Al-Ayish, N.; Gudmundsson, K.*: A comparative study of the environmental impact of Swedish residential buildings with vacuum insulation panels. In: *Energy and Buildings* 109 (2015), Heft 4, S. 183-194. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.10.031>.
- [55] *Gahleitner, M.; Paulik, C.*: Polypropylene. In: : Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2000, S. 1-44.
- [56] *Umweltbundesamt*: Förderung einer hochwertigen Verwertung von Kunststoffen aus Abbruchabfällen sowie der Stärkung des Rezyklateinsatzes in Bauprodukten im Sinne der europäischen Kunststoffstrategie, 2021, <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/foerderung-einer-hochwertigen-verwertung-von> [Zugriff am: 11.04.2024].
- [57] *Vliesstoffe – Rohstoffe, Herstellung, Anwendung, Eigenschaften, Prüfung.* Wiley-VCH, Weinheim, 2012.

-
- [58] Dämmstoffe – Grundlagen, Materialien, Anwendungen, Edition Detail, Institut f. Intern. Architektur-Dok, München, 2007.
- [59] *Fouad, N.A. (Hrsg.): Bauphysik-Kalender 2017 – Schwerpunkt - Gebäudehülle und Fassaden*, Bauphysik-Kalender, Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2017.
- [60] *Deutsche Umwelthilfe: Innovationen in der Wärmedämmung: Eine Broschüre für interessierte Praktiker:innen*, 2021, <https://www.duh.de/projekte/nachhaltige-waermedaem-mung/> [Zugriff am: 11.04.2024].
- [61] *Eyerer, P.: Polymer Engineering 1 – Einführung, Synthese, Eigenschaften*. Springer Berlin / Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2020.
- [62] DIN EN ISO 20988: Luftbeschaffenheit - Leitlinien zur Schätzung der Messunsicherheit. DIN EN ISO, Ausgabe September 2007.
- [63] VDI 2222 Blatt 1: Konstruktionsmethodik - Methodisches Entwickeln von Lösungsprinzipien. VDI, Ausgabe Juni 1997.
- [64] *TYFOROP Chemie GmbH: Technische Information TYFOCOR Konzentrat – Frost- und Korrosionsschutz für Heizungs-, Klima- und Kühlanlagen sowie Wärmepumpen*. TYFOROP Chemie GmbH, Hamburg.
- [65] VDI 4201 Blatt 1: Mindestanforderungen an automatische Mess- und elektronische Auswerteeinrichtungen zur Überwachung der Emissionen - Digitale Schnittstelle - Allgemeine Anforderungen. VDI, Ausgabe September 2010.
- [66] *The MathWorks, I.: MATLAB*, <https://de.mathworks.com/products/matlab.html> [Zugriff am: 13.09.2024].
- [67] *Lott, S.; Fischer, S.; Drück, H. et al.: Quasi-Dynamic Testing of Air-Brine-Collectors and Numerical Simulations of a Cold District Heating Network*. In: International Solar Energy Society (Hrsg.): EuroSun2022 Proceedings, 2022.
- [68] TRNSYS – Transient System Simulation Tool, <https://www.trnsys.com/> [Zugriff am: 13.09.2024].
- [69] Solar-Institut Juelich: CARNOT Toolbox Ver. 7.2, Feb/2021, for Matlab/Simulink R2018b, <https://www.fh-aachen.de/forschung/solar-institut-juelich/carnot>.
- [70] *Lott, S.; Drück, H.; Hafner, B.e.a.: Vergleich von Modellen zur numerischen Berechnung von Eisspeichern*. In: : Tagungsband zum 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2022.
- [71] *Winteler, C.; Dott, R.; Afjei, T. et al.: Heat Pump, Soalr Energy and Ice Storage Systems - Modelling and Seasonal Performance*. In: : Tagungsband 11. IEA Heat Pump Conference, Montréal (Québec), Canada, 2014.
- [72] *Hornberger, M.: Solar unterstützte Heizung und Kühlung von Gebäuden – Forschungsberichte des Deutschen Kälte- und Klimatechnischen Vereins, Nr. 47*. Diss. ITW, Uni Stuttgart, Stuttgart Ausgabe 1998.

