



Weiterentwicklung, Prüfung, und Demonstration großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenaufstellung

Akronym „StoEx2“

Abschlussbericht

Version vom 04.06.2024

Laufzeit des Vorhabens: 01.10.2019 bis 30.09.2023

Bearbeitung und Zuwendungsempfänger

Universität Stuttgart
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)
Harald Drück, Stephan Lang, Jens Ullmann, Claudia Scholl-Haaf, Markus Gensbaur
Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart
Tel: 0711/685-63553; E-Mail: harald.drueck@igte.uni-stuttgart.de

Firma Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau GmbH
Markus Sirch, Georg Röder
Schneekoppenweg 9, 87600 Kaufbeuren-Neugablonz
Tel: 08341-9787-15; E-Mail: markus.sirch@sirch.com

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unter dem Förderkennzeichen 03ET1667A+B aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über den Projektträger Jülich (PTJ) gefördert.

Die Autoren und die Autorin 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

Hinweis:

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt von der Firma Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau GmbH (Sirch) 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 die Firma Sirch.

Kurzfassung

Der vorliegende Bericht stellt die Ergebnisse dar, die im Forschungsprojekt StoEx2 zur Weiterentwicklung, Prüfung und Demonstration großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenaufstellung erarbeitet wurden. Das Ziel des Forschungsprojekts war die kostengünstige Bereitstellung und Funktionsprüfung einer hocheffizienten Speichertechnologie für die Realisierung von großen Speicherkapazitäten mittels außen aufgestellter Warmwasserspeicher. Die Funktionsfähigkeit und die hohe Effizienz der neu entwickelten Technologie konnte in einem zweijährigen Feldtest im Realbetrieb nachgewiesen werden. Die hohe Effizienz der Speicher stellt sich zum einen in einer sehr geringen Wärmeverlustrate von 12 - 15 W/K bzw. 0,2 – 0,25 W/(m³·K) sowie in einem guten thermischen Schichtungsverhalten des realisierten Pilotspeichers mit einem Volumen von 60,6 m³ dar.

Zur Kostenreduktion und Qualitätssicherung des Herstellungsprozesses wurden unterschiedliche Methoden für die Befüllung des zu evakuierenden Dämmraums mit einer Dämmstoffschüttung sowie zur Vermeidung der Hohlräumbildung innerhalb des Wärmedämmstoffs und zur Beschleunigung der Evakuierung der Vakuumwärmedämmung entwickelt und erprobt. Dabei erzielte die neu entwickelte Dämmstoffeinsaugung in den Dämmraum des liegenden Speichers eine Kosteneinsparung bei der Herstellung von ca. 2.500 € für Speicher mit Volumina von ≥ 25 m³. Durch die Ermittlung der notwendigen Rüttelstärke bei der Dämmstoffbefüllung können in Zukunft Setzungen und Hohlräumbildungen in der Dämmstoffschüttung vermieden werden. Bzgl. der Beschleunigung der Evakuierung der Vakuumwärmedämmung wurden zahlreiche Methode untersucht und im Hinblick auf Wirkung und Aufwand gegenübergestellt. Dazu zählen u. a. der Einsatz des Trocknungsmittels Zeolith, die Ausheizung der Vakuumwärmedämmung bei der Evakuierung und die Verwendung von möglichst frisch produziertem Wärmedämmstoff. Auf Basis der Untersuchungsergebnisse können in Zukunft die wirkungsvollsten und günstigsten Methoden ausgewählt werden um den Evakuierungsvorgang zu beschleunigen.

Den möglichen Hindernissen einer Außenaufstellung durch ästhetische Beeinträchtigungen des Aufstellungsorts durch den Speicher wurde mit der Erarbeitung von architektonischen Integrationsmöglichkeiten begegnet. Hierzu wurde ein entsprechender Katalog mit Maßnahmen erstellt, der optische Aufwertungen oder zusätzliche Nutzungsmöglichkeiten des Speichers, z. B. als Treppe, Kletterturm oder Werbesäule, aufzeigt.

Durch die begleitende Forschung konnten die im Vorgängerprojekt StoEx gewonnen Erkenntnisse hinsichtlich transparenter Wärmedämmungen (TWD) wesentlich erweitert werden. Durch detaillierte Untersuchungen der Wärmetransportphänomene innerhalb von TWD konnte deren Modellbildung wesentlich verbessert werden. Zusammen mit der Entwicklung eines Parameteridentifikationsverfahrens sind nun deutlich bessere Vorhersagen zur thermischen Leistungsfähigkeit von Warmwasserspeichern, die mit einer zusätzlichen TWD versehen sind, möglich.

Hinsichtlich der möglichen Anwendungsgebiete der Speichertechnologie wurde insbesondere die Wirtschaftlichkeit der Vakuumwärmedämmung in Abhängigkeit vom Wärmepreis und der über ein Jahr gemittelten Speichertemperatur mit Hilfe von Systemsimulationen ermittelt. Mittels daraus generierter Regressionsgleichungen lässt sich die Wirtschaftlichkeit der Speichertechnologie für große Speichervolumina und unterschiedliche Anwendungen, insbesondere in der industriellen Prozesswärme, einfach vorhersagen.

Abstract

The present report contains the results of the research project “StoEx2 - Evolution, testing, and demonstration of large-volume, economical hot water stores with high-efficient thermal insulation for outdoor installation / Weiterentwicklung, Prüfung, und Demonstration großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenaufstellung“. The aim of the research project was the cost-effective provision and functional testing of a highly-efficient storage technology for providing large heat capacities of hot water stores for outdoor installation. The functionality and high efficiency of the newly developed technology were demonstrated in a two-year field test under real operating conditions. The high efficiency of the newly developed storage technology is reflected on the one hand in a very low heat loss rate of 12 - 15 W/K or 0.2 - 0.25 W/(m³·K) and on the other hand in the good thermal stratification behavior of the pilot storage tank with a volume of 60.6 m³.

Various methods were developed and tested to reduce costs and to ensure quality in the manufacturing process, including methods for filling the insulation space with insulation material, preventing void formation within the insulation material, and accelerating the evacuation process of the vacuum insulation. The newly developed method for insulation material suction into the insulation space of the horizontal tank resulted in a cost saving of approximately 2,500 € in manufacturing for stores with storage volumes ≥ 25 m³. By determining the necessary vibration strength during insulation material filling, settlements and void formations in the insulation material can be avoided in the future. Regarding the acceleration of vacuum insulation evacuation, numerous methods were investigated and compared in terms of effectiveness and effort. These include the use of the drying agent zeolite, heating the vacuum insulation during evacuation, and using freshly produced insulation material. Based on the research results, the most effective and cost-effective methods can be selected in the future to accelerate the evacuation process.

Potential obstacles to outdoor installation due to aesthetic impairments of the installation site by the hot water store were addressed by developing architectural integration options. For this purpose, a corresponding catalog of measures was created, which shows visual enhancements or additional usage options for the store, such as stairs, climbing towers, or advertising columns.

Through accompanying research, the findings gained in the predecessor project StoEx regarding transparent thermal insulations (TTI) could be significantly expanded. Detailed investigations of heat transfer phenomena within the TTI have greatly improved its modeling. Together with the development of a parameter identification procedure, significantly better predictions of the thermal performance of a hot water store equipped with TTI are now possible.

Regarding the potential applications of the storage technology, the economic viability of vacuum insulation was determined based on the heat price and the average storage temperature over a year using system simulations. Regression equations generated from these simulations allow for the straightforward prediction of the economic viability of the storage technology for large storage volumes and various applications, particularly for industrial process heat.

Nomenklatur

Große lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Fläche
\dot{G}	W/m^2	Solare Einstrahlung
U	J	Innere Energie
T	K	Absolute Temperatur

Kleine lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
a	m/s^2	Beschleunigung
g	m/s^2	Erdbeschleunigung
\dot{q}	W/m^2	Wärmestromdichte
k	$W/(m^2 K)$	Wärmedurchgangskoeffizient
r_0	-	Modellkoeffizient Einfallswinkelkorrektur
t	s	Zeit

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
α	-	Absorptionsgrad
Δ		Differenz

Symbol	Einheit	Bezeichnung
τ	-	Transmissionsgrad
ε	-	Emissionsgrad
λ	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
ρ	kg/m ³	Dichte
ρ^*	-	Reflexionsgrad
ϑ	°C	Temperatur

Abkürzungen

Symbol	Bezeichnung
abs.	Absolut
AKV	Abkühlversuch
AM	Air Mass
AP	Arbeitspaket
BDL	Beschleunigungsdatenlogger
BHKW	Blockheizkraftwerk
CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DIN	Deutsche Industrie-Norm
EC1500	Expandierter Perlit Eurocell 1500 des Herstellers Stauss-Perlite GmbH
EC1500-H	Hydrophobierter expandierter Perlit Eurocell 1500-H des Herstellers Stauss-Perlite GmbH
EN	Europäische Norm

Symbol	Bezeichnung
Fkz	Förderkennzeichen
GVB	Gesamtvorhabensbeschreibung
H	Höhe
IGTE	Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
KNN	Künstliche Neuronale Netze
KWD	Konventionelle Wärmedämmung
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LKW	Lastkraftwagen
NARX	nonlinear autoregressive exogenous model
PTJ	Projektträger Jülich
rel.	relativ
SHC	Solar Heating and Cooling Program
SWN	Stadtwerke Neumarkt
TPC1,5	Expandierter Perlit „Technoperl C1,5“ des Herstellers Stauss-Perlite GmbH
TV	Transportversuch
TWD	Transparente Wärmedämmung
UA	Wärmeverlustrate
VIP	Vakuum-Isolations-Paneele
VPB	Vakuumprobenbehälter
VV	Vorverdichtung
VWD	Vakuumwärmedämmung

Symbol	Bezeichnung
WWS	Warmwasserspeicher

Indizes

Symbol	Bezeichnung
abs	Absorber
amb	engl.: umgebend, außen
aus	austretend
ein	eintretend
eff	effektiv
exp	experimentell
ext	extern
Gew	Gewinn
hem	hemisphärisch
int	intern
irr	irreversibel
mix	ideal durchmischt
ref	reflektiert
Seg	Segment
Sp	Speicher
Str	Stratification
Sum	Summe

Symbol	Bezeichnung
Umg	Umgebung
Verl	Verlust
w	Wind
X	In X-Richtung
Y	In Y-Richtung
Z	In Z-Richtung

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	13
1.1 Motivation und Problemstellung.....	14
1.2 Stand der Technik.....	15
1.2.1 Aktueller Stand nach Vorprojekt „StoEx“	15
1.2.2 Aktueller Stand ähnlicher Forschungsvorhaben	16
1.2.3 Aktueller Stand bei der Prüfung von Warmwasserspeichern	17
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	18
1.3.1 AP 1: Kostenreduktion und Technologieoptimierung	18
1.3.2 AP 2: Wissenschaftliche Begleituntersuchungen	19
1.3.3 AP 3: Optimierung des Herstellungsprozesses.....	19
1.3.4 AP 4: Untersuchung von architektonischen Integrationsmöglichkeiten	20
1.3.5 AP 5: Untersuchung der Adaption an andere Anwendungen	20
1.3.6 AP 6: Installation und Fertigung Pilotspeicher	21
1.3.7 AP 7: Prüfung und Demonstration	22
1.3.8 AP 8: Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit	22
1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	23
2. Kostenreduktion und Technologieoptimierung (AP1).....	24
2.1 Wärmedämmung im unteren Speicherbereich	24
2.2 Frostsicherheit im unteren Speicherbereich	30
3. Wissenschaftliche Begleituntersuchungen (AP2).....	33
3.1 Experimentelle Untersuchungen einer TWD	33
3.2 Modellbildung mit Knotenmodell und Parameteridentifikation	40
3.3 Modellbildung mit KNN	43
3.4 Zusammenfassung	44
4. Optimierung des Herstellungsprozesses (AP3)	46
4.1 Optimierung der Dämmstoffbefüllung des Speichers	46
4.1.1 Von der Firma Sirch verwendeter Wärmedämmstoff für doppelwandige vakuumwärmegeämmte Warmwasserspeicher	46
4.1.2 Stand der Technik	47
4.1.3 Identifikation von Optimierungsvarianten	47
4.1.4 Dämmstoffeinsaugung in den stehenden Speicher	48
4.1.5 Dämmstoffeinsaugung in den liegenden Behälter	56
4.2 Vermeidung und Detektion von Dämmstoffsetzungen und Hohlräumbildungen	64
4.2.1 Untersuchungen zur Vermeidung von Dämmstoffsetzungen und Hohlräumen	66
4.2.2 Untersuchungen zur Detektion von Hohlräumen im Wärmedämmstoff	77

4.3 Verringerung der Evakuierungsdauer der Vakuumwärmedämmung.....	80
4.3.1 Ausheizen der Vakuumwärmedämmung bei der Evakuierung	81
4.3.2 Vorevakuierung des leeren Dämmraums.....	84
4.3.3 Erhöhung des Evakuierungsquerschnitts.....	87
4.3.4 Vergleich der Evakuierungsgeschwindigkeiten von frisch produziertem, gelagertem, unbehandeltem und hydrophobiertem Perlit	90
4.3.5 Einsatz von Trocknungsmitteln (Zeolith)	93
4.3.6 Einsatz einer Turbomolekularpumpe	102
4.3.7 Qualitative vergleichende Einschätzung von Nutzen und Aufwand der untersuchten Methoden zur Erhöhung der Evakuierungsgeschwindigkeit	102
5. Untersuchung von architektonischen Integrations- möglichkeiten (AP4)	105
5.1 Identifikation architektonischer Integrationsmöglichkeiten.....	105
5.2 Bauliche Umsetzung ausgewählter Maßnahmen	110
5.3 Erstellung Katalog mit architektonischen Integrationsvorschlägen.....	112
6. Untersuchung der Adaption auf andere Anwendungen (AP5)	113
6.1 Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung als Pufferspeicher für BHKWs..	113
6.2 Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung für weitere Anwendungen.....	114
6.3 Anpassung der Speichertechnologie für Temperaturen > 110 °C	116
7. Installation und Fertigung Pilotspeicher (AP6)	117
7.1 Pilotspeicher 1	117
7.2 Pilotspeicher 2	118
8. Prüfung und Demonstration (AP7)	121
8.1 Pilotspeicher 1	121
8.1.1 Wärmeverluste	122
8.1.2 Speichernutzungsgrad	127
8.1.3 Thermische Schichtung.....	127
8.2 Pilotspeicher 2	132
8.3 Leckagebestimmung am Funktionsmusterspeicher StoEx.....	133
8.4 Zusammenfassung	134
9. Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit (AP8)	136
9.1 Projektkoordination	136
9.2 Öffentlichkeitsarbeit	136
9.2.1 Teilnahme an Konferenzen und Tagungen.....	136
9.2.2 Veröffentlichungen und Vorträge	137
9.2.3 Teilnahme Treffen Forschungsnetzwerke und Arbeitskreise	138

10. Verwertung der Ergebnisse.....	140
10.1 Wissenschaftliche Verwertung.....	140
10.1.1 Wissenschaftliche Verwertung Firma Sirch.....	140
10.1.2 Wissenschaftliche Verwertung IGTE.....	140
10.2 Technische Verwertung.....	141
10.2.1 Technische Verwertung Firma Sirch.....	141
10.2.2 Technische Verwertung IGTE.....	142
10.3 Wirtschaftliche Verwertung.....	142
10.3.1 Wirtschaftliche Verwertung Firma Sirch.....	142
10.3.2 Wirtschaftliche Verwertung IGTE.....	143
11. Zusammenfassung und Ausblick.....	144
11.1 Zusammenfassung.....	144
11.2 Ausblick.....	145
12. Danksagung.....	147
13. Literaturverzeichnis.....	148

1. Einleitung

In dem vorliegenden Bericht werden die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens „StoEx2 – Weiterentwicklung, Prüfung und Demonstration großvolumiger Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenaufstellung“ (03ET1667A+B A+B) dargestellt.

Das Vorhaben wurde als Verbundprojekt von der Firma Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau GmbH (Sirch) und dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart gemeinsam durchgeführt. Die Koordination des Verbundvorhabens erfolgte durch die Firma Sirch.

Das Vorhaben basiert auf dem abgeschlossenen BMWi-Forschungsvorhaben „Entwicklung großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Dämmung zur Außenaufstellung“ (Akronym: StoEx¹, FKZ: 0325992 A+B, Laufzeit: 01.01.2013–31.12.2015), siehe Abschnitt 1.2.1.

Das zentrale Ziel des aktuellen Forschungsvorhabens war die Weiterentwicklung der im Vorhaben „StoEx“ entwickelten hocheffizienten Warmwasserspeicher. Hierfür sollte als zentraler Aspekt für zwei innerhalb des Vorhabens technologisch und wirtschaftlich optimierte Pilotspeicher eine Prüfung und Demonstration unter realen Einsatzbedingungen erfolgen. Der sogenannte Technology Readiness Level (TRL) sollte im Rahmen des Vorhabens von ursprünglich ca. 4-5 auf ca. 7-9 gesteigert werden. Für die möglichst kostengünstige Bereitstellung dieser innovativen Speichertechnologie hat das Vorhaben die Optimierung des Herstellungsprozesses zum Ziel. Hierbei wurden z. B. die Reduzierung des Material-, Arbeitskraft-, und Energieeinsatzes sowie der Fertigungsdauer angestrebt. Dafür sollen u. a. die Befüllung des Dämmraums mit der Dämmstoffschüttung vereinfacht und die Evakuierungsdauer der Vakuumwärmedämmung reduziert werden. Zur Qualitätssicherung sollten zudem mögliche Setzungsvorgänge in der Dämmstoffschüttung der Vakuumwärmedämmung untersucht sowie zukünftig vermieden werden. Eine wissenschaftliche Begleituntersuchung sollte zudem dazu beitragen, die Wärmetransportprozesse innerhalb der an außen aufgestellten Warmwasserspeichern angebrachten transparenten Wärmedämmung (TWD) besser zu verstehen und mittels entsprechender numerischer Modelle abbilden zu können.

Zur Erreichung einer starken Marktakzeptanz sollte ein Maßnahmenkatalog zur architektonisch ästhetischen Integration der außenaufgestellten Speicher in die bebaute Umgebung entwickelt werden.

Für das Erreichen eines möglichst großen Markts sollte ebenfalls die Eignung des Speichers als Multifunktionsspeicher untersucht werden. Dies schließt auch die theoretische Untersuchung der Speicherbaureihe für den Einsatz auf andere Anwendungen, die insbesondere Speichertemperaturen größer als 100 °C benötigen, ein.

¹ Das Akronym „StoEx“ basiert auf den Begriffen Store (engl. Speicher) und extern, d.h. Aufstellung außerhalb des Gebäudes.

1.1 Motivation und Problemstellung

Der Wärmespeicherung kommt bei der Transformation hin zu einem weitestgehend klimaneutralen Gebäudebestand eine immer bedeutendere Rolle zu [Bür 2017]. Für einen hohen Anteil an erneuerbaren Wärmeerzeugern ist sie zwingend erforderlich, um die teils volatile Wärmeerzeugung für den Wärmebedarf verfügbar zu machen [Eng 2021]. Durch die um bis zum Faktor 50 geringeren Kosten im Vergleich zur Speicherung von elektrischer Energie kann die Wärmespeicherung außerdem wichtige Beiträge im Bereich elektrischer Netze leisten, z. B. für den stromgeführten Betrieb von KWK-Anlagen oder zur Netzstabilisierung als sektorübergreifender Energiespeicher. Sie trägt somit zur notwendigen Flexibilisierung und Integration der zukünftigen Energiesysteme bei.

Für thermische Energiespeicher stellt Wasser zurzeit das günstigste Speichermedium dar. Warmwasserspeicher sind heute daher in vielen verschiedenen Ausführungen und Größen kommerziell erhältlich. Nahezu alle am Markt verfügbare Warmwasserspeicher zeichnen sich allerdings dadurch aus, dass sie für eine Aufstellung im Inneren des Gebäudes konzipiert sind. Die Positionierung des Warmwasserspeichers innerhalb des Gebäudes hat dabei folgende Nachteile:

- Der Warmwasserspeicher verringert die innerhalb des Gebäudes nutzbare Fläche und schränkt die Freiheitsgrade der Gebäudekonstruktion ein.
- Insbesondere im Gebäudebestand ist die Einbringung von Warmwasserspeichern mit einem Wasservolumen von mehr als 5 m³, die sich oft über mehrere Stockwerke erstrecken, häufig nicht mit vertretbarem Aufwand realisierbar. Eine alternative Möglichkeit zur Realisierung solcher Wasservolumina im Gebäudebestand sind Speicherkaskaden, die aber hydraulisch sehr aufwendig sind und unter thermischen Aspekten Nachteile aufweisen.
- Die Wärmeverluste des Warmwasserspeichers werden direkt in das Gebäude abgegeben, was zu Komforteinbußen durch eine Überhitzung der Innenräume im Sommer führen kann.
- Die Installation großer Speicher mit mehr als 5 m³ Volumen ist zumeist nicht ohne Vorkontak-Montage möglich und die Zusammenstellung aus mehreren Komponenten birgt die Gefahr von Montagefehlern.
- Eine Innenaufstellung ermöglicht nur eingeschränkte Reparatur- und Erweiterungsarbeiten bzw. erfordert im entsprechenden Fall einen vollständigen Austausch des Warmwasserspeichers.