-
- [73] *Solar Energy Laboratory; Transolar Energietechnik GmbH; Centre Scientifique et Technique du Bâtiment et al.*: TRNSYS 18 - Mathematical Reference - Volume 4. Solar Energy Laboratory; Transolar Energietechnik GmbH; Centre Scientifique et Technique du Bâtiment et al. Ausgabe 2018.
- [74] *Stegmann, M.; Bertram, E.; Rockendorf, G.e.a.*: Model of an unglazed photovoltaic thermal collector based on standard test procedures. Institut für Solarenergieforschung Hameln/Emmerthal Ausgabe 2011.
- [75] *Haller, M.; Perers, B.; Bale, C.e.a.*: TRNSYS Type 832 v5.00 "Dynamic Collector Model by Bengt Perers": Updated Input-Output Reference. Hochschule für Technik Rapperswil - Institut für Solartechnik Ausgabe 2012.
- [76] *Jonas, D.; Lämmle, M.; Theis, D.e.a.*: Performance modeling of PVT collectors: Implementation, validation and parameter identification approach using TRNSYS Type 835 – In: Solar Energy (2019), Heft 193.
- [77] Solarenergie - Thermische Sonnenkollektoren - Prüfverfahren (ISO 9806:2017 Ausgabe 2017.
- [78] Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile - Kollektoren - Teil 1: Allgemeine Anforderungen Ausgabe 2006.
- [79] Solarenergie – Thermische Sonnenkollektoren – Prüfverfahren (ISO 9806:2014). Ausgabe 2014.
- [80] *Duffie, J.A.*: Solar engineering of thermal processes. Wiley, Hoboken, 2013.
- [81] *Kabelac, S.; Vortmeyer, D.*: K1 Strahlung technischer Oberflächen, Ausgabe 2013.
- [82] *Fink, C.e.a.*: Vorgefertigte Fassadenelemente mit maximal integrierten HVAC-Komponenten und -Systemen zur Bestandssanierung – Projektnummer: 843945. AEE - Institut für Nachhaltige Technologien und Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH Ausgabe 2017.
- [83] <https://www.uni-kassel.de/maschinenbau/de/institute/ite/fachgebieteleitung/solar-und-anlagentechnik/downloads.html> – Zugriff 17.01.2021.
- [84] <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/> – Zugriff 17.01.2021.
- [85] <https://www.bhkw-Infozentrum.de/richtlinien/vdi-4655-referenzlastprofile-von-ein-und-mehrfamilienhaeusern-fuer-kwk-anlagen.html> – Zugriff 17.01.2021.
- [86] *Pflugradt, N.; Platzer, B.*: Verhaltensbasierter Lastprofilgenerator für Strom- und Warmwasser-Profil. In: *Vajen, K.* (Hrsg.): Thermische Solarenergie – 22. Symposium ; 09. bis 11. Mai 2012, Kloster Banz, Bad Staffelstein. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut, Wissen für Profis. Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI), Regensburg, 2012, S. 250-251 (Kurzfassung).
- [87] <https://www.loadprofilgenerator.de/references/> – Zugriff 17.01.2021.
- [88] *The University of Winnipeg*: Monitoring Driving Behaviour for Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV) Research – <http://auto21.uwinnipeg.ca/index.html>. Zugriff: 17.01.2021. The University of Winnipeg.