Durch die Aufstellung des Warmwasserspeichers außerhalb des Gebäudes können die zuvor beschriebenen Nachteile eliminiert werden. Bei vielen Gebäuden, insbesondere Ein- und Mehrfamilienhäuser, die in der zweiten Hälfte des vergangenen Jahrhunderts erbaut wurden, und heute durch eine energetische Modernisierung eine relevante Energieeinsparung erwarten lassen, ist um das Gebäude eine ausreichende Aufstellfläche vorhanden, so dass die Außenanstellung eines Warmwasserspeichers möglich ist.

Aufgrund der meist größeren notwendigen Speicherkapazitäten ist eine Außenaufstellung auch im gewerblichen Bereich ein entscheidender Vorteil. Die Außenaufstellung ist ebenso für eine mögliche Nachrüstung von entscheidender Bedeutung.

Die zentrale Herausforderung für außenaufgestellte Wärmespeicher ist die im Vergleich zu innen aufgestellten Speichern deutlich größere Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und der Umgebung des Speichers. Um dadurch hohe Wärmeverluste zu vermeiden, erfordert dies den Einsatz von hocheffizienten Wärmedämmungen. Im Forschungsvorhaben „StoEx“ konnte ein Speicher mit einer solchen hocheffizienten Wärmedämmung entwickelt und seine Funktionsfähigkeit unter Laborbedingungen erfolgreich geprüft werden. Eine weitere Herausforderung der Außenaufstellung stellt eine ggf. empfundene ästhetische Beeinträchtigung des Aufstellungsorts dar. Dieser Beeinträchtigung kann durch eine ästhetische und ggf. Zusatznutzen bringende architektonische Integration begegnet werden.

1.2 Stand der Technik

1.2.1 Aktueller Stand nach Vorprojekt „StoEx“

Im abgeschlossenen Projekt StoEx (FKZ: 0325992 A+B, Laufzeit: 01.01.2013–31.12.2015) wurde eine Baureihe von hocheffizienten Warmwasserspeichern mit einem Volumen von 5 bis 80 m³ zur Außenaufstellung entwickelt, deren spezifische Kosten inkl. Wärmedämmung für Speichervolumina \geq ca. 55 m³ nach damaligem Stand unter 1.000 €/m³ betragen [Ger 2016]. Bei der entwickelten Baureihe kamen innovative Technologien wie eine Vakuumwärmedämmung, eine neuartige thermische Schichtbe- und Entladeeinrichtung und eine transparente Wärmedämmung (TWD) zum Einsatz, die die thermische Leistungsfähigkeit dieser Speicher gegenüber heute üblichen Produkten signifikant steigern. Das Funktionsprinzip konnte mittels zwei erster Versuchsspeicher mit 1,5 m³ Wasservolumen und einem Funktionsmuster im Realmaßstab mit 12 m³ erfolgreich unter Laborbedingungen demonstriert werden. Dafür wurden im Vorfeld grundlegende Material- und Verfahrensuntersuchungen zur Vakuumwärmedämmung, zur transparenten Wärmedämmung und zur Schichtbe- und Schichtentladeeinrichtung im Labormaßstab durchgeführt.

Dennoch ergaben sich durch die erlangten Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Projektbearbeitung und dem Betrieb des Funktionsmusters im Realmaßstab neue, noch zu klärende Fragestellungen und Herausforderungen. Hierzu zählten im Wesentlichen:

- die lange Evakuierungsdauer der Vakuumwärmedämmung bei großen Speicher- bzw. Füllmaterialvolumina und mögliche Setzvorgänge der Dämmstoffschüttung während des Transports und der Nutzung der Speicher,
- die gezielte Nutzung der Wärmetransportvorgänge innerhalb der transparenten Wärmedämmung zur Homogenisierung des Oberflächentemperaturprofils sowie die Anwendung temperaturbeständiger, absorbersenkrechtlicher Strukturen transparenter Wärmedämmungen, die eine weitere Reduktion der Wärmeverluste erwarten lassen,
- die Weiterentwicklung des modellgestützten Parameteridentifikationsverfahrens, um nicht ausschließlich mit langandauernden Auskühlversuchen, sondern ebenfalls mit in-

situ Messdaten Speicherkennwerte, wie z. B. eine über der Speicherhöhe örtlich aufgelöste Wärmeverlustrate, bestimmen zu können,

- die systematische Identifikation weiterer Anwendungsgebiete und deren wirtschaftliche und technologische Anforderungen an eine Speicherbaureihe mit hocheffizienter Wärmedämmung,
- und die Entwicklung einer optisch ansprechenden und einfachen Integration solcher Speicher in eine bebaute Umgebung.

1.2.2 Aktueller Stand ähnlicher Forschungsvorhaben

Unter anderem inspiriert durch den Bereich der vakuumwärmedämmten, kryotechnischen Tieftemperaturspeicherung von Fluiden wurden zunächst theoretische Studien [Alt 2001] zur Adaption der Technologie der Vakuumwärmedämmung auf den Bereich der thermischen Warmwasserspeicher zur Wärmespeicherung durchgeführt. Zwei konzeptionelle Entwicklungsrichtungen dieser Wärmedämmungen können aktuell unterschieden werden, sog. Doppelmantel-Konzepte und Konzepte mit Verwendung von Vakuum-Isolationspaneelen (VIP).

Bei Doppelmantelkonzepten 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, meist gemeinsam mit konventionellen Wärmedämmstoffen, die Wärmedämmung.

Eine tatsächliche Umsetzung eines Doppelmantelkonzepts im Realmaßstab für den Bereich der Behälterwarmwasserspeicher größer 10 m³ ist vom IGTE (vormals ITW) in Zusammenarbeit mit der Firma Sirch im Projekt StoEx (siehe oben) und im Rahmen des bereits abgeschlossenen Forschungsprojektes „Superisolierter Heißwasser-Langzeitwärmespeicher“ (FKZ: 0325964, Laufzeit: 01.05.2010-31.10.2012) [Bei 2013] bei der Firma Hummelsberger Schloserei GmbH mit dem Kooperationspartner ZAE Bayern erfolgt. Beim Projekt der Firma Hummelsberger und des ZAE Bayern waren neben der Technologieentwicklung der Vakuumwärmedämmung u. a. die Untersuchung von thermischen Be- und Entladeeinrichtungen, Simulationsstudien zur Systemintegration und der Betrieb mehrerer Funktionsmuster Projektschwerpunkte. Das Projekt der Firma Hummelsberger und des ZAE Bayern schloss unseres Wissens nach technisch grundsätzlich erfolgreich ab. Jedoch scheinen die Produktionskosten der Speicher so hoch zu sein, dass sich diese bisher nicht erfolgreich am Markt etablieren konnten. Ein ähnlicher Ansatz für die Realisierung von effizienten Warmwasserspeichern erfolgte durch die Firma „KBW“ (Klaus Berndlmaier Wärmespeicher). Bei dieser Umsetzung wurde anstatt von schüttfähigen Wärmedämmmaterialien eine sogenannte „Multilayer-Insulation“² verwendet, welche zuvor u. a. auch bereits für Tieftemperaturspeicher verwendet wurde. Die Marktaktivität ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt aber vollständig eingestellt.

² Wenige bis mehrere Dutzend Lagen (engl. multilayer) metallbedampfter Kunststofffolien, die durch eine geeignete Perforation oder Gaze (Spacer) auf Abstand gehalten werden.

Ein weiteres Forschungsprojekt mit dem Titel „Thermische Wasser-Langzeitspeicher in kleiner Bauweise“ [May 2013] an der Georg-Simon-Ohm Hochschule Nürnberg als Teilprojekt im Forschungsverbund FORETA³ untersuchte großvolumige Warmwasserspeicher in Betonbauweise mit einer Wärmedämmung aus Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP). VIP-Konzepte bei Vakuumwärmedämmungen haben sich insbesondere verstärkt im Bereich kleinvolumiger Warmwasserspeicher etabliert, insbesondere auch aufgrund der gestiegenen Anforderungen von EU-Richtlinien zur Effizienz von Warmwasserspeichern mit Volumina ≤ 1.000 Liter.

1.2.3 Aktueller Stand bei der Prüfung von Warmwasserspeichern

Im Bereich der thermischen Prüfung und Qualitätssicherung von kleinvolumigen Warmwasserspeichern stehen verschiedene und in der Regel genormte Verfahren zur Speicherprüfung und -bewertung zur Verfügung. Zur Ermittlung der Speichereffizienz hinsichtlich der Wärmeverluste sind dies z. B. die DIN EN 12897 für den Bereitschaftswärmeaufwand und die DIN EN 12977-3 und -4 für die Wärmeverlustrate. Insbesondere die mit dem modellgestützten Prüfverfahren nach DIN EN 12977-3 und -4 ermittelten Kennwerte ermöglichen zusätzlich die spätere Simulation einer Gesamtanlage [Drü 2006]. Diese Verfahren sind jedoch i.d.R. nicht für großvolumige Warmwasserspeicher anwendbar, da diese aufgrund ihrer Größe nicht im Labor vermessen werden können und Vorort häufig die für die Messung notwendige Genauigkeit der Sensoren und die Anlagenperipherie zur Durchführung der genormten Testsequenzen nicht zur Verfügung steht.

Sollen dennoch die Wärmeverluste eines Warmwasserspeichers ermittelt werden, wie es bei verschiedensten Speicherentwicklungsprojekten großer Warmwasserspeicher der Fall ist, wird häufig auf die Installation von Temperatursensoren im Speicherinneren zurückgegriffen. Mit Hilfe einfacher Warmwasserspeichermodelle kann aufbauend auf den Messdaten z. B. einer Auskühlung über eine längere Zeit, eine modellgestützte Parameteridentifikation erfolgen. Alternativ sind zur Parameteridentifikation auch Methoden bekannt, bei denen die Messdaten aus dem laufenden Betrieb genutzt werden können. Im Rahmen des vorangegangenen Forschungsprojekts StoEx wurden erste Modellierungsansätze auf Basis dieses Vorgehens erarbeitet, die die veränderten Speicherumgebungsbedingungen aufgrund der transparenten Wärmedämmung (TWD) berücksichtigen.

³ Bayerischer Forschungsverbund energieeffiziente Technologien und Anwendungen.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das hier beschriebene Vorhaben „StoEx2“ wurde analog zum Vorgängervorhaben „StoEx“ als Verbundvorhaben gemeinsam von der Firma Sirch und dem IGTE durchgeführt. Die Leitung des Vorhabens wurde von der Firma Sirch übernommen.

Im Folgenden sind die acht in der Gesamtvorhabenbeschreibung aufgeführten Arbeitspakete (AP) aufgeführt. Die APs wurden dabei in zwei parallele Stränge gegliedert. Die APs 1 - 5 sind Strang 1 zugeordnet, und die APs 6 - 7 sind Strang 2 zugeordnet. Dabei beinhaltet Strang 1 die Forschung und Grundlagenuntersuchungen, die in Strang 2 (Entwicklung und Außenlabor-tests) Anwendung finden sollen.

1.3.1 AP 1: Kostenreduktion und Technologieoptimierung

Für eine kostenreduzierte Fertigung und technologische Optimierung der Speicher wurden mit Abschluss des Vorgängerprojekts StoEx bereits folgende offene Fragestellungen formuliert:

- Reduzierung der Evakuierungsdauer
- Einbau und Betrieb der thermischen Schichtbe- und Entladeeinrichtung
- Wärmedämmung für die konstruktiv bedingten Wärmebrücken im Fußbereich des Speichers
- Frostsicherheit der Anschlussrohrleitungen
- Setzungsverhalten der schüttfähigen Wärmedämmstoffe.

Diese Fragestellungen wurden teilweise parallel in den thematisch entsprechenden AP des Forschungsstrangs bearbeitet und deren Ergebnisse in den weiterentwickelten Fertigungsprozess eingebracht.

Zur Reduzierung der Evakuierungsdauer wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt. Die Fragen, die sich in Zusammenhang mit dem schüttfähigen Wärmedämmstoff ergaben, wurden detailliert in AP 3 untersucht und werden dort beschrieben. Daher werden auch die Untersuchungen bzgl. des Setzungsverhaltens solcher Wärmedämmstoffe in AP 3 beschrieben.

Die ursprünglich angedachte Verwendung einer thermischen Schichtbe- und Schichtentladeeinrichtung hat sich für die Firma Sirch als nicht relevant herausgestellt und ist aufgrund dessen nicht Bestandteil weiterer Untersuchungen. Sie wird daher im Weiteren nicht behandelt.

Zur Identifizierung des Einflusses unterschiedlicher Wärmedämmkonzepte auf die Wärmeverluste im unteren Speicherbereich wurden experimentelle Untersuchungen mittels der im Vorgängerprojekt gefertigten Versuchsspeicher im Labormaßstab durchgeführt.

Die Frage der Frostsicherheit wurde im Rahmen der messtechnischen Begleitung der Pilot-speicher (AP 7) untersucht.

In Bezug auf AP 1 konnten alle Fragestellungen beantwortet und so die Projektziele vollständig erreicht werden.

1.3.2 AP 2: Wissenschaftliche Begleituntersuchungen

Zur Verbesserung der Modellbildung von Warmwasserspeichern (WWS) in Kombination mit einer Transparenten Wärmedämmung (TWD) wurden aufbauend auf den Erkenntnissen des Vorgängerprojekts StoEx weiterführende messtechnische Untersuchungen am Funktionsmusterspeicher auf dem Außenprüfstand des IGTE durchgeführt (siehe Abschnitt 3). Dabei wurden insbesondere der Wärmetransport in absorberparalleler Richtung detaillierter untersucht. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden in einer verbesserten Modellbildung umgesetzt. Zur Berechnung der thermischen Leistungsfähigkeit von WWS mit TWD wurde ein Parameteridentifikationsverfahren weiterentwickelt. Hierdurch ist es nun möglich, mittels einer entsprechenden Prüfsequenz die thermischen Eigenschaften eines solchen Speichers derart zu bestimmen, dass seine Leistungsfähigkeit mittels Simulationsprogrammen für beliebige Szenarien bestimmt werden kann.

In Bezug auf AP 2 konnten somit alle anfänglich formulierten Projektziele vollständig erreicht werden.

1.3.3 AP 3: Optimierung des Herstellungsprozesses

Für eine kostengünstigere Fertigung der Speicherbaureihe wurden folgende Aspekte bzgl. der Vakuumwärmedämmung detaillierter untersucht:

- Einbringen der schüttfähigen Wärmedämmstoffe
- Identifizierung geeigneter Verdichtungstechniken zur Vermeidung späterer Setzungen
- Verkürzung des Evakuierungsvorgangs.

Zur kostengünstigeren, einfacheren und staubarmen Einbringung des schüttfähigen Wärmedämmstoffs wurden Maßnahmen sowohl zur Befüllung in einen stehenden als auch in einen liegenden Speicher erarbeitet. Hierzu zählen das Einsaugen mit und ohne Zyklonabscheider bei gleichzeitiger automatisierter gleichmäßiger Dämmstoffverteilung durch eine elektrisch betriebene rotierende Scheibe mit Leitelementen. Eine der erarbeiteten Techniken wurde bei der Fertigung eines der beiden Pilotspeicher umgesetzt und erprobt (siehe Abschnitt 4.1). Das Setzungsverhalten innerhalb der schüttfähigen Materialien konnte mittels Laboruntersuchungen und bildgebenden Verfahren detaillierter untersucht und dabei wertvolle Erkenntnisse gewonnen werden. Dabei wurden auch die Erschütterungen während des Transports der Speicher mit einem LKW als mögliche Ursache für die Entstehung von Hohlräumen im Dämmmaterial detaillierter untersucht. Mit Hilfe der Messung der Beschleunigungen beim Einsatz der Rüttler zur Dämmstoffverdichtung bei der Befüllung konnte eine ausreichende Rüttelstärke identifiziert werden, bei welcher keine späteren Dämmstoffsetzungen zu erwarten sind.

Der ursprünglich angedachte Einsatz einer transparenten Wärmedämmung hat sich für die Firma Sirch als zurzeit nicht relevant herausgestellt. Eine Optimierung der Montage wurde daher hier nicht weiterverfolgt.

In Bezug auf AP 3 konnten alle relevante Fragestellungen weiterführend beantwortet werden. Die Projektziele konnten damit erreicht werden.

1.3.4 AP 4: Untersuchung von architektonischen Integrationsmöglichkeiten

Zur Steigerung der Akzeptanz der außenaufgestellten Speicher wurden Konzepte erarbeitet, um den Speicher mit positivem optischen Einfluss in seine Umgebung zu integrieren. Dazu wurde mithilfe des Architekten Primin Wollensak ein Katalog erstellt, der über 15 entsprechende architektonische Integrationsmöglichkeiten enthält. Dazu zählen z. B. der Einsatz des Speichers als Werbefläche, Kletterturm oder Aussichtsplattform. Der erste Pilotspeicher ist auf der Liegewiese des Freizeitbads „Schlossbad“ in Neumarkt aufgestellt und dient sowohl als Werbesäule für die Stadtwerke Neumarkt (Aufschrift „swn“) als auch als weithin sichtbares Kennzeichen und Alleinstellungsmerkmal für das Schlossbad (

Abbildung 8-1, rechts). Der ursprünglich als zweiter Pilotspeicher gefertigte Speicher wurde als Träger für eine freischwebende Treppe konzipiert. Aufgrund des kurzfristigen Baustopps der zweiten Demonstrationsanlage nach bereits durchgeführter Installation des Speichers konnte diese Integrationsmöglichkeit in der Umsetzung jedoch nicht bis zum Abschluss begleitet werden.

In Bezug auf AP 4 konnten die formulierten Projektziele weitestgehend erreicht werden.

1.3.5 AP 5: Untersuchung der Adaption an andere Anwendungen

Um die Eignung der Speicherbaureihe für andere Anwendungen zu untersuchen, wurden Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen (z. B. Wäschereien, Brauereien) zwecks Bereitstellung von Messdaten kontaktiert. Leider konnte keine Unternehmen gefunden werden, welches entsprechende Messdaten der Wärmeerzeugung und Wärmelast in der notwendigen zeitlichen Auflösung zur Verfügung stellen konnte. Um die Frage der Wirtschaftlichkeit grundsätzlich auch für andere Anwendungen zu klären, wurden daher Wärmeerzeugungs- und Lastdaten des ersten Pilotspeichers bzw. aus der Literatur verwendet. Die Anwendung eines Warmwasserspeichers macht sich bzgl. der Wärmeverluste hauptsächlich durch die ggf. unterschiedlichen zeitlich gemittelten Speichertemperaturen bemerkbar. Diese haben Auswirkungen auf die zu den Wärmeverlusten proportionalen Temperaturdifferenzen zwischen Speicher- und Umgebungstemperatur. Insofern können andere Anwendungen durch eine Variation dieser Temperaturdifferenzen anhand eines validierten Speichermodells mit einer messtechnisch bestimmten Wärmeverlustrate simulativ abgebildet werden. Die Wärmeverluste für eine Anwendung können dann entsprechend der zu erwartenden, jährlich gemittelten Speichertemperaturen durch Interpolation der Simulationsergebnisse bestimmt werden. Aussagen zur Wirtschaftlichkeit lassen sich darauf aufbauend dann anhand von Speicher- und Energiekosten treffen.

Eine Anwendbarkeit auf andere Anwendungen konnte zudem im Rahmen des Betriebs des ersten Pilotspeichers unter Beweis gestellt werden. Hier wurde der Speicher in Kombination mit zwei BHKWs betrieben und konnte damit seine Tauglichkeit für KWK-Anwendungen zeigen. Dabei wurden sehr hohe Be- und Entladevolumenströme realisiert (Abschnitt 8.1).

Zudem war zunächst geplant, die Notwendigkeit von Anpassungen der Speichertechnologie für Speichermediumstemperaturen über 100 °C zu prüfen. Dazu zählten folgende Fragestellungen:

- Welche Anforderungen ergeben sich aus der Druckgeräterichtlinie für den Betrieb und die festigkeitstechnische Auslegung, insbesondere für die Vakuumpwärmeeisung und die im Forschungsprojekt StoEx entwickelte, neue Standring-Konstruktion?
- Welche derart temperaturbeständigen Kunststoffe können für den Bau der thermischen Schichtbeladeeinrichtung eingesetzt werden und sind diese für 50 Betriebsjahre geeignet?
- Welche Folgen hat eine evtl. Entspannungsverdampfung des Speichermediums Wasser durch eine anlagenseitige Wasserentnahme und daraus resultierende Druckabsenkung bzw. wie kann diese verhindert werden?

Bei ersten Untersuchungen der Thematik stellte sich heraus, dass Speicher für den bestimmungsgemäßen Betrieb mit Temperaturen von mehr als 110 °C unter Artikel 4 der Druckgeräterichtlinie⁴ fallen. Der hieraus resultierende administrative und finanzielle Aufwand ist für die Firma Sirch so groß, dass die Fertigung von Speichern für derartige Anwendungen unattraktiv ist. Daher wurden die weiteren, diesbezüglich geplanten Arbeiten nicht durchgeführt.

Mit Ausnahme des zuvor beschriebenen Sachverhalts konnten in Bezug auf AP 5 alle ursprünglich geplanten Aspekte untersucht und somit die Projektziele erreicht werden.

1.3.6 AP 6: Installation und Fertigung Pilotspeicher

Im Rahmen von AP 6 wurden zwei Pilotspeicher unter Verwendung von im Projekt- bzw. Forschungsstrang erarbeiteten Ergebnisse gefertigt (Abschnitt 7) und installiert. Der erste Pilotspeicher wurde im Frühjahr 2021 auf der Liegewiese des neuen Freizeitbads „Schlossbad“ in Neumarkt i. d. Oberpfalz aufgestellt und im November 2021 in Betrieb genommen. Der zweite Pilotspeicher sollte ursprünglich in einem großen Mehrfamilienhaus in Wernigerode in Zusammenarbeit mit der Firma Varmeco installiert werden. Dort erfolgte aber im ersten Halbjahr 2021 ein Wechsel des Investors und damit unerwartet die Favorisierung eines anderen Energiekonzepts. Unmittelbar darauffolgend wurde alternativ das kleine Nahwärmenetz „Pöllinger Straße“ ebenfalls in Neumarkt i. d. Oberpfalz identifiziert, bei dem der Pilotspeicher als „Stützpuffer“ betrieben werden sollte. Nach zunächst sehr optimistischen Aussagen der Stadtwerke Neumarkt bzgl. der Realisierung und nach Zuarbeit für die Netzauslegung seitens des IGTE wurde die Realisierung unerwartet durch einen negativen Entscheid seitens der Eigentümergemeinschaft des zu versorgenden Wohnkomplexes Ende Dezember 2021 gestoppt. Unmittelbar darauffolgend wurde ein Einfamilienhaus, das mit einer Solaranlage mit einem hohen solaren Deckungsanteil in Kirchdorf a. d. Krems in Österreich realisiert werden sollte, als alternativer Standort für den zweiten Pilotspeicher identifiziert. Der zweite Pilotspeicher wurde im Juli und August 2022 von der Firma Sirch gefertigt und im September 2022 vor Ort installiert. Ein entsprechendes Messtechnikkonzept sowie die Bereitstellung der entsprechenden Technik (Sensoren und Messdatenerfassung) erfolgte durch das IGTE. Nach längeren baulichen Verzögerungen vor Ort erfolgte unerwartet und kurzfristig die Insolvenz des Bauträgers. Die Inbetriebnahme des Speichers und seine messtechnische Untersuchung konnten daher nicht durchgeführt werden.

⁴ Richtlinie 2014/68/EU

Die messtechnische Untersuchung eines baugleichen Speichers in einer Biogasanlage in Mengen scheiterte aufgrund anfänglich fehlerhafter Aussagen des Betreibers hinsichtlich der Möglichkeit zur Durchführung bestimmter Betriebsphasen für die energetische Bilanzierbarkeit des Speichers. Aufgrund der bereits fortgeschrittenen Projektdauer wurde eine messtechnische Untersuchung an einem bereits im Jahr 2016 im botanischen Garten in Augsburg installierten Speicher ähnlicher Bauart durchgeführt. Die ursprünglich am zweiten Pilotspeicher vorgesehenen Untersuchungen zur weiteren Druckabsenkung im Dämmraum wurden aufgrund der fortgeschrittenen Projektdauer am ersten Pilotspeicher in Neumarkt durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu werden AP 3 zugeordnet und sind dort beschrieben.

Die Funktionsfähigkeit der Herstellungsmethoden der Dämmstoffeinsaugung in den Dämmraum des liegenden Speichers, der Dämmstoffverdichtung sowie einer Vorevakuierung zur Beschleunigung der Evakuierung konnten anhand des zweiten Pilotspeichers demonstriert werden, siehe AP 3. Zudem konnte die Funktionsfähigkeit der Dämmstoffeinsaugung in den Dämmraum des liegenden Speichers an einem weiteren, im Projektzeitraum gefertigten Speicher, mit einem Wasservolumen von 60 m³ bestätigt werden.

In Bezug auf AP 6 konnten die Projektziele weitgehend erreicht werden, jedoch war der hierfür erforderliche Aufwand deutlich höher als ursprünglich geplant.

1.3.7 AP 7: Prüfung und Demonstration

In AP 7 konnte der Einsatz der Speicherbaureihe unter realen Betriebsbedingungen durch eine detaillierte messtechnische Begleitung untersucht werden. Dabei konnte z. B. aufgezeigt werden, dass der Speicher unter realen Betriebsbedingungen um den Faktor 2 - 8 geringere Wärmeverluste als vergleichbare Speicher mit konventionellen Wärmedämmungen aufweist (siehe Abschnitt 8.1). Auf Basis der messtechnischen Begleitung konnte somit die Funktionsfähigkeit der Speicher mit Vakuumwärmedämmung bestätigt werden. Für die messtechnische Untersuchung eines zweiten Pilotspeichers wurde aufgrund der in Zusammenhang mit AP 6 beschriebenen Verzögerungen ein bereits seit 2016 installierter Speicher genutzt. Auch für den bereits seit 8 Jahren in Betrieb befindlichen Speicher wurden in Relation zu vergleichbaren Speichern mit konventioneller Wärmedämmung geringe Wärmeverluste gemessen. Durch die unplanmäßige Untersuchung des bereits seit 8 Jahren installierten Speichers konnte aber die grundsätzliche Langlebigkeit der verwendeten Technologie aufgezeigt werden.

In Bezug auf AP 7 konnten die Projektziele weitgehend erreicht werden.

1.3.8 AP 8: Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit

In AP 8 wurden zum einen die Arbeitsinhalte und der Projektablauf koordiniert. Hierfür wurden insgesamt 9 Projekttreffen organisiert und durchgeführt sowie eine Vielzahl von Arbeitstreffen und Abstimmungsgesprächen, die größtenteils online stattfanden.

Zum anderen erfolgten zahlreiche Veröffentlichungen in Zeitschriften und bei wissenschaftlichen Tagungen und Kongressen, welche in Abschnitt 9.2.1 aufgeführt sind. Außerdem fand ein inhaltlicher Austausch im Rahmen der Teilnahme an Treffen unterschiedlicher Forschungsnetzwerke und Arbeitskreise statt. Die einzelnen Aktivitäten sind in Abschnitt 9.2.3 dokumentiert.

1.4 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben mehreren Veröffentlichungen auf einschlägigen Tagungen und Konferenzen erfolgte ein Austausch der Forschungsergebnisse aus dem Projekt StoEx2 auch durch die Mitarbeit in Forschungsnetzwerken und Arbeitskreisen wie EnergieWendeBauen oder dem Arbeitskreis Langzeitwärmespeicher. Die entsprechenden Aktivitäten sind in Abschnitt 9.2.3 aufgeführt.

2. Kostenreduktion und Technologieoptimierung (AP1)

Für die kostengünstige Gestaltung des Fertigungsprozesses von hocheffizienten Warmwasserspeichern wurden vor Beginn des Projekts einige konkrete Fragestellungen identifiziert, die im Rahmen dieses Arbeitspakets geklärt werden sollen. Diese sind insbesondere:

- Wie kann der Einbau und der Betrieb der neu entwickelten thermischen Schichtbe- und Schichtentladeeinrichtungen im Speicherinneren optimiert werden?
- Können durch den Einsatz von konventionellen Einblasdämmstoffen im Fußbereich des Speichers konstruktiv bedingte Wärmebrücken kostengünstig reduziert werden, ohne dabei die Zugänglichkeit des Speicherinneren zu behindern? → Abschnitt 2.1
- Sind im Fußbereich des außen aufgestellten Speichers Anschlussrohrleitungen und aktive Be- und Entladeeinrichtungen ohne den kosten- und energieintensiven Aufwand einer Begleitheizung sicher vor Frostschäden (und Überhitzung) geschützt? → Abschnitt 2.2
- Wie kann die zur Evakuierung des Speichers benötigte Zeit reduziert und damit die Kosteneffizienz des Fertigungsprozesses deutlich gesteigert werden? → Abschnitt 4.3
- Treten während des Transports und über die Betriebsdauer Setzungsvorgänge im Füllmaterial der Wärmedämmung auf? → Abschnitt 4.2

Aufgrund der thematischen Überschneidungen der letzten beiden Punkte mit AP 3, wurden diese im Rahmen von AP 3 „Optimierung des Herstellungsprozesses“ untersucht und sind deshalb in Abschnitt 4 beschrieben.

Die ursprüngliche angedachte Verwendung einer thermischen Schichtbe- und Schichtentladeeinrichtung hat sich für die Firma Sirch aufgrund einer geringen Nachfrage nach dieser Technologie als nicht relevant herausgestellt und wurde daher im weiteren Projektverlauf nicht behandelt.

2.1 Wärmedämmung im unteren Speicherbereich

Zur Schaffung einer Zugänglichkeit in den inneren Speicherbehälter ist dieser über die sog. Standzarge (siehe 1 in Abbildung 2-1) mit dem äußeren Speicherbehälter verbunden. Im Inneren der Standzarge sind dann entsprechende Revisionsöffnungen vorhanden, die einen Zugang zum inneren Speicherbehälter ermöglichen. Daher ist die Einbringung und Evakuierung des schüttfähigen Wärmedämmstoffs innerhalb der Standzarge konstruktiv bedingt nicht möglich. Somit muss die Wärmedämmung im unteren Speicherbereich mithilfe konventioneller Wärmedämmmaterialien realisiert werden. Eine Möglichkeit besteht z. B. darin den Fußraum innerhalb der Standzarge bzw. des Standrings (siehe 2 in Abbildung 2-1) mit konventionellen Einblasdämmstoffen zu füllen.



Abbildung 2-1: Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung. Links: 12 m³ Funktionsmusterspeicher am Außenprüfstand des IGTE; Mitte: 12 m³ Funktionsmusterspeicher in CAD-Darstellung mit Standzarge (1), Standring (2) und Doppelmantel bzw. Dämmraum (3); rechts: 1,5 m³ Funktionsmusterspeicher im Technikumsmaßstab am Innenprüfstand des IGTE.

Um den Einfluss unterschiedlicher Wärmedämmmaterialien auf die Wärmeverluste im unteren Speicherbereich, d. h. innerhalb des Standrings, zu untersuchen, wurden unterschiedliche Wärmedämmkonzepte experimentell miteinander verglichen. Dafür wurde für den Speicher mit jedem Dämmkonzept die Wärmeverlustrate nach DIN EN 12977-3:2018 an einem Speicher-Innenprüfstand des IGTE bestimmt. Bei einer solchen Prüfsequenz wird der mit Wasser mit einer Temperatur von 20 °C beladene Speicher solange mit Wasser mit einer Temperatur von 60 °C beladen, bis eine Speicheraustrittstemperatur von 55 °C erreicht ist. Nach einer Abkühl- bzw. Stillstandszeit von 216 Stunden bzw. 9 Tagen wird der Speicher durch die Zufuhr von Wasser mit einer Temperatur von 20 °C wieder entladen bis eine Speicheraustrittstemperatur von ca. 20 °C erreicht ist. Die Wärmeverlustrate wird dann aus den gemessenen zu- und abgeführten Wärmemengen sowie der Abkühl- bzw. Stillstandszeit bestimmt.

Für diese Untersuchungen wurde der Funktionsmusterspeicher im Technikumsmaßstab mit einem Volumen von 1,5 m³ (s. Abbildung 2-1 rechts) verwendet. Dessen Konstruktion unterscheidet sich von dem großen Funktionsmusterspeicher (s. Abbildung 2-1 links und Mitte) durch den Befestigungsbereich des Standrings am äußeren Speichermantel. Bei dem großen Funktionsmusterspeicher ist der Standring am Umfang des äußeren Mantels angeschweißt. Dadurch ist er vom inneren Speicherbehälter bzw. dessen Mantel thermische weitgehend entkoppelt. Der innere und äußere Mantel sind durch die sog. Standzarge verbunden. Am kleineren Funktionsmusterspeicher im Technikumsmaßstab bestehen Standzarge und Standring aus einem Bauelement (Abbildung 2-2). Die Standzarge verbindet daher direkt den Fußring und den inneren Mantel, sodass die gesamte Verbindung eine Wärmebrücke darstellt.

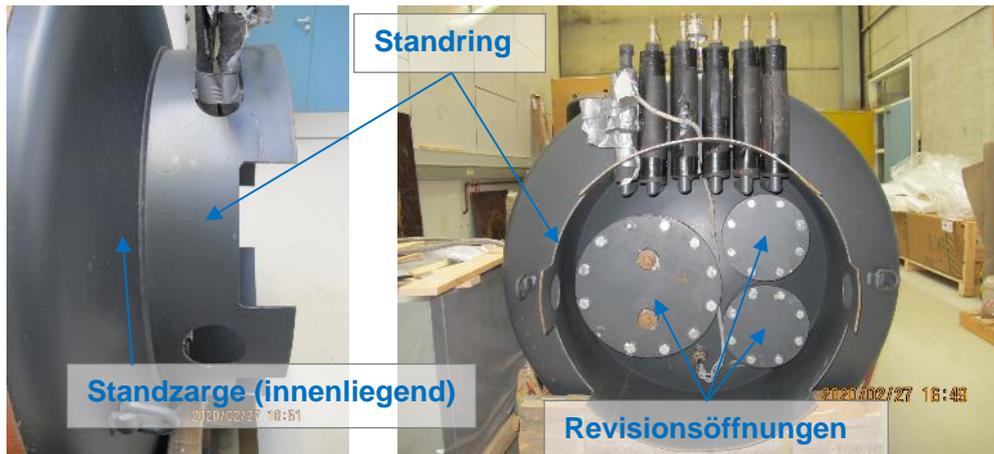


Abbildung 2-2: Unterer Speicherbereich des Funktionsmusterspeichers im Technikumsmaßstab mit Vakuumwärmemedämmung, links: Seitenansicht mit Standring, rechts: Draufsicht mit Anschlüssen (oben), Standring und Revisionsöffnungen.

Die Oberflächentemperaturen des Funktionsmusterspeichers im Technikumsmaßstab sind in Abbildung 2-3 in Form von Infrarotaufnahmen dargestellt. Hier ist deutlich zu erkennen, dass vor allem der Standring, der beim Funktionsmusterspeicher im Technikumsmaßstab zusammen mit der darüber liegenden Standzarge ein durchgehendes Bauelement und damit eine Wärmebrücke darstellt, im Betrieb hohe Oberflächentemperaturen aufweist und entsprechend hohe Wärmeverluste verursacht.

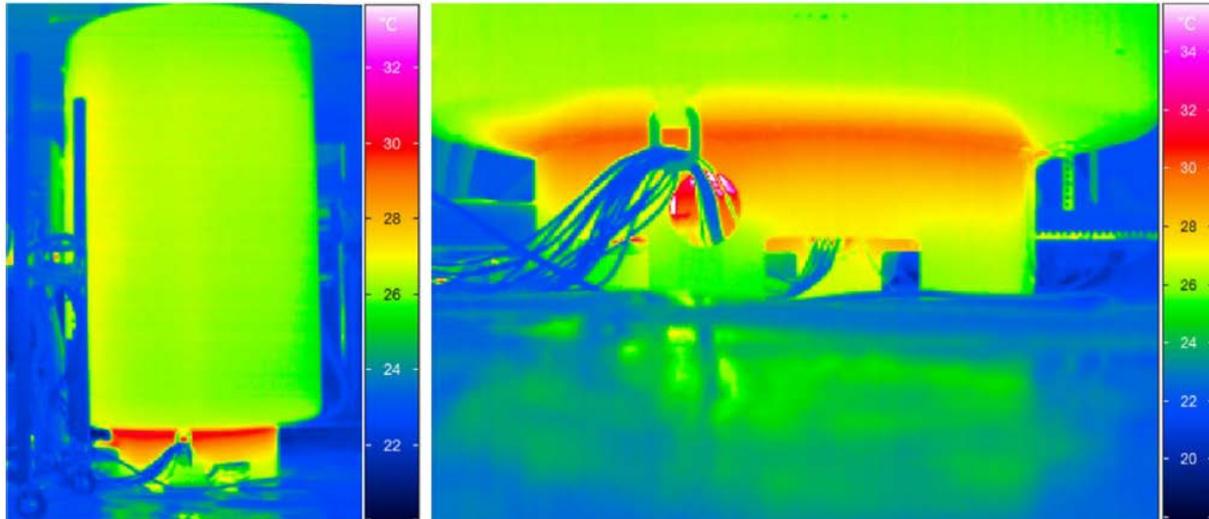


Abbildung 2-3: Funktionsmusterspeicher im Technikumsmaßstab mit Vakuumwärmemedämmung links: Infrarotaufnahme des gesamten Speichers, rechts: Infrarotaufnahme des unteren Speicherbereichs. Temperatur im Speicher ca. 60 °C [Ger 2016].

Während der durchgeführten Prüfsequenzen wurden die Oberflächentemperaturen im unteren Speicherbereich mit Oberflächentemperaturfühlern gemessen (s. Abbildung 2-4). Die starken Schwankungen einiger Temperaturen im unteren Speicherbereich sind auf die Schwankungen der Umgebungstemperatur durch die Klimatisierung der Umgebungsluft zurückzuführen und deuten auf eine relativ starke thermische Entkopplung der entsprechenden Bereiche vom

Speicherinneren hin. Je geringer die Distanz der Position eines Temperaturfühlers zum inneren Mantel, desto höher ist die Temperatur und desto geringer sind die Temperaturschwankungen.

Der Standring des Funktionsmusterspeichers im Realmaßstab ist am äußeren Mantel angeschweißt. Beim untersuchten Funktionsmusterspeicher im Technikumsmaßstab, siehe Abbildung 2-1, entspricht dies der Position des Oberflächentemperaturfühlers 1 bzw. „T_Fuß_01“ in Abbildung 2-4. Im Vergleich zu Position 3, an der die Wärme aus dem inneren Mantel durch die Standzarge in den Fußring und den äußeren Mantel eingetragen wird, findet an Position 1 bereits eine erhebliche Temperaturabnahme statt. Im Bereich der Positionen 2, 4 und 5 sind die Temperaturen durch den Wärmeeintrag aus dem Speicherinneren deutlich höher. Dieser Bereich wurde deshalb zur Umgebung hin in unterschiedlichen Varianten wärmedämmend.