- [89] AwSV: Verordnung über Anlagen zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen – <https://www.gesetze-im-internet.de/awsv/BJNR090500017.html>. Zugriff 14.01.2022. AwSV.
- [90] *Rühling et al.*: Solarthermie2000plus: Entgasung von Solarkreisläufen und Bestimmung der zur Auslegung erforderlichen Stoffdaten, BMU, FKZ: 0325951A – https://tu-dresden.de/ing/maschinenwesen/iet/gewv/forschung/forschungsprojekte/copy_of_archiv. Zugriff 14.01.2022 Ausgabe 2013.
- [91] <https://www.waermepumpe.de/normen-technik/sg-ready/> – Zugriff am 09.01.2023.
- [92] *Joint Research Centre (JRC), Europäische Kommission*: Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/ [Zugriff am: 22.08.2024].
- [93] *Deutscher Wetterdienst*: Monatlicher Klimastatus Deutschland September 2023. DWD, Geschäftsbereich Klima und Umwelt, Offenbach Ausgabe 2023.
- [94] Stateflow Toolbox für Matlab-Simulink, <https://de.mathworks.com/help/stateflow/index.html> [Zugriff am: 30.01.2021].

Anhang A: Beschreibung Geräteschnittstelle am Beispiel Wärmepumpe

Geräteschnittstelle der Level C1 und C2

Control Level	Activity	Velocity	Temporal Resolution	Purpose	Description
<i>Basic (C1) / Standard (C2) / Standard & Bus (C2+) / C2 & Analytics (C3) / Full Integration (C4)</i>	<i>Write (W) / Read (R)</i>	<i>[Real-time, Near Real-time, Batch]</i>	<i>The temporal "granularity" of the data, e.g. per second / minute / hour / day / month]</i>	<i>Title of data asset</i>	<i>A brief description of the data asset</i>
Basic Control (C1)	W	NRT	s	request heating (on/off)	Request HP to start in heating mode
Basic Control (C1)	R	NRT	s	status operation (on/off)	Info on operation (On if compressor is running) for visu and fault detection
Standard Control (C2)	W	NRT	s	request cooling (on/off)	Request HP to start in cooling mode.
Standard Control (C2)	R	NRT	s	status defrost	Info on defrost (on if HP is in defrost) for visu and fault detection
Standard Control (C2)	W	NRT	s	Set point compressor speed	Control of the HP heating/cooling power
Standard Control (C2)	R	NRT	s	Current compressor speed	Information on current speed (power) for visu and fault detection
Standard Control (C2)	R	NRT	s	Error status	HP is not able to run due to an error OR an error was detected, and HP must be repaired
Standard Control (C2)	W	NRT	s	SG Ready Signal 1	2-bit coding of the SG Ready signal, signal set by the utility
Standard Control (C2)	W	NRT	s	SG Ready Signal 2	2-bit coding of the SG Ready signal, signal set by the utility
Standard Control (C2)	W	RT	s	Utility Lock ("EVU Sperre")	external lock of the compressor by the utility (required in the security chain)
Standard Control (C2 comm)	RW	NRT	s	signals of level C1 and C2 can also be exchanged by communication bus, data point is RW	

HW – Hardware

Visu – Visualization

R – Read = Lesen (aus der Sicht einer übergeordneten Regelung)

W – Write = Schreiben (aus der Sicht einer übergeordneten Regelung)

Anhang B:**Weitere Simulationsergebnisse zu den hocheffizienten Wärmedämmungen****Simulationsergebnisse zu Wärmedämmung 1**

Variation der VQP-Dicke bei Wärmedämmung 1

Speicher- volumen	Alte- rung	VQP- Dicke	Variante Boden- dämmung	Variante Deckel- dämmung	Warmhalte- verluste
950 L	25 a	34 mm	1	1	72,23 W
950 L	25 a	29 mm	1	1	73,61 W
500 L	25 a	29 mm	1	1	56,73 W
500 L	25 a	24 mm	1	1	58,50 W
1500 L	25 a	29 mm	1	1	84,04 W
1500 L	25 a	24 mm	1	1	86,21 W
2000 L	25 a	34 mm	1	1	92,94 W
2000 L	25 a	29 mm	1	1	94,96 W

Simulationsergebnisse zu Wärmedämmung 2

500 L:

Variation der VIP-Dicke, WLF des gealterten PUR sowie Boden- und Deckeldämmung für einen 500 L-Speicher mit Wärmedämmung 2