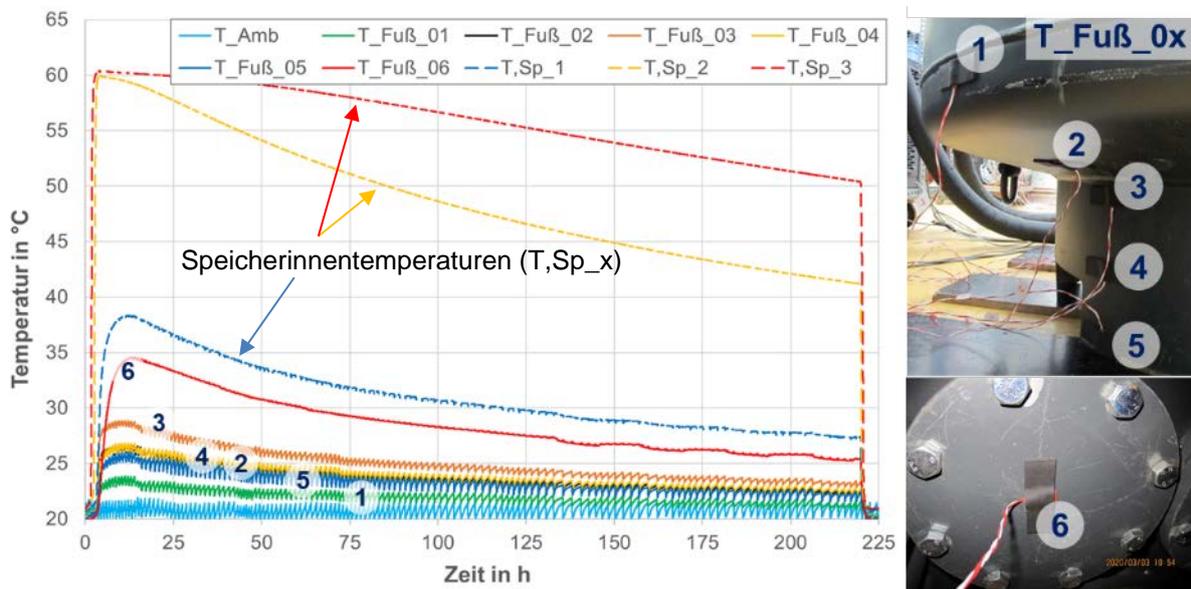
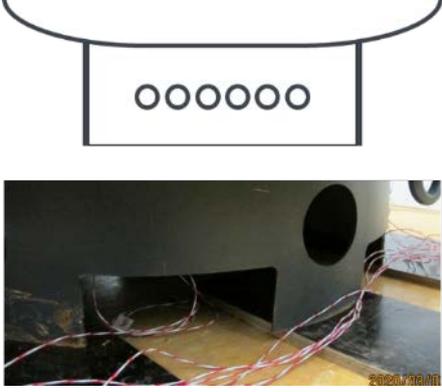
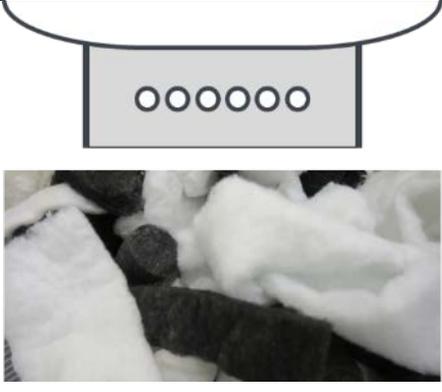
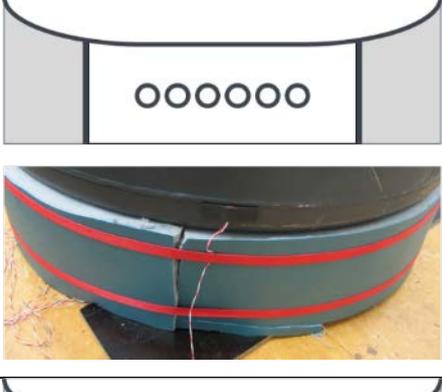
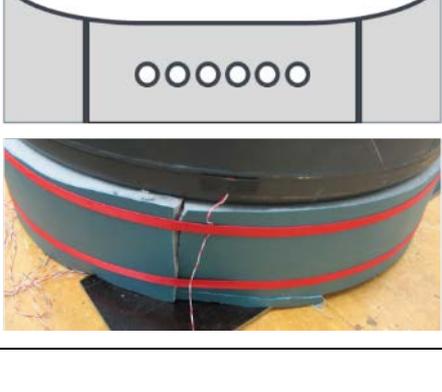
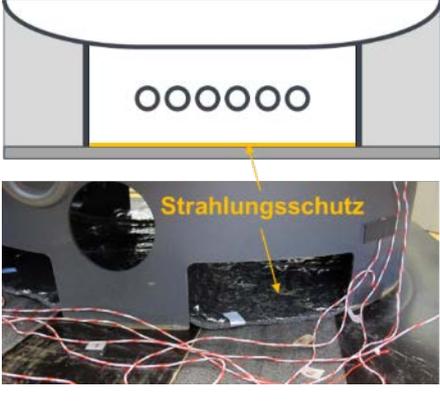
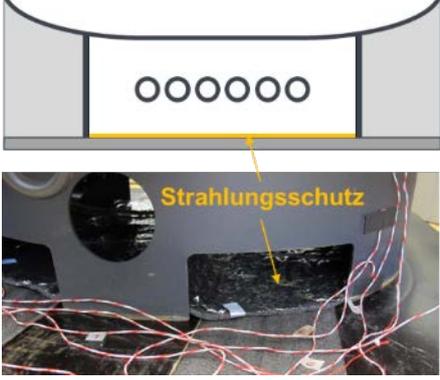


Abbildung 2-4: Temperaturverläufe an unterschiedlichen Stellen des Fußbereichs (s. rechts) während einer Prüfsequenz (für die Variante aus Tabelle 2-1) für die Bestimmung der Wärmeverlustrate nach DIN EN 12977-3:2018 ohne Wärmedämmung im unteren Speicherbereich sowie der Temperaturverlauf der Umgebung (T_{Amb}) und im Inneren des Speichers (T_{Sp_1} : unten; T_{Sp_2} : mittig; T_{Sp_3} : oben).

Die unterschiedlichen Wärmedämmkonzepte sowie deren Prüfergebnisse in Form der ermittelten Wärmeverlustraten sind in Tabelle 2-1 zusammengefasst. Dabei stellt Variante 1 die Referenz dar. Hier ist im unteren Speicherbereich keine Wärmedämmung vorhanden. Während der Prüfung der Referenz steigt die Temperatur im oberen Bereich des Standrings auf maximal ca. 28 °C bei einer Speicherinnentemperatur von 60 °C (vgl. Position 3 in Abbildung 2-4). Für diese Referenzvariante ergibt sich eine Wärmeverlustrate von 2,62 W/K für den gesamten Funktionsmusterspeicher im Technikumsmaßstab. Dabei muss der Speicher wie bei allen weiteren Varianten auch für einen gleichmäßigen Eintrag der mechanischen Last in den Boden auf Holzbrettern aufgestellt werden. Diese sind in Abbildung 2-4 und Tabelle 2-1 zwischen Standring und Boden zu erkennen.

Tabelle 2-1: Varianten zur Reduzierung der Wärmeverluste im unteren Speicherbereich des Funktionsmusterspeichers im Technikumsmaßstab mit 1,5 m³ Speichervolumen
 * Innendruck: Gasdruck in der Vakuumwärmedämmung.

Variante	Darstellung	Beschreibung	Wärmeverluste
1		<p>Referenz:</p> <p>Standring ohne Wärmegedämmung</p> <p>Innendruck*: 8,5 mbar</p>	<p>2,62 $\frac{W}{K}$</p>
2		<p>Standring innen wärmegedämmt mit Polyesterfaservlies</p> <p>($\lambda \approx 0,04 \frac{W}{m \cdot K}$)</p> <p>Innendruck*: 8,5 mbar</p>	<p>2,39 $\frac{W}{K}$</p>
3		<p>Standring außen wärmegedämmt mit Weichschaum aus Polyurethan</p> <p>($\lambda \approx 0,04 \frac{W}{m \cdot K}$)</p> <p>Innendruck*: 8,5 mbar</p>	<p>2,35 $\frac{W}{K}$</p>
4		<p>Standring innen und außen wärmegedämmt (Materialien wie in Variante 2 und 3)</p> <p>Innendruck*: 8,5 mbar</p>	<p>2,18 $\frac{W}{K}$</p>

5		Standring außen wärme- gedämmt, zusätzlich Strahlungsschutz auf Boden (Material wie in Variante 3) Innendruck*: 8,5 mbar	$2,17 \frac{W}{K}$
6		Standring außen wärme- gedämmt mit Strahlungsschutz auf Boden (Material wie in Variante 3) Innendruck*: 1 mbar	$1,78 \frac{W}{K}$

Bei Variante 2 konnte durch Füllen des Innenbereichs des Standrings mit Polyesterfaservlies die Wärmeverlustrate auf von 2,62 W/K auf 2,39 W/K gesenkt werden. Eine ähnliche Verbesserung wurde durch Variante 3 erreicht, bei der der äußere Bereich des Fußrings mit Polyurethanweichschaum wärme-
gedämmt wurde. Variante 4 kombiniert die Maßnahmen der Varianten 2 und 3. Dadurch wird der thermische Kontakt des Fußrings mit der Umgebung noch einmal deutlich reduziert und die Wärmeverlustrate so auf 2,18 W/K gesenkt. Die gleiche Wärmedämmwirkung ließ sich auch mit Variante 5 erzielen. Hierbei wurde die Füllung des inneren Fußrings mit Polyesterfaservlies durch einen einfachen Strahlungsschutz aus Aluminiumfolie am Boden innerhalb des Fußrings ersetzt. Bei dieser Variante wurde unterhalb der Holzbretter für den gleichmäßigen Lasteintrag noch eine 6 cm starke Schicht Polyurethan-Hartschaum angebracht, um eine ebene Auflagefläche für den Strahlungsschutz zu gewährleisten. Da der Boden des Prüfstands aber bereits aus Polyurethan-Hartschaum besteht, wird hier davon ausgegangen, dass die ermittelte Wärmeverlustrate hiervon nahezu unbeeinflusst ist.

Um den Effekt der Wärmedämmung im unteren Speicherbereich im Verhältnis zur gesamten Wärmedämmung des Speichers zu beurteilen, wurde bei Variante 6 zusätzlich zu den Maßnahmen von Variante 5 der Innendruck im evakuierten Doppelspalt von ca. 8,5 mbar auf ca. 1 mbar herabgesetzt. Hierdurch sank die Wärmeverlustrate von 2,17 W/K weiter auf 1,78 W/K. Die Maßnahmen bei Variante 6 konnten die Wärmeverlustrate im Vergleich zur Referenz also von 2,62 W/K auf 1,78 W/K, d. h. um ca. 32 % senken. Hierbei resultiert ca. die Hälfte der Reduktion aus den rel. einfachen Maßnahmen bei Variante 5 im Fußbereich des Speichers.

Die Messunsicherheit bei der Ermittlung der Wärmeverlusten beträgt max. ca. $\pm 5\%$. Die für die unterschiedlichen Varianten zur Reduzierung der Wärmeverluste im Bereich des Fußrings ermittelten Ergebnisse sind daher auch unter Berücksichtigung der Unsicherheit bei der Ermittlung der Wärmeverluste aussagefähig.

Ein Vergleich der Konstruktion des Funktionsmusterspeichers im Technikumsmaßstab mit der Konstruktion der gefertigten großvolumigen Speicher sonst gleicher Bauform (

Abbildung 8-1) zeigt, dass sich die Ergebnisse grundsätzlich auch auf die großen Speicher übertragen lassen. Bei den großvolumigen Speichern im Realmaßstab ist der Standring aber am äußeren Mantel des Doppelmantels angeschweißt und damit vom inneren Speicherbehälter weitestgehend thermisch entkoppelt. Bei den großvolumigen Speichern stellt daher die Standzarge die potentielle Wärmebrücke dar und muss entsprechend wärmegeklärt werden. Die hier erzielten Erkenntnisse der Untersuchungen am Standring des Funktionsmusterspeichers im Technikumsmaßstab lassen sich aber auf die Standzarge des großvolumigen Speichers übertragen.

2.2 Frostsicherheit im unteren Speicherbereich

Zur Untersuchung der Frostsicherheit wurden im Rahmen der messtechnischen Untersuchung des Pilotspeichers „Neumarkt“ (Abschnitt 8.1) drei Oberflächentemperaturen im unteren Speicherbereich während des Betriebs gemessen. Dies sind die dargestellten Oberflächentemperaturen auf der Außenseite der Revisionsöffnung, d. h. auf der Außenseite des inneren Speicherbehälters, auf der Innenseite der Standzarge sowie an der Entlüftungsleitung – wobei diese erst ab September 2023 gemessen wurde und daher in Abbildung 8-2 nicht dargestellt ist. Als einzige hinsichtlich der Frostsicherheit relevante Stelle wurde die Entlüftungsleitung des Speichers identifiziert.

In Abbildung 2-5 und Abbildung 2-6 sind die genannten Oberflächentemperaturen sowie die Umgebungstemperatur und die unterste Speicherinnentemperatur während der beiden Winter 2022/23 und 2023/24 dargestellt. Dabei entspricht die Temperatur an der Revisionsöffnung erwartungsgemäß im Wesentlichen der Temperatur im Totvolumen des Wasserraums d. h. der untersten Speicherinnentemperatur. Die Temperatur auf der Innenseite der Standzarge zeigt sich allerdings bereits stark von der Umgebungstemperatur beeinflusst. Dies ist zum einen ein Indiz für eine relativ starke thermische Entkopplung der Standzarge vom inneren Speicherbehälter. Zum anderen ist dies aber auch auf die fehlende Wärmedämmung auf der Außenseite der Standzarge zurückzuführen (siehe Abbildung 8-2).

Die minimale Temperatur an der Entlüftungsleitung beträgt während des Winters 2023/24 $1,2\text{ °C}$ bei einer Umgebungstemperatur von $-3,3\text{ °C}$ und einer Speicherinnentemperatur im unteren Bereich von ca. $37,5\text{ °C}$ (Punkt „1“ in Abbildung 2-6). Bei einer Temperatur im unteren Speicherbereich von ca. $44,5\text{ °C}$ erreicht die Temperatur an der Entlüftungsleitung einen Wert von ca. $6,5\text{ °C}$ bei einer Umgebungstemperatur von ca. -3 °C (Punkt „2“ in Abbildung 2-6). Die Temperaturdifferenz zwischen Umgebung und betrachteter Messstelle an der Entlüftungsleitung beträgt über den in Abbildung 2-6 dargestellten Zeitraum im Mittel ca. $7,7\text{ °C}$.

Während des in Abbildung 2-5 dargestellten Winters 2022/23 erreichten die Umgebungstemperaturen kurzzeitig minimal ca. $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Da die Temperatur an der Entlüftungsleitung zu diesem Zeitpunkt nicht gemessen wurde, kann hier nur eine Einschätzung bzgl. der Temperatur vorgenommen werden. Bei einer ähnlichen unteren Speichertemperatur von ca. $39\text{ }^{\circ}\text{C}$ lässt sich aber ein Absinken der Temperatur an der Entlüftungsleitung auf unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ nicht ausschließen, wenn die Umgebungstemperatur längeren Zeit einen Wert von ca. $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ unterschreitet. Bereits ohne unten am Speicher angebrachter Wärmedämmung hat die Temperatur im unteren Speicherbereich aber einen deutlichen Einfluss der auf die Temperatur an der Entlüftungsleitung. Daher kann davon ausgegangen werden, dass sich bei entsprechender Wärmedämmung Frostsicherheit herstellen lässt. Während der hier betrachteten Zeiträume wurden keine technischen Defekte an der Entlüftungsleitung bzw. am gesamten Speicher festgestellt. Daher kann davon ausgegangen werden, dass der Speicher in der bestehenden Ausführung bis zu einer Temperatur von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ frostsicher ist. Grundsätzlich kann die Entlüftungsleitung hier außerdem so ausgeführt werden, dass sie unterhalb der Wärmedämmung, die sich in der Standzarge befindet, nicht mit Wasser befüllt ist. Dann ist im mit Wasser befüllten Bereich der Entlüftungsleitung ein Temperaturniveau ähnlich dem an der Revisionsöffnung zu erwarten.

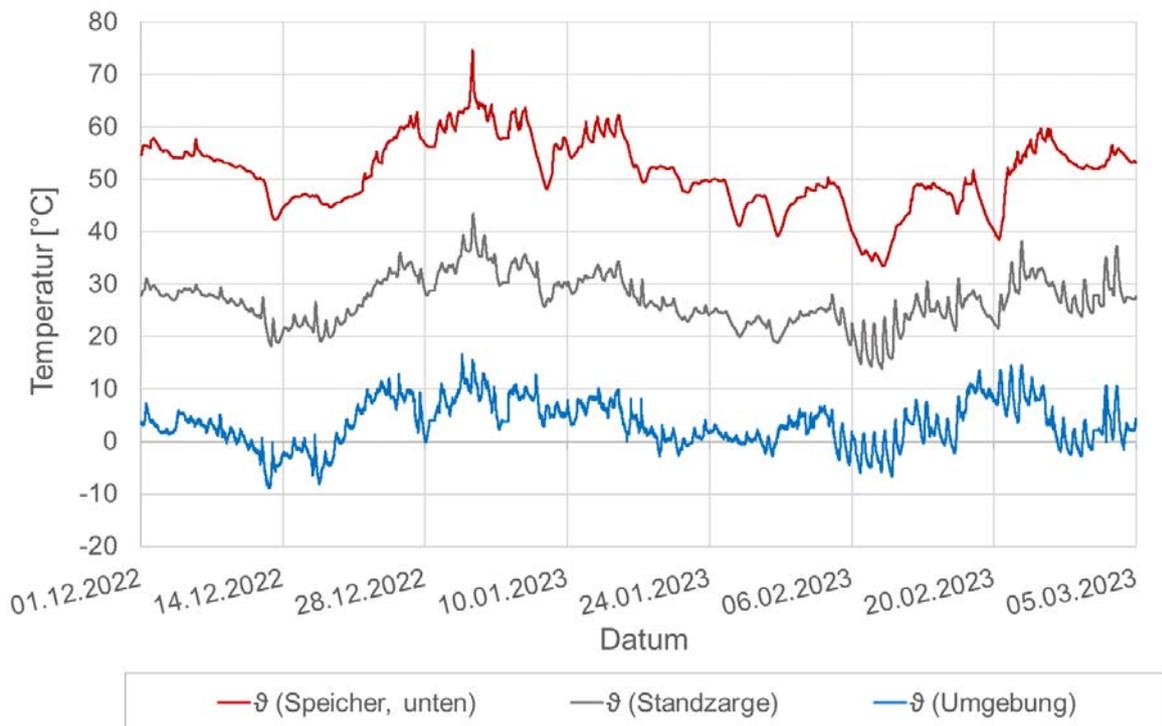


Abbildung 2-5: Temperaturverlauf der Umgebung, des untersten Speicherbereichs sowie an 2 unterschiedlichen Positionen im Fußbereich des Speichers im Winter 2022/2023.

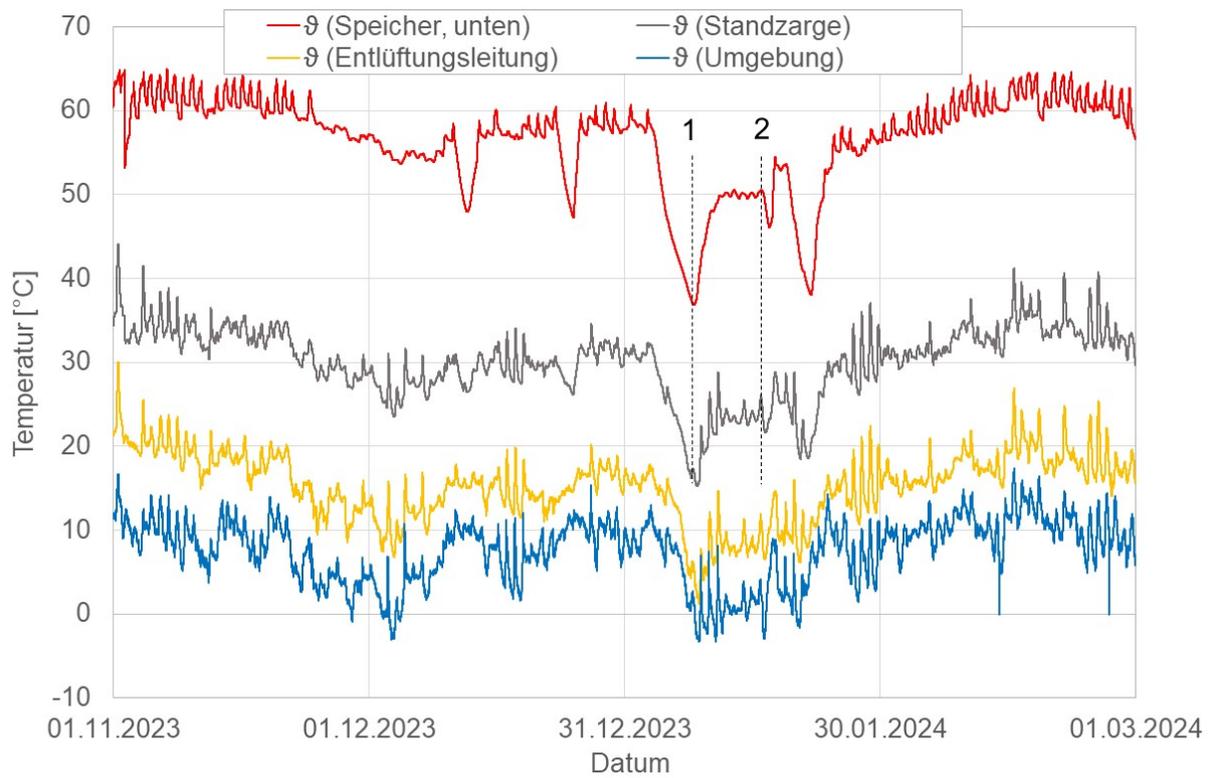


Abbildung 2-6: Temperaturverlauf der Umgebung, des untersten Speicherbereichs sowie an den 2 unterschiedlichen Positionen Standzarge und Entlüftungsleitung im Fußbereich des Speichers im Winters 2023/24.

3. Wissenschaftliche Begleituntersuchungen (AP2)

Um das thermische Verhalten von Warmwasserspeicher (WWS) mit transparenter Wärmedämmung (TWD) verlässlich berechnen zu können, ist das Ziel dieses AP die Überprüfung und Verbesserung der numerischen Rechenmodelle für solche Speicher.

Dazu wurden in einem ersten Schritt die experimentellen Untersuchungen aus dem Vorgängerprojekt „StoEx“ weitergeführt um vor allem hinsichtlich der absorberparallel auftretenden Wärmetransportphänomene weitere Erkenntnisse zu erlangen (siehe Abschnitt 3.1).

Auf Basis der weiterführenden experimentellen Untersuchungen wurde mittels eines Knotenmodells ein thermisches Modell für WWS mit TWD entwickelt (siehe Abschnitt 3.2). Mithilfe eines entsprechenden Parameteridentifikationsverfahrens wurde die Modellgüte mittels Messdaten anhand des am IGTE vorhandenen Funktionsmusters aus dem Vorgängerprojekt StoEx überprüft.

Abschließend wurde die vorhandene Modellgüte auf Basis des Knotenmodells mit der Modellgüte eines Black-Box-Modells auf Basis künstlicher neuronaler Netze verglichen (siehe Abschnitt 3.3).

3.1 Experimentelle Untersuchungen einer TWD

Die experimentellen Untersuchungen wurden an dem im Vorgängerprojekt „StoEx“ entwickelten Funktionsmusterspeicher mit transparenter Wärmedämmung auf dem Außenprüfstand des IGTE durchgeführt, siehe Abbildung 3-1 [Ger 2016]. Der untersuchte Warmwasserspeicher (WWS) mit Vakuumwärmedämmung (VWD) und absorberparalleler transparenter Wärmedämmung (TWD) wurde ebenfalls von der Firma Sirch gefertigt. Der Speicher besitzt eine Gesamthöhe von 6,1 m, einen Außendurchmesser von 2,2 m und ein Speicherwasservolumen von 12 m³. Der Wasserraum-Innendurchmesser beträgt 1,8 m und die Maximalhöhe der Wassersäule beträgt 5 m.

Die Vakuumwärmedämmung umschließt den inneren Speicherbehälter des WWS vollständig mit Ausnahme des inneren Bereichs der Standzarge (siehe Abbildung 2-1, Mitte). In diesem Bereich befinden sich die Revisionsöffnung als Zugang in den inneren Speicherbehälter, die Durchführung der hydraulischen Anschlüsse sowie die Entlüftung. Zusätzlich befinden sich vier Durchbrüche zur Durchführung von Messleitungen in diesem Bereich. Die Dicke der Vakuumwärmedämmung beträgt 200 mm. Das schüttfähige Wärmedämmmaterial besteht zu 30 Massenprozent aus pyrogener Kieselsäure und zu 70 Massenprozent aus grobkörnigem expandiertem Perlit und verfügt im Ringspalt über eine Schüttdichte von 62 kg/m³ und ein effektives Gesamtvolumen von 7,05 m³. Der Dämmraum ist auf einen Restdruck von kleiner 4 mbar evakuiert.

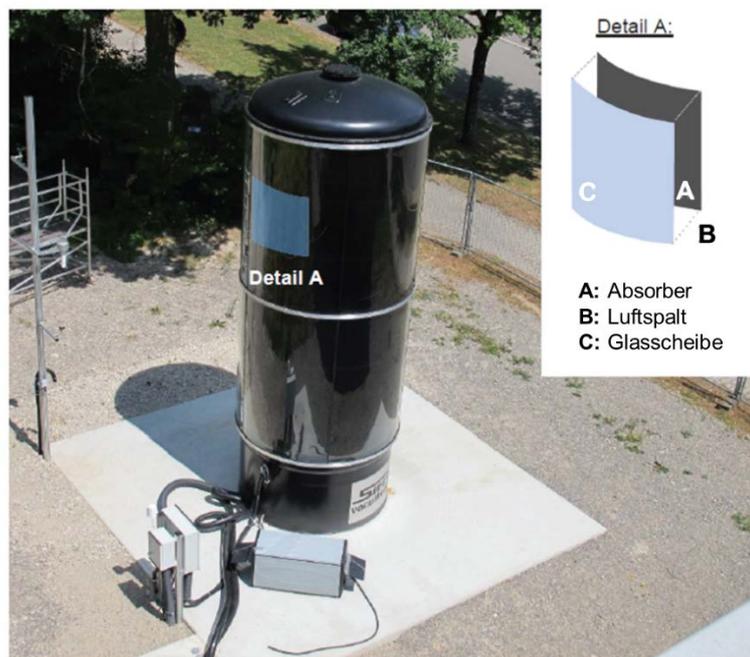


Abbildung 3-1: Vakuumwärmegedämmter, außen aufgestellter Warmwasserspeicher (WWS) mit absorberparalleler transparenter Wärmedämmung (TWD), die aus Absorber bzw. äußerer Speicher Oberfläche, Luftspalt und Glasscheibe aufgebaut ist (siehe Detail rechts oben).

Die transparente Wärmedämmung befindet sich auf dem zylindrischen äußeren Mantelbereich der Vakuumwärmegedämmung. Die TWD setzt sich aus mehreren gebogenen Glasscheiben zusammen, die mit Hilfe von Fixierschienen befestigt sind. In vertikaler Richtung ist die TWD unterbrochen. Dies verhindert einen Luftaustausch zwischen der oberen und der unteren Ebene. Jede Ebene besteht aus fünf gegeneinander abgedichtete Glasscheiben. Die Glasscheiben besitzen eine Stärke von 6 mm, einen Transmissionsgrad von 82 % und einen Absorptionsgrad von 10 %. Der Abstand zwischen der äußeren Speichermantelfläche und den Glasscheiben beträgt 35 mm. Auf dem äußeren Speichermantel ist eine temperaturbeständige, matt-schwarze, nicht-selektive Lackierung aufgebracht. Die verfügt über einen messtechnisch ermittelten und mit dem solaren Wellenlängenspektrum (AM 1,5) gewichteten Absorptionsgrad von 0,96. Die Wärmetransportphänomene, die an einer absorberparallelen TWD an einem zylindrischen WWS Speicher auftreten, sind an einem exemplarischen Ausschnitt in Abbildung 3-2 dargestellt. Die Speicheraußenoberfläche dient dabei als Absorber.

Der Außenprüfstand am IGTE besteht aus einem betonierten Fundament, den hydraulischen Anschlüssen für den Speicher und einem Schaltschrank für die Messtechnik. Es stehen zwei getrennte hydraulische Kreise zum direkten Be- und Entladen des Warmwasserspeichers zur Verfügung. In einer nahegelegenen Heizzentrale erfolgt die Temperierung und Druckhaltung der hydraulischen Kreise sowie die Messdatenerfassung.

Am Außenprüfstand werden u. a. die Temperaturen des Speichermediums (Sensoren: Pt100, Messunsicherheit: $\pm 0,15$ K) auf unterschiedlichen Höhen und die Absorbentemperaturen (Sensoren: Pt100, Messunsicherheit: $\pm 0,16$ K) der transparenten Wärmedämmung sowie die Umgebungsgrößen der Globalstrahlung (Sensor: Pyranometer, rel. Messunsicherheit: $\pm 1,5$ %),

der horizontalen Diffusstrahlung (Sensor: Pyranometer, rel. Messunsicherheit: $\pm 1,5\%$), der Windgeschwindigkeit (Sensor: Anemometer, Messunsicherheit: $\pm 0,2$ m/s) und der Umgebungslufttemperatur (Sensor: Pt100, Messunsicherheit: $\pm 0,27$ K) gemessen.

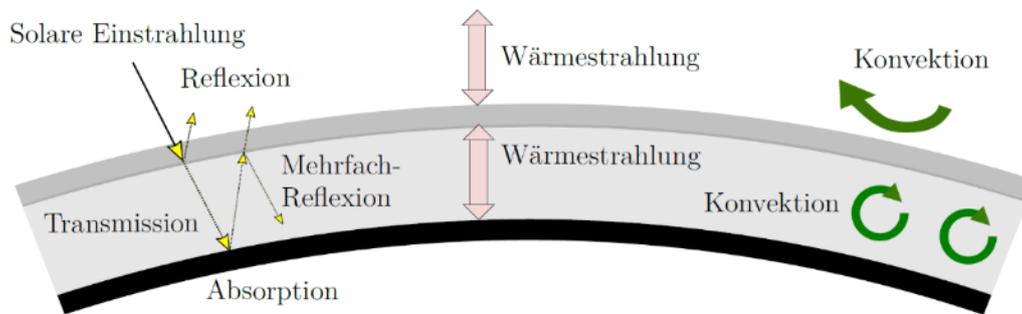


Abbildung 3-2: Relevante Wärmetransportvorgänge innerhalb einer transparenten Wärmedämmung (TWD).

Ergebnisse der messtechnischen Untersuchungen

Im Folgenden werden die experimentellen Ergebnisse zum thermischen Verhalten der am Funktionsmusterspeicher vorhandenen absorberparallelen TWD vorgestellt. Betrachtet werden insbesondere die Einflüsse, die erwartungsgemäß für das thermische Verhalten der TWD maßgeblich sind, wie z. B. die solare Einstrahlung und die Umgebungslufttemperatur [Gen 2020]. Die Analyse der Temperaturen und Strömungsvorgänge in der absorberparallelen TWD findet dabei sowohl während Auskühlversuchen des WWS, als auch während des regulären Speicherbetriebs mit Beladung, Entladung und Stillstandszeiten statt. In Abbildung 3-3 ist zunächst der Zusammenhang zwischen der solaren Einstrahlung, die als bedeutendste Einflussgröße betrachtet wird, und der erreichten Absorbertemperatur der Speicheroberfläche (äußere Speicheroberfläche) für den Zeitraum eines Jahres dargestellt.

Es ist ersichtlich, dass eine Anhebung der mittleren TWD-Absorbertemperatur (Speicheroberfläche in Abbildung 3-3) über die Umgebungslufttemperatur vorliegt und eine ausgeprägte Abhängigkeit der Absorbertemperatur von der Solarstrahlung sowie von der Umgebungslufttemperatur gegeben ist.

Die für das gesamte Betrachtungsjahr erreichte mittlere Temperaturerhöhung des Absorbers bzw. der Speicheroberfläche im Vergleich zur Umgebungsluft beträgt 9,26 K bei einer Einstrahlungssumme von 1.120 kWh/(m² a). Erwartungsgemäß zeigt Abbildung 3-3 ebenfalls, dass die Umgebungslufttemperatur und die solare Einstrahlung ausgeprägten jahreszeitlichen Einflüssen unterliegen. Im Monat Januar beträgt beispielsweise die mittlere Übertemperatur des Absorbers zur Umgebungsluft (Absorber - Umgebung) nur 3,65 K, wohingegen diese im August 13,98 K erreicht. Um repräsentative Aussagen zu den Wärmeverlusten des Speichers treffen zu können, ist daher bei der numerischen Modellierung derartiger Einflüsse ein Betrachtungszeitraum von mindestens einem Jahr erforderlich. Weiterführende Versuche zeigen zudem, dass aufgrund der hocheffizienten Vakuumwärmedämmung (VWD) kein signifikanter Einfluss der Temperatur des Speichermediums auf die Absorbertemperatur der TWD vorliegt.

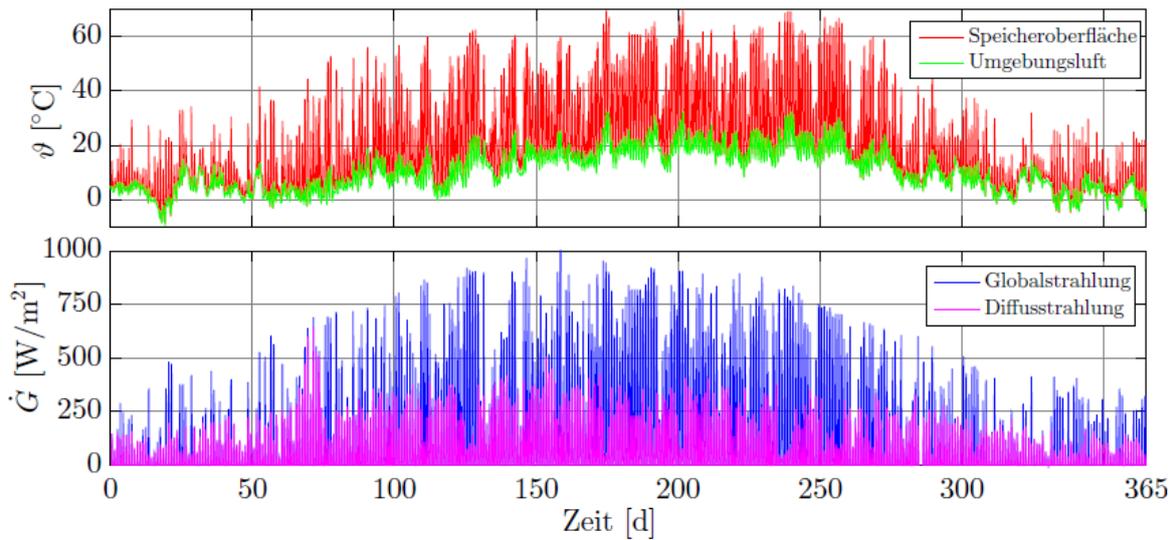


Abbildung 3-3: Über den Speichermantel gemittelte Absorbtemperatur (Speicheroberfläche), Umgebungstemperatur und Strahlungsleistung am außenaufgestellten WWS für den Betrachtungszeitraum eines Jahres.

Neben der Abhängigkeit der Absorbtemperatur von den saisonalen Einflüssen der solaren Einstrahlung und der Umgebungslufttemperatur, liegt eine ausgeprägte Abhängigkeit vom Tagesgang und entsprechend der Sonnenposition vor. Dies wird am Verlauf der lokalen Absorbtemperatur in Abbildung 3-4 für einen wolkenlosen Tag deutlich. An den einzelnen Teilflächen der TWD tritt ein zeitlich versetzter glockenförmiger Temperaturverlauf in Zeiten solarer Einstrahlung (Globalstrahlung) auf. Die Reihenfolge und die Ausprägung der Temperaturverläufe entsprechen der Erwartungshaltung unter Berücksichtigung des Sonnenstandes.

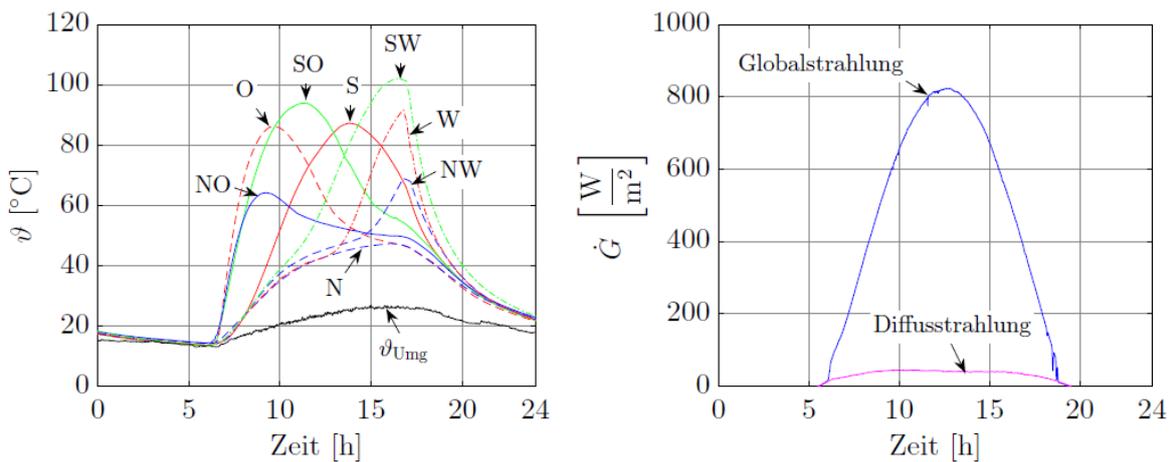


Abbildung 3-4: Lokale Absorbtemperatur der TWD entsprechend der azimuthalen TWD-Ausrichtung (links) und Umgebungslufttemperatur sowie Global- und Diffusstrahlung in der Horizontalen im Tagesgang (rechts).

Gemäß dem Fortschritt im Tagesverlauf nimmt das mittlere Temperaturniveau innerhalb der gesamten TWD zu. In Zeiten, in denen die solaren Gewinne die Wärmeverluste der TWD übersteigen, liegt ein Aufheizvorgang und in Zeiten, in denen die Wärmeverluste die solaren

Gewinne übersteigen bzw. keine Solarstrahlung vorhanden ist, liegt ein Abkühlvorgang der TWD vor. In Abbildung 3-4 tritt der Aufheizvorgang zwischen Stunde 6,5 und Stunde 17 auf. Der Abkühlvorgang beginnt ab Stunde 17, obwohl bis Stunde 18,5 Solarstrahlung vorliegt. Dies ist auf die vorliegenden Wärmeverluste und eine umgebungsbedingte Verschattung des Speichers zurückzuführen. Die lokal unterschiedlichen Absorbertemperaturen streben mit Beginn des Abkühlvorgangs gegen eine Mitteltemperatur. Diese nähert sich der Umgebungslufttemperatur an. Der Abkühlvorgang kann bis zum Beginn der solaren Einstrahlung des Folgetages andauern. Dies weist auf bedeutende thermische Kapazitäten der Speicheraußenhülle und eine relativ gute thermische Entkopplung der Speicheraußenhülle zur Umgebung, bedingt durch den Luftspalt zwischen Speicheraußenhülle und TWD bzw. Glasscheibe, hin. Weiterhin ist durch den Vergleich der Temperaturverläufe in Abbildung 3-4 das Vorliegen von radialen Wärmetransportprozessen ersichtlich, die zu einem Temperatúrausgleich zwischen den Teilflächen der TWD in Umfangsrichtung führen. Diese radialen Wärmetransportprozesse innerhalb der TWD stellen u. a. die Ursache der Temperaturzunahme der nicht direkt bestrahlten Nordseite der TWD dar. Durch die vertikale Anordnung der zylindrischen TWD und dem anfänglichen Aufheizvorgang wird im Tagesgang die maximale Temperatur von 101,93 °C erst nach dem Globalstrahlungsmaximum auf der Südwest-Seite der TWD erreicht. Es kann festgehalten werden, dass die lokalen Absorbertemperaturen von der vorherrschenden Solarstrahlungsleistung, dem Sonnenstand im Tagesgang und der Umgebungslufttemperatur beeinflusst werden. Weiterhin liegt durch die thermische Kapazität des Absorbers eine Abhängigkeit vom zeitlich vorausgegangenen thermischen Zustand der TWD vor. Im Hinblick auf die numerische Modellbildung ist daher eine dynamische Berechnung des thermischen Verhaltens der TWD notwendig.

Im Folgenden werden die innerhalb der TWD erwarteten Wärmetransportphänomene in absorberparalleler Richtung betrachtet. Eine phänomenologische Bewertung, in wie weit sich diese Transportprozesse auf das Absorbertemperaturfeld der TWD auswirken, erfolgt mittels ausgewählter TWD-Zustände repräsentativer Messtage. Abbildung 3-5 zeigt hierzu anhand von Thermografieaufnahmen die Änderung der Glasscheibentemperatur der TWD des vakuumgedämmten WWS im Tagesverlauf.

Das sich einstellende Temperaturfeld der Glasscheiben der TWD entspricht der Erwartungshaltung vor dem Hintergrund innerhalb der TWD vorhandener Konvektionswalzen, die in Abbildung 3-5 schematisch als Pfeilefeld eingetragen sind, und dem damit einhergehenden konvektiven Wärmetransport. In der unteren und oberen TWD-Ebene sind die Konvektionswalzen gezeigt, deren Auftreten aufgrund der gemessenen Temperaturen zunächst erwartet und durch Untersuchungen der Strömungsvisualisierung bestätigt wurde. Der Bereich der Auftriebsströmung folgt der azimuthalen Position der Sonne. Auf beiden Seiten der Auftriebsströmung liegen Konvektionswalzen vor, die bis zur sonnenabgewandten Seite der TWD reichen. Dort liegt eine Fallströmung vor. Weiterhin ist ersichtlich, dass in der unteren und oberen TWD-Ebene ähnliche Oberflächentemperaturen der Glasscheibe erreicht werden. Unterschiede sind insbesondere in der unteren mittleren bzw. unteren rechten Thermografieaufnahme zu erkennen. Diese werden durch eine gebäudebedingte Verschattung aus südlicher Richtung

sowie durch die unterschiedlichen Temperaturen des nicht mit einer Glasscheibe bedeckten Fußrings und Speicherdeckels verursacht.