Dicke VIP in mm	WLF gealtertes PUR	Dicke PUR in mm	Variante Boden- dämmung	Variante Deckel- dämmung	Warmhalte- verluste in W
20	Norm	139	1	5	48,86
20	Norm	139	2	2	52,61
15	Norm	144	1	5	51,95
15	Norm	144	2	2	53,48
10	Norm	149	1	5	52,57
10	Norm	149	2	2	54,42
20	Kons.	139	1	5	53,25

Dicke VIP in mm	WLF gealtertes PUR	Dicke PUR in mm	Variante Bodendämmung	Variante Deckeldämmung	Warmhalteverluste in W
20	Kons.	139	2	2	56,34
15	Kons.	144	1	5	54,20
15	Kons.	144	2	2	57,44
10	Kons.	149	1	5	55,44
10	Kons.	149	2	2	58,68

950 L:

Variation der VIP-Dicke, WLF des gealterten PUR sowie Boden- und Deckeldämmung für einen 950 L-Speicher mit Wärmedämmung 2

Dicke VIP in mm	WLF gealtertes PUR	Dicke PUR in mm	Variante Bodendämmung	Variante Deckeldämmung	Warmhalteverluste in W
20	Norm	139	1	5	62,93
20	Norm	139	2	2	64,60
15	Norm	144	1	5	64,27
15	Norm	144	2	2	65,94
10	Norm	149	1	5	65,82
10	Norm	149	2	2	67,49
20	Kons.	139	1	5	69,07
20	Kons.	139	2	2	70,19
15	Kons.	144	1	5	70,87
15	Kons.	144	2	2	71,99
10	Kons.	149	1	5	73,02
10	Kons.	149	2	2	74,14

1.500 L:

Variation der VIP-Dicke, WLF des gealterten PUR sowie Boden- und Deckeldämmung für einen 1.500 L-Speicher mit Wärmedämmung 2

Dicke VIP in mm	WLF gealtertes PUR	Dicke PUR in mm	Variante Bodendämmung	Variante Deckeldämmung	Warmhalteverluste in W
20	Norm	139	1	5	71,34
20	Norm	139	2	2	74,65
15	Norm	144	1	5	73,34
15	Norm	144	2	2	76,38
10	Norm	149	1	5	75,82
10	Norm	149	2	2	78,75
20	Kons.	139	1	5	78,55
20	Kons.	139	2	2	80,68
15	Kons.	144	1	5	81,02
15	Kons.	144	2	2	83,22
10	Kons.	149	1	5	84,57
10	Kons	149	2	2	86,63

2.000 L:

Variation der VIP-Dicke, WLF des gealterten PUR sowie Boden- und Deckeldämmung für einen 2.000 L-Speicher mit Wärmedämmung 2

Dicke VIP in mm	WLF gealtertes PUR	Dicke PUR in mm	Variante Bodendämmung	Variante Deckeldämmung	Warmhalteverluste in W
25	Norm	134	1	5	81,10
25	Norm	134	2	2	87,79
20	Norm	139	1	5	82,07
20	Norm	139	2	2	89,67
15	Norm	144	1	5	83,98
15	Norm	144	2	2	91,83
25	Kons.	134	1	5	88,65

Dicke VIP in mm	WLF gealtertes PUR	Dicke PUR in mm	Variante Boden- dämmung	Variante Deckel- dämmung	Warmhalte- verluste in W
25	Kons.	134	2	2	94,87
20	Kons.	139	1	5	90,95
20	Kons.	139	2	2	97,20
15	Kons.	144	1	5	93,41
15	Kons.	144	2	2	99,86

Simulationsergebnisse zu Wärmedämmung 3

500 L:

Variation der WLF des gealterten PUR sowie Boden- und Deckeldämmung für einen 500 L-Speicher mit Wärmedämmung 3

Dicke PUR in cm	WLF gealter- tes PUR	Variante Boden- dämmung	Variante Deckel- dämmung	Warmhaltever- luste in W
16	Norm	1	5	56,35
16	Norm	2	2	57,22
17	Kons.	1	5	57,48
17	Kons.	1	1	57,71
18	Kons.	2	2	56,70