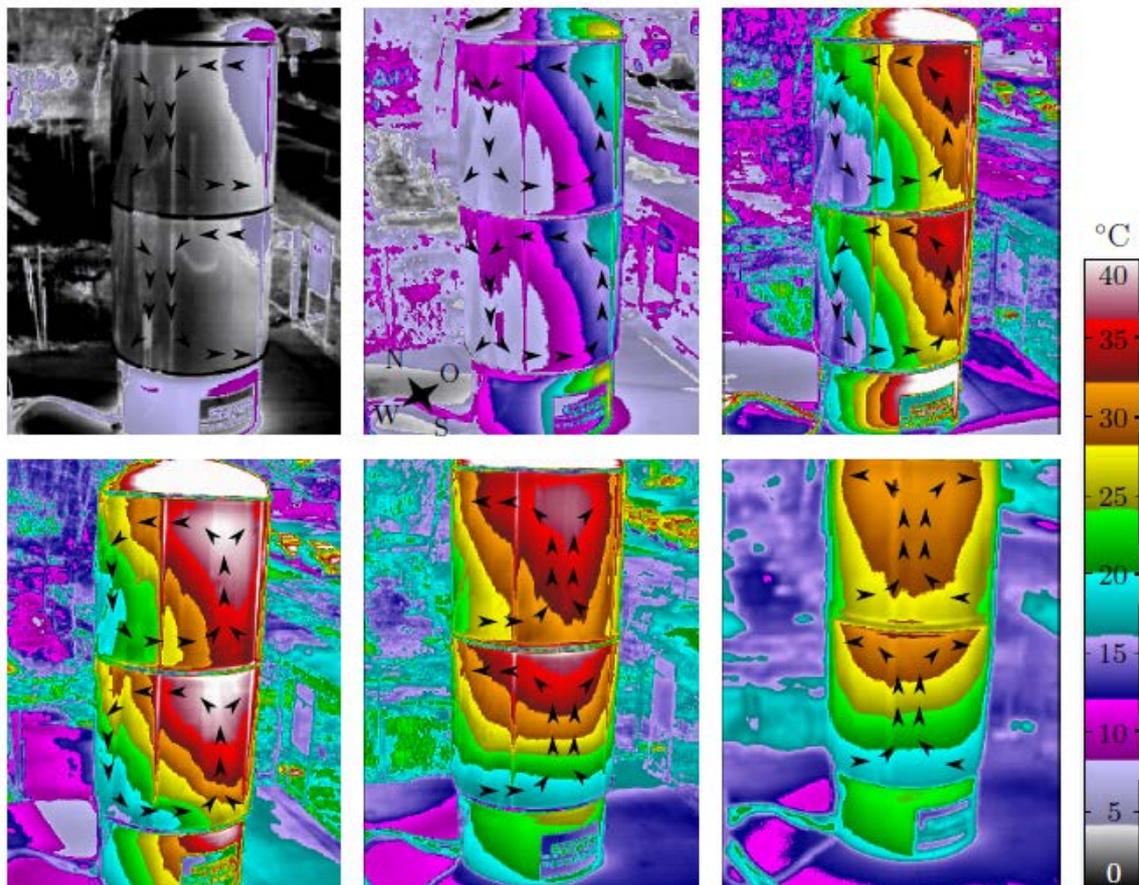


Abbildung 3-5: Thermografieaufnahmen des vakuumwärmegedämmten WWS mit 12 m³ Speichervolumen im zeitlichen Verlauf zwischen 9:30 Uhr (links oben) und 16:30 Uhr (rechts unten); dargestellt bei einem Transmissionsgrad der Luft von 1, einem Emissionsgrad der Oberflächen von 1 und einer Strahlungstemperatur der Umgebung von 8 °C.

Abbildung 3-6 zeigt exemplarisch die Absorbtemperatur der TWD entlang der TWD-Höhe auf der Speichersüdseite. Die Abbildung links zeigt den Aufheizvorgang und die Abbildung rechts den Abkühlvorgang der TWD im Tagesverlauf. Dabei erreicht das mittlere Temperaturniveau der TWD um ca. 14.00 Uhr ein Maximum.

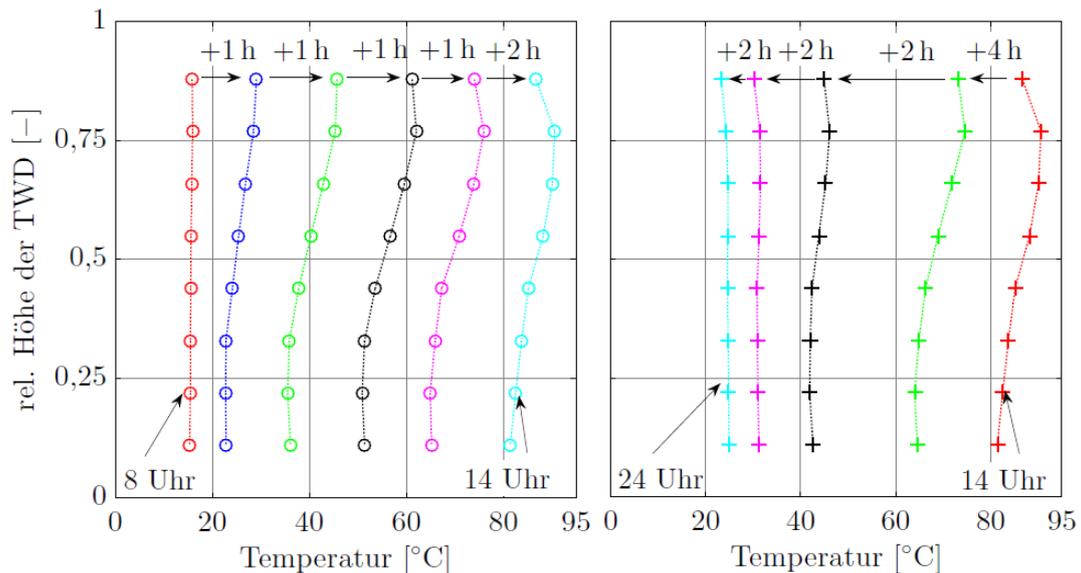


Abbildung 3-6: Oberflächentemperatur des Absorbers der TWD auf der Speichersüdseite für unterschiedliche relative Höhen der TWD (bezogen auf die TWD-Gesamthöhe) im Tagesverlauf; links: Aufheizvorgang der TWD, rechts: Abkühlvorgang der TWD.

Anschließend erfolgt eine Abkühlung auf die Umgebungslufttemperatur bzw. auf die Temperatur zu Beginn der solaren Einstrahlung um 8.00 Uhr des Folgetages. Zur Mittagszeit bildet sich ein Temperaturmaximum auf einer rel. Höhe von 0,76. Dies erklärt sich erneut durch das Vorliegen von freien Konvektionsströmungen in Form von Konvektionswalzen, die zu einer Anhebung der Lufttemperatur im oberen Bereich der TWD führen. Die Ausbildung eines Temperaturmaximums auf einer relativen Höhe kleiner 1 ist auf Randwärmeverluste der TWD zur Umgebung zurückzuführen, die zu einer Temperaturabnahme im Bereich des obersten Temperatursensors führen. Temperaturunterschiede über der gesamten Höhe sind ersichtlich, jedoch im Vergleich zur Änderung des mittleren Temperaturniveaus der TWD im Tagesverlauf gering.

Es kann festgehalten werden, dass innerhalb der TWD im Realmaßstab ein bedeutender Wärmetransport durch absorberparallele Wärmetransportphänomene in Form von Konvektionswalzen vorliegt. Ebenfalls bestätigen die Ergebnisse die phänomenologisch erwartete Struktur der Konvektionswalzen, die in Abbildung 3-7 nochmals gezeigt ist. Im Hinblick auf eine numerische Modellbildung des thermischen Verhaltens einer derartigen TWD wird eine Möglichkeit zur Wärmeübertragung in absorberparalleler Richtung notwendig. Durch die im Vergleich zum absoluten Absorbertemperaturniveau geringe Temperaturdifferenz über der TWD-Höhe (s. Abbildung 3-6) innerhalb einer TWD-Ebene kann dort auf die Berücksichtigung einer vertikalen Temperaturverteilung verzichtet werden.

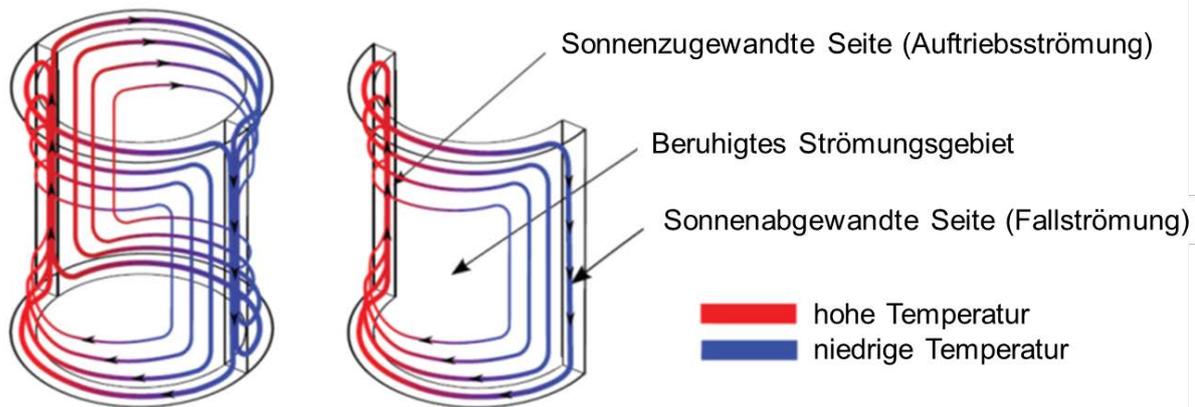


Abbildung 3-7: Schematischer Strömungsverlauf innerhalb des absorberparallelen Ringspalts der TWD bzw. eines Halbschnitts des Ringspalts der TWD am WWS.

Ergänzend wurde zu ausgewählten Zeitpunkten innerhalb der TWD lokal und temporär Nebel im Spalt zwischen Absorber und Glasscheibe eingedüst, um die erläuterte Strömungsstruktur der Konvektionswalzen zu visualisieren. Die Nebelerzeugung erfolgte mit einem Nebelgenerator vom Typ FlowMarker. Um eine isotherme Nebel einbringung in die Grundströmung innerhalb der Spaltstruktur zu ermöglichen, wurde der Nebel vor Eintritt in die TWD durch eine elektrische Heizstrecke temperiert. Mit diesem Vorgehen konnte eine Visualisierung der oben gezeigten Konvektionswalzen in der erläuterten Form innerhalb der TWD erreicht werden [Gen 2021]. Es wurden mittlere Strömungsgeschwindigkeiten im Luftspalt der TWD von bis zu 0,3 m/s, sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung, nachgewiesen.

3.2 Modellbildung mit Knotenmodell und Parameteridentifikation

Zusätzlich zu den in Abbildung 3-2 dargestellten Wärmetransportphänomenen, die an einer absorberparallelen TWD an einem zylindrischen WWS Speicher auftreten, können durch ein inhomogenes Absorbertemperaturfeld weitere Wärmetransportprozesse in absorberparalleler Richtung auftreten. Wie in Abbildung 3-7 aufgezeigt, können diese Prozesse sowohl in horizontaler als auch in vertikaler Richtung auftreten. Im Folgenden wird ein sogenanntes Knotenmodell verwendet um das in den experimentellen Untersuchungen erfasste thermische Verhalten der TWD rechnerisch abzubilden.

Aufgrund der großen thermischen Kapazität wird die Temperatur des Absorbers, d. h. des Speicheraußenmantels, als Knotentemperatur betrachtet. Die Knotentemperatur wird für jeweils 8 Segmente jeder der beiden TWD-Ebenen des Funktionsmusterspeichers modelliert. Die Position der Knotentemperatur ist dabei mittig auf der Segmentfläche angeordnet (siehe Abbildung 3-8).

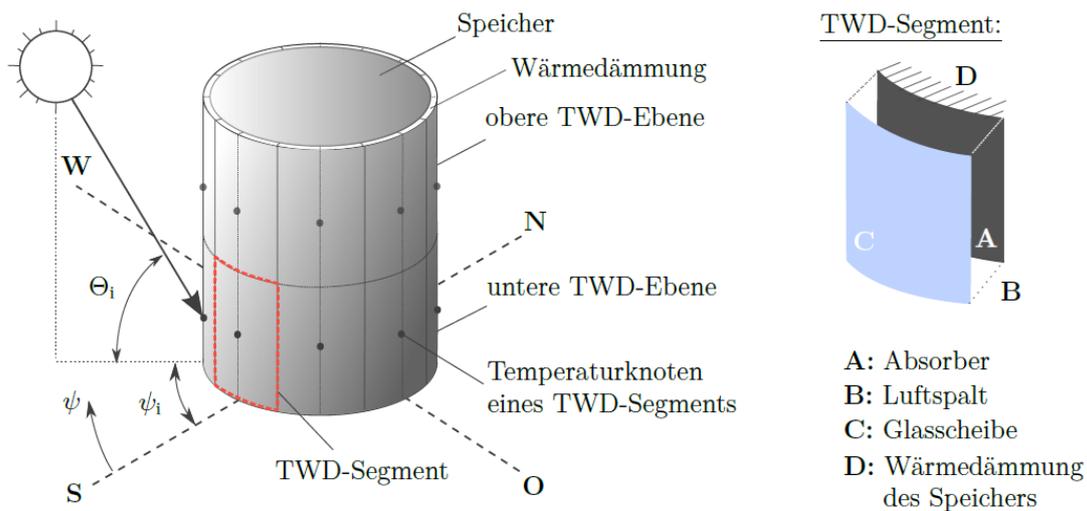


Abbildung 3-8: Schematische Anordnung der TWD an einem zylindrischen WWS (links) inklusive Winkelangaben zum Azimutwinkel ψ_i und zum Sonnenhöhenwinkel Θ_i ; schematischer Aufbau eines absorberparallelen TWD-Segments (rechts), vgl. Abbildung 3-1.

Die Energiebilanz für eine einzelnes Element i ist in Gl. 3-1 dargestellt. Die Änderung der inneren Energie mit der Zeit $\frac{\partial U_{abs,TWD,i}}{\partial t}$ entspricht dabei der vorliegenden solaren Einstrahlung $\dot{G}_{hem,i}$ abzüglich der Wärmeverluste zur Umgebung $\dot{q}_{verl,i}$ und abzüglich des effektiv reflektierten Anteils der Solarstrahlung $\dot{G}_{refl,i}$. Die Wärmestromdichte $\dot{q}_{Gew,i}$ ermöglicht die Berücksichtigung einer Wärmeübertragung zwischen Speichermedium und TWD.

$$\frac{1}{A_{seg}} \cdot \frac{\partial U_{abs,TWD,i}}{\partial t} = \dot{G}_{hem,i} - \dot{G}_{refl,i} - \dot{q}_{verl,i} + \dot{q}_{Gew,i} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Das sich aus der Energiebilanz ergebende Gleichungssystem wurde mithilfe des Euler-Verfahrens gelöst. Die Bestimmung der physikalischen Parameter innerhalb des Gleichungssystems wurden mittels eines Parameteridentifikationsverfahrens anhand verschiedener Messreihen am Funktionsmuster bestimmt [Gen 2021]. Die physikalischen Parameter sind in Abbildung 3-9 dargestellt und darauffolgend bezeichnend aufgeführt.

Die Implementierung der Bestimmungsgleichung für die Absorbtemperatur der TWD erfolgte in der Simulationsumgebung in TRNSYS als Erweiterung des WWS-Modells Type 340 nach [Drü 2006]. Die Bestimmung der Einstrahlungswinkel und hemisphärischen Strahlungsleistung erfolgte durch den Solar Radiation Processor in TRNSYS.

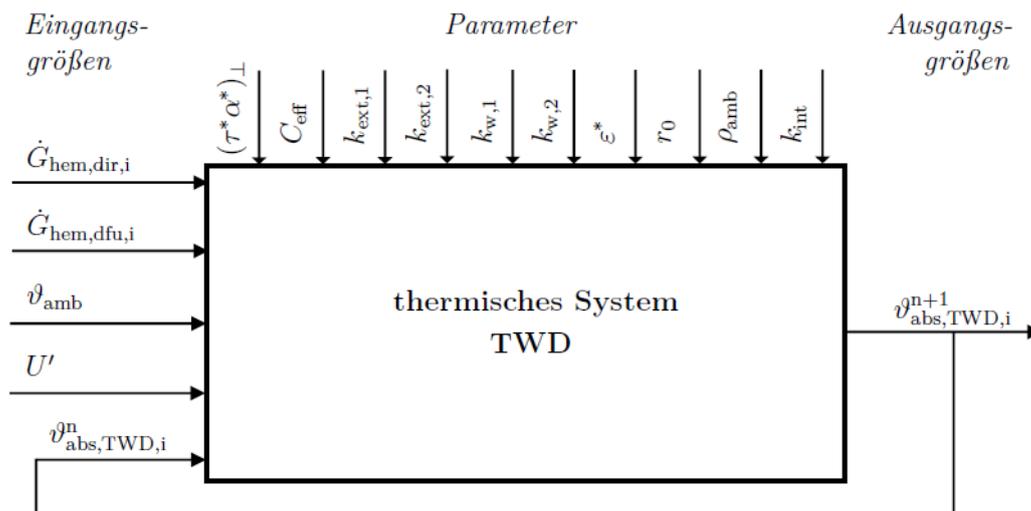


Abbildung 3-9: Schematische Darstellung der TWD-Modellierung anhand eines allgemeinen thermischen Systems in Anlehnung an [Drü 2006, Fis 2011.]

$(\tau \cdot \alpha)_{\perp}$	Transmissions-Absorptionsprodukt [–]
C_{eff}	effektive Wärmekapazität $\left[\frac{kJ}{K}\right]$
$k_{\text{ext},1}$	linearer Wärmeverlustkoeffizient $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
$k_{\text{ext},2}$	quadratischer Wärmeverlustkoeffizient $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
$k_{w,1}$	Einfluss der Windgeschwindigkeit $\left[\frac{s}{m}\right]$ [Fis 2011]
$k_{w,2}$	Einfluss der Windgeschwindigkeit $\left[\frac{J}{m^3 \cdot K}\right]$ [Fis 2011]
ε^*	Emissionsgrad [–]
r_0	Modellkoeffizient Einfallswinkelkorrektur [–]
ρ_{amb}^*	Reflexionsgrad [–]
k_{int}	interne WÜ von Segment zu Segment $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$

Die Modellgüte wurde anhand mehrere Auskühlversuche (AKV) geprüft. Dabei wurde der Zustand des Funktionsmusters nach der Beladung jeweils über mehrere Tage bzw. Woche ohne Aufprägung weiterer Volumenströme messtechnisch untersucht.

Abbildung 3-10 zeigt den Vergleich der gemessenen und berechneten mittleren Absorbertemperaturen im zeitlichen Verlauf eines Abkühlversuchs (AKV, oben) sowie den Vergleich der absoluten Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten mittleren Absorbertemperaturen (unten). Der Vergleich zeigt, dass die Modellierung die Dynamik der Änderung der mittleren Absorbertemperatur gut abbilden kann. Diese stellt für die energetische Modellierung die entscheidende Größe dar. Die größten Abweichungen treten während den Aufheiz- und Abkühlvorgängen zu Zeiten sich relativ stark ändernder solarer Einstrahlung auf. Es wird an-

genommen, dass die Abweichungen durch eine fehlerbehaftete Parameterkonfiguration auftreten. Insbesondere wird angenommen, dass die Modellannahme einer mit der Temperatur konstanten und für alle Segmente identischen spezifischen Wärmekapazität zu einer Überhöhung der berechneten Absorbtemperatur führt.

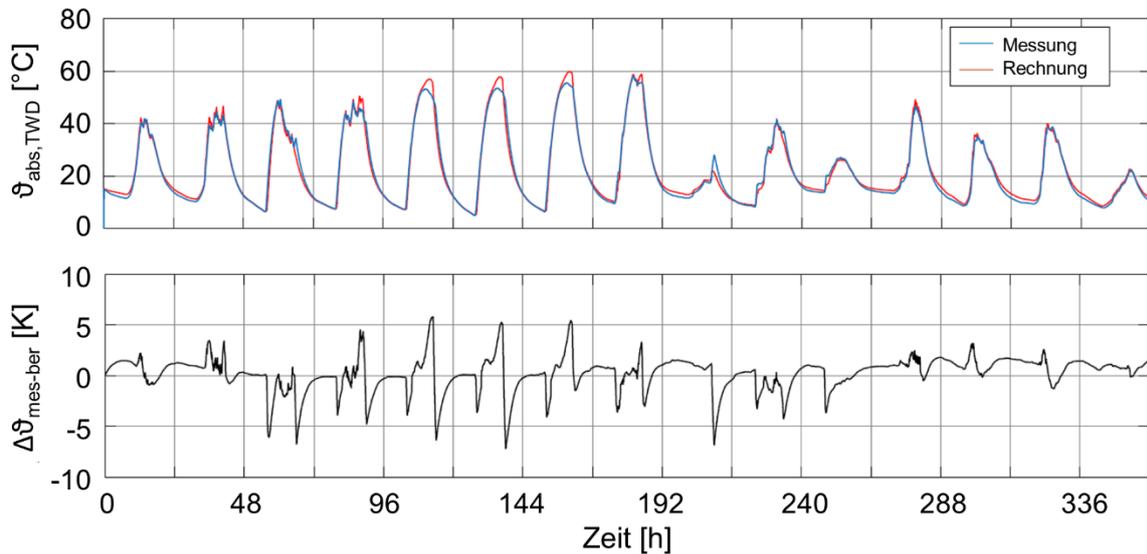


Abbildung 3-10: Vergleich der gemessenen und berechneten mittleren Absorbtemperaturen im zeitlichen Verlauf eines AKV (oben) sowie Vergleich der absoluten Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten mittleren Absorbtemperaturen (unten).

Weitere Ursachen für mögliche Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Absorbtemperaturen werden in einer noch ungenügenden Berücksichtigung einer teilweisen Verschattung sowie der Annahme einer über die Speicherhöhe konstanten Absorbtemperatur gesehen.

3.3 Modellbildung mit KNN

Um die Frage zu klären in wie weit die Modellierung der TWD in Verbindung mit einem WWS mittels künstlicher neuronaler Netze (KNN) zur Berechnung der Absorbtemperatur geeignet ist, werden im Folgenden die Ergebnisse eines solchen Modellierungsansatzes mit den Modellergebnissen des Knotenmodells aus Abschnitt 3.2 verglichen.

Bei der Verwendung von KNN zur Modellierung handelt es sich um sogenannte Black-Box-Modelle. Dabei erfolgt die Modellbildung rein auf Basis der Vorgabe von sogenannten Trainingsdaten mittels der die inneren Parameter des KNN variiert werden. Diese inneren Parameter werden hierbei derart geändert, dass die Trainingsdaten möglichst gut wiedergeben werden. Die inneren Modellparameter verfügen dabei über keinerlei physikalische Bedeutung. Daher ist bei der Modellierung mittels KNN die richtige Wahl der Ein- und Ausgangsgrößen entscheidend. Abbildung 3-11 zeigt eine schematische Darstellung einer Modellierung von KNN mit den hier zur Bestimmung der aktuellen Absorbtemperatur verwendeten Ein- und Ausgangsgrößen. Diese wurden entsprechend den Erkenntnissen aus Abschnitt 3.1 gewählt. Dabei ergibt sich die mittlere Absorbtemperatur $\vartheta_{abs,TWD}^{n+1}$ des nächsten Zeitschritts aus der jeweils aktuellen mittleren Absorbtemperatur $\vartheta_{abs,TWD}^n$, der Umgebungslufttemperatur ϑ_{amb}

sowie der solaren Einstrahlung \dot{G}_{hem} . Die Validierung solcher Modelle wird anhand von Validierungsdaten durchgeführt, d. h. Messdaten, die nicht für das Training der Modelle verwendet werden.

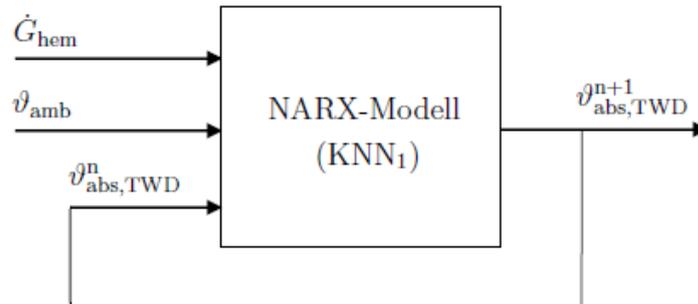


Abbildung 3-11: Schematische Darstellung der Ein- und Ausgangsgrößen für das künstliche neuronale Netz (KNN).

Ein Vergleich der Modellierungsergebnisse von KNN und Knotenmodell ist in Abbildung 3-12 dargestellt. Dabei zeigt sich für beide Modellansätze eine vergleichbare Modellgüte. Bei gleicher Modellgüte verfügt das Knotenmodell aber über den Vorteil der physikalischen Interpretierbarkeit der Modellkenngrößen. Außerdem zeigen die Ergebnisse eine bessere Generalisierbarkeit des Knotenmodells gegenüber des KNN-Modells für Zeiträume, die nicht zur Ermittlung der Parameter verwendet wurden. Vor allem zur Bestimmung der Modellparameter anhand relativ kurzer Prüfsequenzen ist dies von Bedeutung.

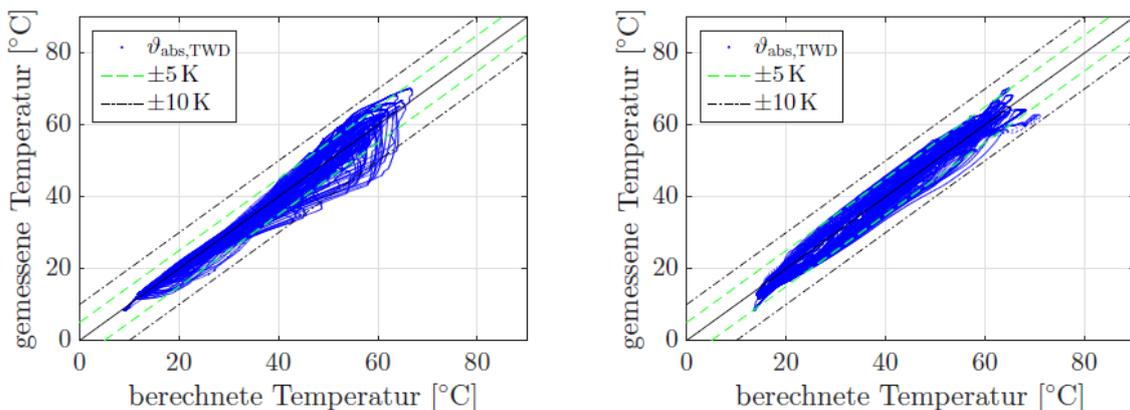


Abbildung 3-12: Vergleich der Ergebnisse von Knotenmodell (links) und künstlichem neuronalen Netz (rechts).

3.4 Zusammenfassung

Die im Vorgängerprojekt „StoEx“ erarbeiteten Erkenntnisse zur TWD wurden erfolgreich erweitert um deren theoretische Modellbildung zu verbessern und so auftretende Effekte besser abbilden zu können. Hierfür wurde die im Projekt StoEx aufgebaute Infrastruktur genutzt und zunächst umfangreiche experimentelle Untersuchungen durchgeführt um die Wärmetransportphänomene innerhalb der TWD besser zu verstehen. Die experimentellen Untersuchungen wurden an dem im Projekt StoEx gefertigten 12 m³ Funktionsmusterspeicher durchgeführt. So

konnten insbesondere auch Wärmetransportphänomene in Umfangsrichtung innerhalb absorberparalleler TWD an zylindrischen WWS analysiert werden.

Aufbauend auf den experimentellen Daten wurde eine Erweiterung und Verbesserung der bestehenden numerischen Modellierung der TWD umgesetzt. Die numerische Modellierung basiert auf einem sog. Knotenmodell, das in die Simulationsumgebung TRNSYS implementiert wurde. Im Vergleich zum Stand nach dem Abschluss des Projekts StoEx können nun insbesondere auch Wärmetransportphänomene, die bei absorberparallelen transparenten Wärmedämmung (TWD) in Umfangsrichtung am Speichermantel auftreten, berücksichtigt werden.

Weiter konnte eine umfangreiche Validierung des neu entwickelten TWD-Modells, das mit dem Modell des Warmwasserspeicher gekoppelt ist, durchgeführt werden. Es bestätigte sich die Hypothese, dass bei den im vorliegenden Fall untersuchten absorberparallelen transparenten Wärmedämmungen insbesondere Wärmetransportphänomene, die in Umfangsrichtung am Speichermantel auftreten, geeignet modelliert werden müssen. Eine Sensitivitätsanalyse des TWD-Modells zum Einfluss der thermophysikalischen Eigenschaften unterschiedlicher TWD-Materialien auf die erzielbare Reduktion der Wärmeverluste des Speichers zeigt, dass die optischen und wärmedämmenden Eigenschaften der TWD hierfür besonders relevant sind.

Weiterhin konnte neben der Modellierung mit Knotenmodellen eine Modellierung mit künstlichen neuronalen Netzen (KNN) erfolgreich durchgeführt werden. Hier konnten zwar vergleichbare Modellierungsergebnisse des thermischen Verhaltens der TWD erzielt werden. Insbesondere die fehlende physikalische Interpretierbarkeit der Modellkenngrößen dieser Modellierungsart und Einschränkungen hinsichtlich der Extrapolierbarkeit bereits trainierter künstlicher neuronaler Netze auf andere Betriebszustände weisen jedoch signifikante Nachteile gegenüber dem Modellierungsansatz auf der Basis von Knoten auf.

Das neu entwickelte TWD-Modell wurde für die Implementierung und den Test eines verallgemeinerten Parameteridentifikationsverfahrens verwendet. Dieses Verfahren ermöglicht die Ermittlung der Modellparameter von WWS mit TWD mit Wasservolumen größer 5 m^3 . Als repräsentativer Anwendungsfall wurde hierfür der 12 m^3 Funktionsmusterspeicher am Außenprüfstand des IGTE verwendet.

Die Ergebnisse der hier durchgeführten Untersuchungen zeigen, dass transparente Wärmedämmungen einen relevanten Beitrag zur Reduktion der effektiven Wärmeverluste von Warmwasserspeicher leisten können. Es konnte gezeigt werden, dass innerhalb des Luftspalts der transparenten Wärmedämmung (TWD) ein relevanter Wärmetransport in absorberparalleler Richtung stattfindet und relevante thermische Kapazitäten vorhanden sind. Diese Effekte sind von relevantem Einfluss auf das thermische Verhalten der TWD sowie der Außenoberfläche des Speichers. Sie sollten daher bei der numerischen Modellierung des thermischen Verhaltens solcher Speicher berücksichtigt werden.

4. Optimierung des Herstellungsprozesses (AP3)

Die gewonnenen Erfahrungen aus dem Bau des ersten vakuumwärmegedämmten Funktionsmusterspeichers mit 12 m³ Speichervolumen im Vorgängerprojekt StoEx zeigten, dass es für einen kostengünstigen Herstellungsprozess erforderlich ist, einige Herstellungsschritte grundlegend neu zu entwickeln und andere zu optimieren. Dies betrifft insbesondere

- das Einbringen des feinkörnigen Wärmedämmstoffs in kurzer Zeit bei möglichst geringer Staubentwicklung,
- die Identifizierung einer geeigneten Verdichtungstechnik für die feinkörnigen Wärmedämmstoffe in der Speicherwärmedämmung, um spätere Setzungen und daraus resultierende Wärmebrücken sicher vermeiden zu können,
- die Verkürzung des bisher sehr zeitintensiven Evakuierungsvorgangs.

Für die oben genannten Punkte wurden unterschiedliche Methoden identifiziert und diejenigen mit der Aussicht auf kosten- und zeiteffizienteste Umsetzung experimentell geprüft.

4.1 Optimierung der Dämmstoffbefüllung des Speichers

4.1.1 Von der Firma Sirch verwendeter Wärmedämmstoff für doppelwandige vakuumwärmegedämmte Warmwasserspeicher

Die Firma Sirch verwendete während der Projektlaufzeit von StoEx2 für doppelwandige vakuumwärmegedämmte Warmwasserspeicher den Wärmedämmstoff Technoperl C1,5 des Herstellers Stauss-Perlite GmbH aus Österreich, siehe Abbildung 4-1, im Folgenden auch als „TPC1,5“ bezeichnet.

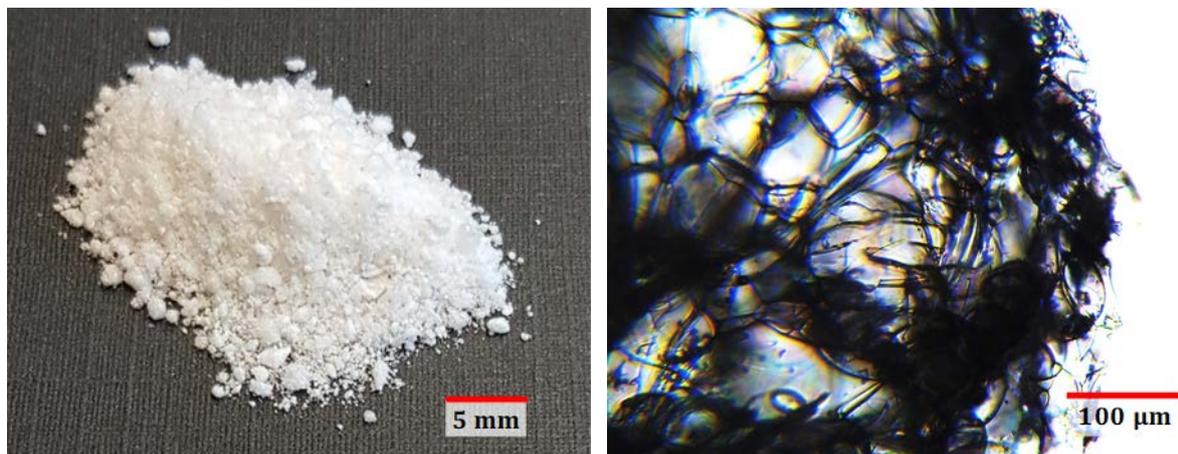


Abbildung 4-1: Wärmedämmstoff expandierter Perlite Technoperl C1,5 (TPC1,5) des Herstellers Stauss-Perlite GmbH. Links: Fotografie, rechts: Lichtmikroskopaufnahme (Durchlicht) eines Perlitkorns [Lan 2022]

Dieser Wärmedämmstoff wurde bereits mehrfach für vakuumwärmegedämmte Kältespeicher eingesetzt und kam in der Vergangenheit auch beim ehemaligen Mitbewerber Hummelsberger Schlosserei GmbH, der diese Speichertechnologie zwischenzeitlich nicht mehr anbietet, für vakuumwärmegedämmte Warmwasserspeicher zum Einsatz. Dabei handelt es sich um einen

expandierten Perlit, bestehend aus Schaumkörnern eines Vulkangesteins, mit einem maximalen Korndurchmesser von 2 mm. Die Abbildung 4-1 zeigt Fotografie- und Lichtmikroskop-Aufnahmen dieses Wärmedämmstoffs.

4.1.2 Stand der Technik

Zu Beginn des Projekts war bei der Firma Sirch eine schwerkraftbetriebene Einfüllung des Wärmedämmstoffs in den Dämmraum des stehenden Speichers der Standard. Dafür musste der liegend gefertigte Speicher mittels zweier angemieteter mobiler Kräne aufgestellt werden. Daraufhin wird der schüttfähige Perlit-Wärmedämmstoff über eine Befüllungsöffnung oben am Speicher schwerkraftbetrieben eingefüllt. Zur Positionierung eines sogenannten BigBags mit Perlit oberhalb der Befüllungsöffnung muss ein Kran genutzt werden. Eine Person öffnet dann den unten am BigBag angebrachten Entleerungsschlauch und verteilt den Perlit möglichst gleichmäßig in alle Umfangsrichtungen des weitgehend ringförmigen Dämmraums, falls der Perlit nicht selbstständig abrieselt. Am Speicheraußenmantel angeschraubte Rüttler sollen hierbei eine vollständige, gleichmäßige, hohlraumfreie Befüllung gewährleisten, siehe Abbildung 4-2. Zum Transport des Speichers zum Kunden muss der Speicher wieder mittels zweier angemieteter mobiler Kräne horizontal auf dem Transportfahrzeug abgelegt werden.



Abbildung 4-2: Stand der Technik der Dämmstoffbefüllung bei der Firma Sirch zu Beginn des Projekts StoEx2. Links stehender Speicher mit Rüttler; rechts oben: BigBag über Befüllungsöffnung; rechts unten: Öffnen des BigBags und schwerkraftbetriebene Befüllung in Öffnung des Speicherdämmraums

4.1.3 Identifikation von Optimierungsvarianten

Die Firma Sirch hat zunächst durch eine Anpassung der Abstände und Deckelgeometrien von Innen- und Außenwand oben ein einfacheres Abrieseln des Perlits in den Ringspalt des

Dämmraums bei stehendem Behälter ermöglicht, so dass auf eine händische Verteilung weitgehend verzichtet werden konnte. Dies verringert die Einfüllzeit.

Eine Dämmstoffbefüllung über Einblasen wurde bereits im Projekt StoEx untersucht. Diese hat allerdings nicht zu zufriedenstellenden Ergebnissen bzgl. der Staubentwicklung geführt [Ger 2016].

Für eine weitere Verringerung des Arbeits-, Zeit-, und damit auch Kostenaufwands wurden daher im Projekt StoEx2 die

- Dämmstoffeinsaugung in den stehenden Speicher, sowie die
- Dämmstoffeinsaugung in den liegenden Speicher

untersucht, mit dem Fokus auf einfache Umsetzbarkeit, möglichst hohen Automatisierungsgrad und eine vollständige, gleichmäßige, hohlraumfreie Befüllung bei möglichst geringer Staubentwicklung.

4.1.4 Dämmstoffeinsaugung in den stehenden Speicher

Zunächst wurden Varianten der Einsaugung des Wärmedämmstoffs in den Dämmraum des stehenden Speichers entwickelt und skizziert, siehe Abschnitt 4.1.4.1. Danach wurden anhand eines vom IGTE zur Verfügung gestellten Vakuumprobenbehälters (VPB) grundsätzliche Aspekte der Dämmstoffeinsaugung geprüft, s. Abschnitt 4.1.4.2. Dazu zählen die Staubentwicklung, die Homogenität und Verdichtung des Wärmedämmstoffs nach Einsaugung sowie das Nachlassen der Saugleistung durch Bildung eines Filterkuchens am Staubfilter. Daraufhin wurden in diversen Versuchsaufbauten weitere praktische Aspekte der Dämmstoffeinsaugung wie die maximale Einsaughöhe, der von der Saugleistung abhängige zu erwartende Dämmstoffmassenstrom und die Dämmstoffverteilung in einem Ringspalt durch eine rotierende Scheibe im Labormaßstab untersucht. Diese durchgeführten Arbeiten sowie die daraus resultierenden Ergebnisse sind in den Abschnitten 4.1.4.3 bis 4.1.4.5 dokumentiert.

4.1.4.1 Varianten der Dämmstoffeinsaugung in den stehenden Speicher

In Abbildung 4-3 sind die zwei untersuchten Varianten der Dämmstoffeinsaugung in einen stehenden Speicher dargestellt. Beide Varianten bieten gegenüber dem Stand der Technik der Dämmstoffbefüllung den Vorteil, dass zumindest während der Dämmstoffbefüllung nicht zwingend ein Kran eingesetzt werden muss, da der Wärmedämmstoff auf Bodenhöhe verbleiben kann. Die Dämmstoffverteilung im Ringspalt des Dämmraums soll in beiden Varianten durch die Fliehkräfte einer elektrisch betriebenen rotierenden Scheibe automatisiert erfolgen. Die rotierende Scheibe, sowie die Schläuche, Zyklonabscheider und Filter werden zum Ende der Befüllung entfernt und die zur Befüllung dienende Öffnung vakuumdicht verschweißt. Die Variante 1 bietet einen etwas geringeren Materialaufwand, da anstelle eines Zyklonabscheiders lediglich ein Staubfilter eingesetzt wird. Die Variante 2 hat demgegenüber den Vorteil, dass auf einen Filter und die damit einhergehende notwendige Reinigung des Filters verzichtet werden kann.