1.500 L:

Variation der WLF des gealterten PUR sowie Boden- und Deckeldämmung für einen 1.500 L-Speicher mit Wärmedämmung 3

Dicke PUR in cm	WLF gealter- tes PUR	Variante Boden- dämmung	Variante Deckel- dämmung	Warmhaltever- luste in W
17	Norm	1	5	76,79
17	Norm	2	2	79,79
18	Kons.	1	5	84,31
18	Kons.	1	1	84,45
19	Kons.	2	2	84,62

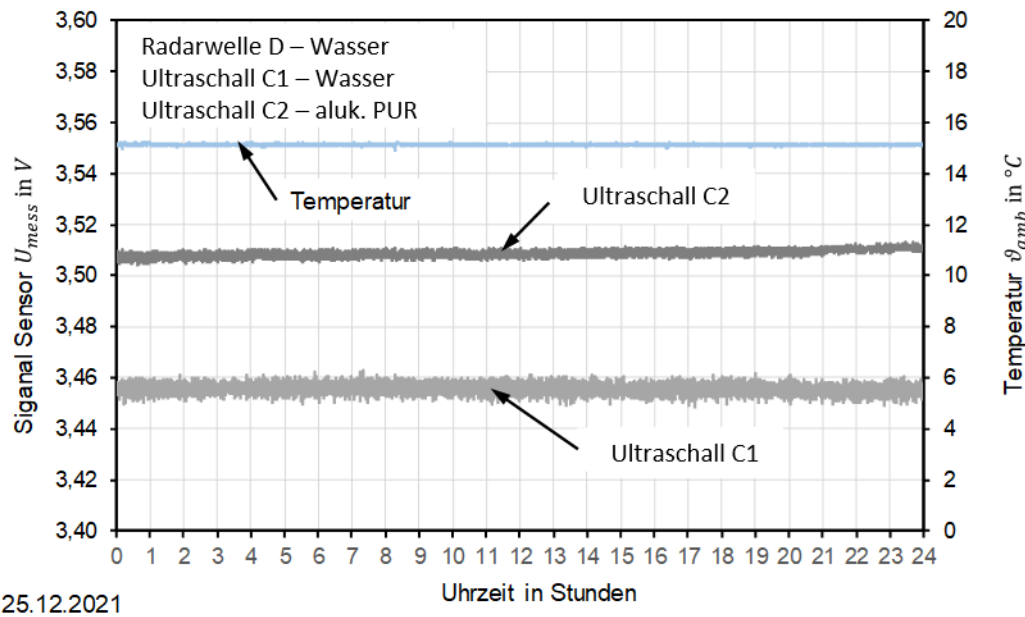
2.000 L:

Variation der WLF des gealterten PUR sowie Boden- und Deckeldämmung für einen 2.000 L-Speicher mit Wärmedämmung 3

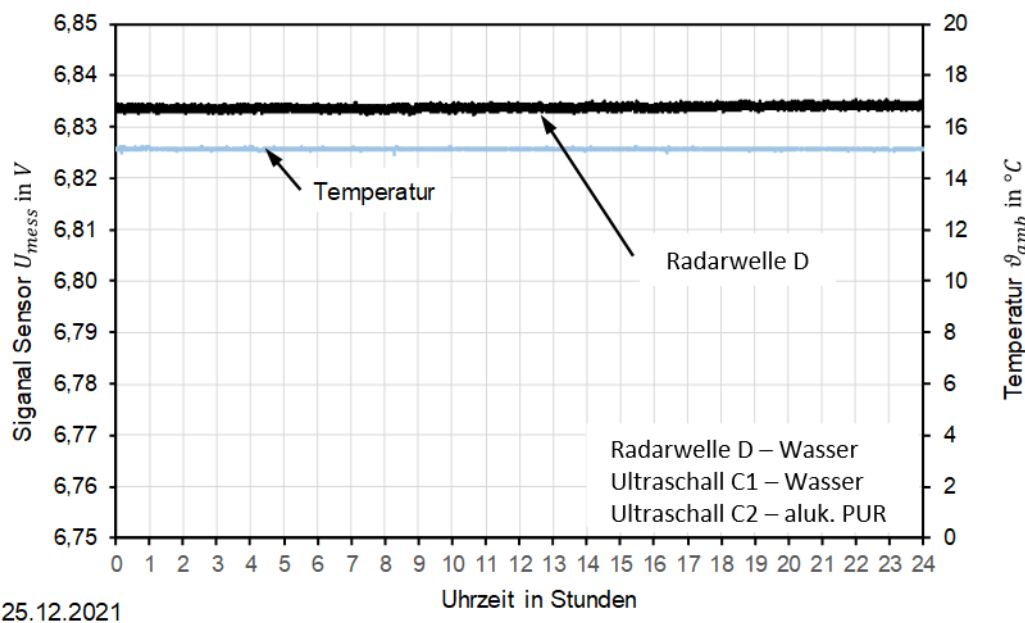
Dicke PUR in cm	WLF gealter- tes PUR	Variante Boden- dämmung	Variante Deckel- dämmung	Warmhaltever- luste in W
17	Norm	1	5	94,01
19	Norm	2	2	93,12
21	Kons.	1	5	92,81
22	Kons.	1	1	91,85
25	Kons.	2	2	93,69

Anhang D: Weitere Messdaten der Ultraschallsensoren C und des Radarwellensensors D

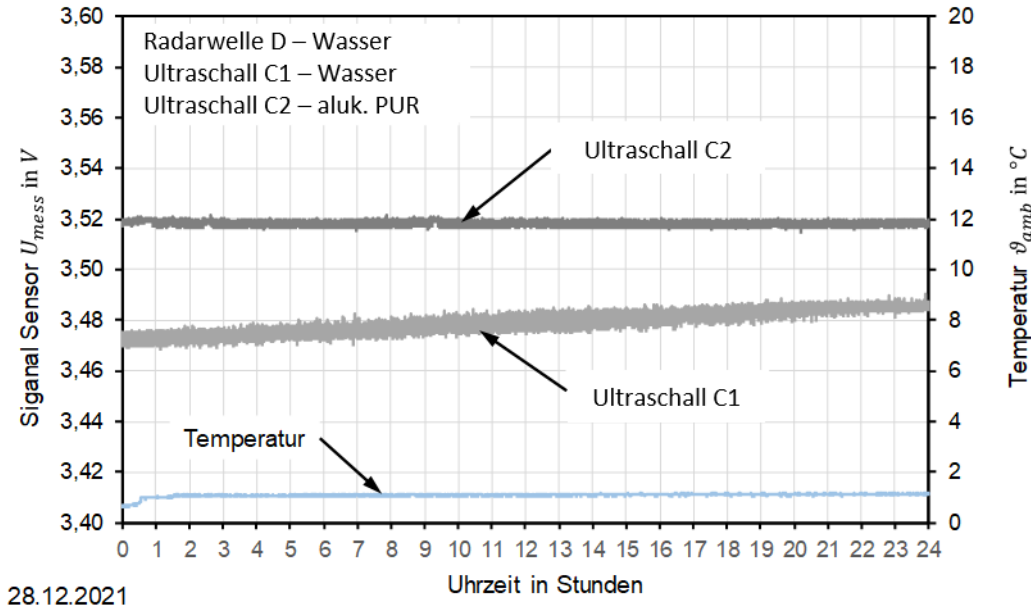
Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C1 und C2 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 25.12.2021.



Verlauf des Messsignals des Radarwellensensors D sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 25.12.2021.



Verlauf des Messsignals der Ultraschallsensoren C1 und C2 sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 28.12.2021.



Verlauf des Messsignals des Radarwellensensors D sowie die Lufttemperatur in der Klimakammer am 28.12.2021.