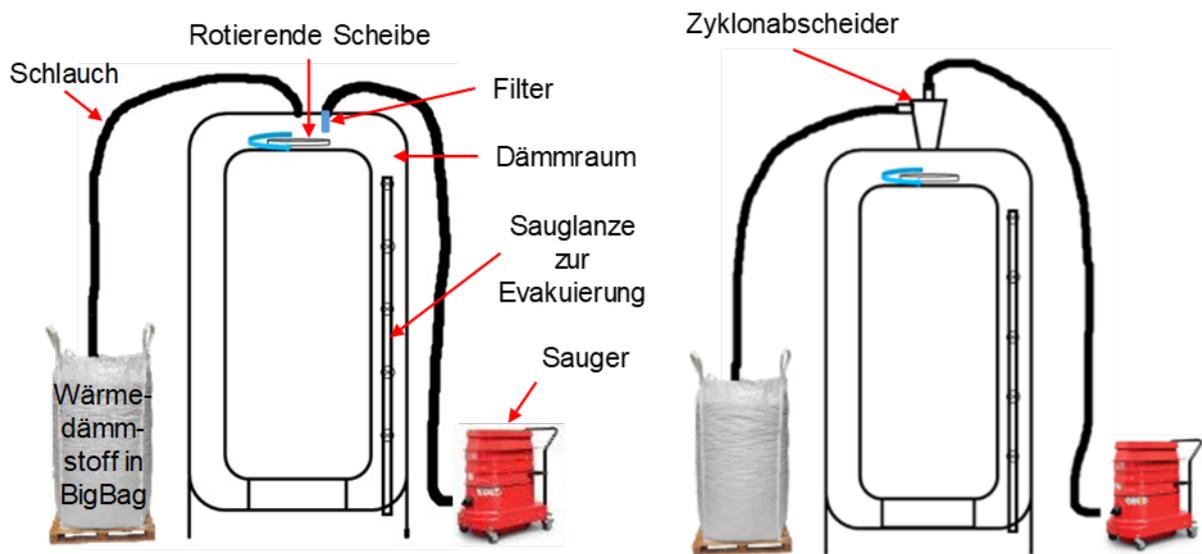


Abbildung 4-3: Varianten der Dämmstoffeinsaugung in einen stehenden Speicher. Links mit Filter (Variante 1); rechts mit Zyklonabscheider (Variante 2). Bildquelle BigBag: [Lin 2024]; Bildquelle Sauger: [Ruw 2016].

4.1.4.2 Untersuchungen anhand eines Vakuumprobenbehälters (VPB)

Für Voruntersuchungen sowohl zur Dämmstoffeinsaugung in den Dämmraum eines stehenden Behälters, als auch zu Untersuchungen zur Hohlraumbildung und zur Verkürzung der Evakuierungsdauer, wurde ein vom IGTE aus Eigenmitteln für ca. 43.000 € (inkl. Zubehör) beschaffter Vakuumprobenbehälter (VPB) eingesetzt, siehe Abbildung 4-4. Der VPB hat eine Grundfläche von ca. 900 mm x 900 mm und einer Höhe von ca. 70 mm und ist aus Edelstahl gefertigt. Er verfügt über eine Glasplatte als transparente Abdeckung, die zur Stabilisierung mit Kunststoffstützen aus Polyetheretherketon (PEEK) zur Aufnahme der mechanischen Last des Atmosphärendrucks abgestützt wird. Die Glasplatte ermöglicht die optische Untersuchung des Wärmedämmstoffs. Für die Befüllung sowie die Evakuierung des VPB sind mehrere Anschlüsse vorhanden. Mit Hilfe dieses VPB können u. a. unterschiedliche Dämmstoffbefüllungs- und Evakuierungsarten erprobt, untersucht und die Erkenntnisse daraus ggf. auf einen Speicherdämmraum im Realmaßstab übertragen werden.

Zunächst wurden mittels des VPB folgende Aspekte der Dämmstoffeinsaugung untersucht:

- Staubentwicklung,
- Homogenität des Wärmedämmstoffs nach Einsaugung,
- Verdichtung des Wärmedämmstoffs bei Einsaugung,
- Bildung eines Filterkuchens und Aufwand der Filterreinigung.

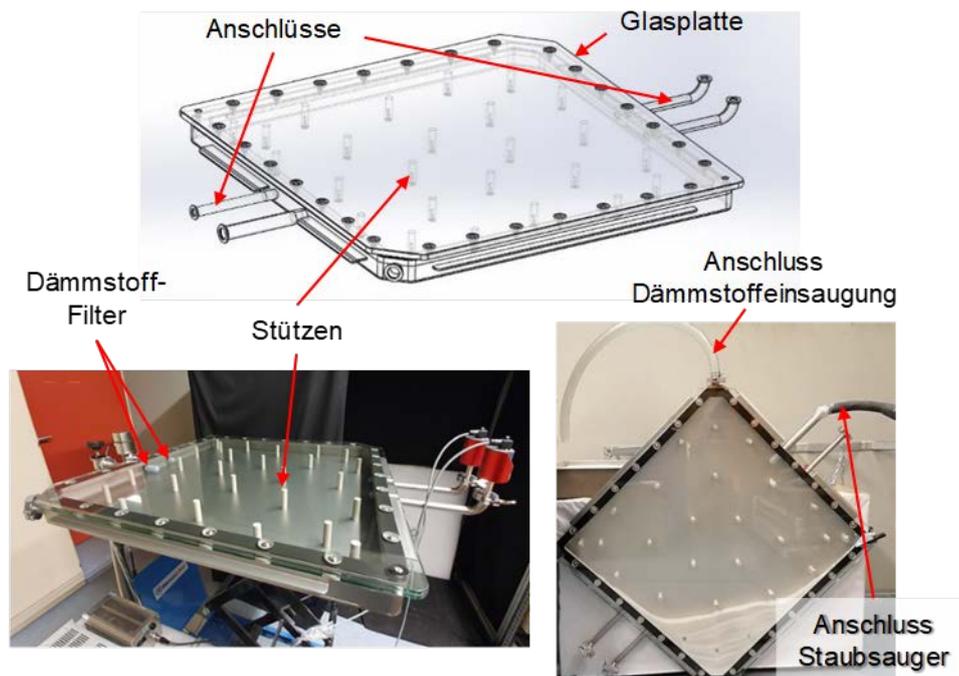


Abbildung 4-4: Vakuumpfenbehälter (VPB) des IGTE zur Untersuchung von Methoden der Dämmstoffeinbringung und der Verkürzung der Evakuierungsdauer sowie zur Untersuchung der Hohlraumbildung. Oben: halbtransparente CAD-Abbildung; unten links: nicht befüllter VPB mit Ventilen und Drucksensoren; unten rechts: teilweise befüllter VPB bei einem Versuch zur Dämmstoffeinsaugung.

Staubentwicklung

Bei den Einsaugversuchen konnte keine signifikante Staubentwicklung festgestellt werden, da die Dichtigkeit der relevanten Anschlüsse und Filter gewährleistet werden konnte. Eine Staubentwicklung ergab sich lediglich durch die Vorbereitung des Wärmedämmstoffs zur Einsaugung wie das Öffnen und Bewegen der Verpackung.

Homogenität des Wärmedämmstoffs nach Einsaugung

Die Homogenität des Wärmedämmstoffs nach der Einsaugung hing ab von der zur Verfügung stehenden Saugleistung und der Homogenität der Dämmstoffbestandteile. Insbesondere bei einer geringen Saugleistung kann der Dämmstoffvolumenstrom zeitlich variieren. Dies kommt dadurch zustande, dass der Schlauch der Dämmstoffeinsaugung zeitweise vom Wärmedämmstoff über den gesamten Strömungsquerschnitt und eine begrenzte Schlauchlänge belegt ist, wobei sich ein stärkerer Unterdruck im zu befüllenden Behälter aufbaut. Steigt der Unterdruck weit genug an, wird der Schlauch dann abrupt in den Behälter entleert und setzt sich danach wieder langsam zu.

Expandierte Perlite als Naturprodukt enthalten meist neben den aufgeschäumten Körnern auch einen gewissen Anteil an Fremdmaterial, welches während des Herstellungsprozesses nicht aufgeschäumt werden kann und somit in Form von massiven Körnern mit deutlich höherer Dichte im Vergleich zu den aufgeschäumten Körnern verbleibt. Dieser Kornanteil wird vorwiegend während der oben beschriebenen abrupten Einsaugphasen in den Behälter befördert, während der Feinanteil auch unter geringerem Unterdruck in den Behälter transportiert wird.

Zudem unterscheidet sich die Fallgeschwindigkeit der beiden Kornanteile. Dadurch kann es zu einer segmentiellen Teilentmischung kommen. Besonders deutlich wurde dieser Effekt sichtbar bei einer sehr untypischen Charge des Perlits TPC1,5 mit einem sehr hohen Anteil an massiven, ungeschäumten Körnern. Dieser Perlit wies mit einer losen Schüttdichte von 275 kg/m^3 einen 4 – 5,5-fach höheren Wert auf als typische Chargen dieses Wärmedämmstoffs, welche lose Schüttdichten zwischen 50 und 70 kg/m^3 aufweisen. Diese Entmischungen sind in Abbildung 4-5 links aufgrund der Farbunterschiede der unterschiedlichen Bestandteile gut sichtbar. Für die zu erwartenden Vakuumdrücke, Temperaturen und Dämmstoffdichten des Einsatzbereichs führen kleinere Poren und eine größere Dämmstoffdichte zu geringeren effektiven Wärmeleitfähigkeiten der Wärmedämmung. Eine Entmischung sorgt dafür, dass in Bereichen mit grobkörnigerem Perlit die Kornzwischenräume zu einem geringeren Grad mit feinkörnigerem Perlit gefüllt sind, wodurch im Wärmedämmstoff eine volumengemittelt geringfügig höhere Porengröße und geringere Dichte der Dämmstoffschüttung zu erwarten ist. Dies lässt eine höhere Wärmeleitfähigkeit und damit höhere Wärmeverluste des Warmwasserspeichers erwarten. Dieser Effekt ist auch abhängig von der konkreten Verteilung der Anteile unterschiedlicher Porengröße. Diese Verteilung sowie die volumengewichtet gemittelte Porengröße einer konkreten Dämmstoffschüttung ist nur sehr schwer zu bestimmen. Die Erhöhung der Wärmeverluste durch diesen Effekt wird allerdings als sehr gering eingeschätzt.

Bei ausreichender Saugleistung und einer Charge mit üblicher loser Schüttdichte des Perlits zwischen 50 und 70 kg/m^3 konnte hingegen keine signifikante Entmischung nach der Einsaugung erkannt werden, siehe Abbildung 4-5 rechts. Somit werden durch eine Dämmstoffeinsaugung bei einem realen Speicher keine signifikant negativen Effekte durch eine Entmischung erwartet.



Abbildung 4-5: Homogenität der Perlit-Dämmstoffschüttung nach dem Einsaugen in den VPB. Links: Perlit-Charge mit einer Dichte der losen Schüttung von 275 kg/m^3 ; rechts: Perlit-Charge mit einer Dichte der losen Schüttung von 58 kg/m^3

Verdichtung des Wärmedämmstoffs bei Einsaugung

Bei Einsaugung mit einer starken Saugleistung könnte es durch den Impuls beim Auftreffen der eingesaugten Körner auf die sich bereits im Behälter befindlichen Körner zu einer Verdichtung des Perlits kommen. Zudem könnten, vorwiegend durch den Impuls beim Auftreffen der

Körner auf Innenwände der Schläuche oder des Dämmraums, auch Schaumkörner zerbrechen. Dies würde ebenfalls zu einer Erhöhung der Dichte führen, da sich die kleineren Kornsegmente mit kleineren Kornzwischenräumen anordnen können. Eine höhere Dichte führt aufgrund der dadurch verstärkten Hemmung der Wärmestrahlung und der durch die verringerte volumengewichtet gemittelte Porengröße geringere Wärmeleitung durch das Restgas im Vakuum zu geringeren Wärmeverlusten. Allerdings führt sie auch zu höheren Dämmstoffkosten, aufgrund der größeren benötigten Dämmstoffmasse.

Zur Bestimmung der Dämmstoffverdichtung durch das Einsaugen wurde zunächst vorab die Dichte der losen Schüttung in einem Messzylinder durch Wiegen bestimmt und danach die Dämmstoffdichte im VPB, ebenfalls durch Wiegen ermittelt.

In Tabelle 4-1 sind die resultierenden Dichten und Verdichtungs faktoren von drei unterschiedlichen Chargen des Perlits aufgeführt.

Tabelle 4-1: Verdichtung des Perlit-Wärmedämmstoffs TPC1,5 durch Einsaugung.

Wärmedämmstoff: TPC1,5	Charge 1	Charge 2	Charge 3
Dichte lose Schüttung	275 kg/m ³	52 kg/m ³	58 kg/m ³
Dichte nach Einsaugen	276 kg/m ³	53 kg/m ³	63 kg/m ³
Verdichtungsfaktor	1,003	1,02	1,08

Die Charge mit der außergewöhnlich hohen Dichte hat sich durch das Einsaugen kaum weiter verdichtet. Der Verdichtungsfaktor von 1,003 entspricht einer Erhöhung der Dichte um 0,3 %. Die weiteren zwei Chargen wurden durch das Einsaugen um 2 % und 8 % verdichtet, was im Vergleich zur vorgesehenen Verdichtung mit einem Rüttler, um spätere Setzungen zu vermeiden (siehe Abschnitt 4.2.1.2), gering ist. Die Dämmstoffverdichtung durch Einsaugung allein ist demnach nicht ausreichend um spätere Setzungen zu vermeiden, wie auch in Abschnitt 4.2.1.2 gezeigt wird.

Bildung eines Filterkuchens und Aufwand der Filterreinigung

Die Saugleistung ließ im Laufe der Dauer der Dämmstoffbefüllung nach, was auf die Bildung eines Filterkuchens aus feinkörnigem Perlit zurückzuführen ist, siehe Abbildung 4-6. Durch Lösen des Saugers und Einblasen von Druckluft in den VPB durch den Filter ließ sich dieser Filterkuchen jedoch vergleichsweise schnell und einfach ablösen, wodurch die Saugleistung wieder stark erhöht werden konnte. Diese Lösung wurde daher auch für die Dämmstoffeinsaugung an einem realen Speicher angewendet, siehe Abschnitt 4.1.5.2.

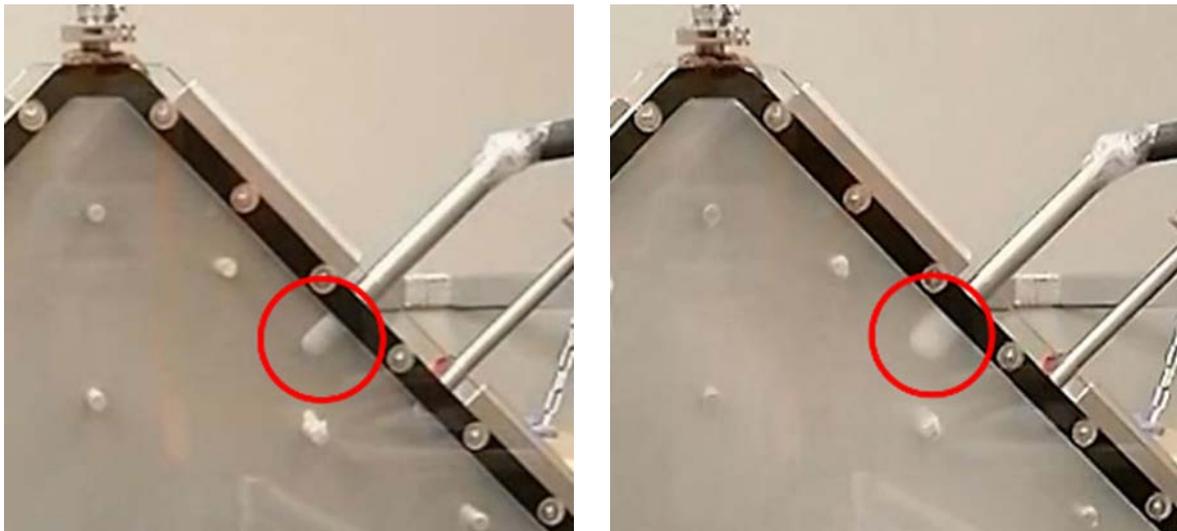


Abbildung 4-6: Staubfilter (rot umrandet). Links: vor der Dämmstoffeinsaugung; rechts: nach Dämmstoffeinsaugung

4.1.4.3 Untersuchungen der Dämmstoffeinsaugung durch einen Zyklonabscheider

Zur Voruntersuchung der Dämmstoffeinsaugung durch einen Zyklonabscheider in den Dämmraum eines stehenden Speichers entsprechend Abbildung 4-3 rechts, wurde der in Abbildung 4-7 gezeigte Aufbau im Labormaßstab realisiert.



Abbildung 4-7: Versuchsaufbau zur Dämmstoffeinsaugung durch einen Zyklonabscheider im Labormaßstab. Staubsauger: Kärcher WD 6 Premium

Die Laborversuche zeigten die prinzipielle Anwendbarkeit dieser Methode und einen hohen Abscheidegrad des Zyklonabscheiders. Das bedeutet, dass bei dichter Anbringung des Zyklonabscheiders auf dem Behälter nur ein sehr geringer Anteil der Perlitkörner des Wärmedämmstoffs in den Staubsauger eingesaugt wurde und somit der Wärmedämmstoff nahezu vollständig und bestimmungsgemäß in den Behälter transportiert wurde. Auch bei einer Einsaugung ohne Zyklonabscheider kann ein sehr geringer Anteil der feinsten Körner durch den Filter transportiert werden – je nach Abscheidegrad des Filters. Somit bietet ein Zyklonabscheider diesbezüglich nicht prinzipiell schlechtere Ergebnisse.

Bei undichter Anbringung des Zyklonabscheiders oder sonstiger hoher Leckagen wird wiederum ein deutlich erhöhter Dämmstoffanteil in den Sauger transportiert, weshalb unbedingt auf luftdichte Verbindungen zu achten ist. Die Firma Sirch hat sich für die Dämmstoffeinsaugung in den Dämmraum des liegenden Speichers entschieden, bei der kein Zyklonabscheider vorgesehen ist, weshalb die Befüllung mittels Zyklonabscheider im Projekt StoEx2 nicht an einem realen Speicher untersucht wurde.

4.1.4.4 Untersuchungen zur Dämmstoffverteilung in einen Ringspalt durch eine rotierende Scheibe

Unabhängig von einer Dämmstoffeinsaugung mit oder ohne Zyklonabscheider in den Dämmraum eines stehenden Speichers, stellt sich die Frage der gleichmäßigen Dämmstoffverteilung in den Ringspalt des Dämmraums. Je nach Abstand der oberen Speicherböden der Innen- und Außenwand des doppelwandigen Speichers, des Durchmessers und der Form des inneren Bodens sowie des Schüttwinkels des Wärmedämmstoffs wird dieser ggf. nicht ausreichend in den Ringspalt des Dämmraums abtransportiert und kann den Einsaug Schlauch oder Zyklonabscheider blockieren. Technologierecherchen und Vorüberlegungen zur Lösung dieses Problems ergaben eine elektrisch betriebene rotierende Scheibe mit Leitelementen als die vielversprechendste Lösung bzgl. Wirksamkeit, Wirtschaftlichkeit und Einfachheit der Umsetzung. Diese wurde daher im Labormaßstab untersucht. Dafür wurde zum einen der Versuchsaufbau aus Abbildung 4-7 um ein entsprechendes Einbauelement erweitert, welches im Innenraum des Behälters einen Deckel und einen Ringspalt erzeugt, siehe Abbildung 4-8 links. Zudem wurde ein analoger Aufbau in einem größeren Behälter für Untersuchungen verwendet, bei denen der Wärmedämmstoff anstelle mittels Einsaugung durch einen Zyklonabscheider lediglich händisch auf die rotierende Scheibe befördert wurde, siehe Abbildung 4-8 rechts in einer Draufsicht.



Abbildung 4-8: Vorrichtungen zur Untersuchung der Dämmstoffverteilung in einem Ringspalt durch eine rotierende Scheibe im Labormaßstab. Links: geschlossener Versuchsaufbau in Kombination mit Dämmstoffbefüllung durch Zyklonabscheider; rechts: offener Versuchsaufbau mit händischer Befüllung zur Visualisierung des Prozesses.

Im Labormaßstab konnte durch die rotierende Scheibe eine gleichmäßige Dämmstoffverteilung im Ringspalt erreicht werden. Diese war allerdings abhängig davon, wie zentral der Wärmedämmstoff auf die rotierende Scheibe auftrifft. Bei der Dämmstoffbefüllung eines realen Speichers werden allerdings zudem Rüttler eingesetzt, die auch bei nicht zentraler Einsaugung eine gleichmäßige Dämmstoffverteilung ermöglichen können. Die Rüttelwirkung reicht allerdings nicht aus, um eine schnelle Abrieselung des Perlits zu gewährleisten. Daher wird die Methode der rotierenden Scheibe weiterhin als vielversprechend für den Einsatz zur Befüllung des Dämmraums von Speichern bewertet.

Da sich die Firma Sirch für die Dämmstoffeinsaugung in den Dämmraum des liegenden Speichers entschieden hat, bei der keine rotierende Scheibe vorgesehen ist, wurde diese im Projekts StoEx2 nicht an einem realen Speicher untersucht.

4.1.4.5 Untersuchung zur maximalen Saughöhe und zur Füllgeschwindigkeit

Im Realmaßstab wird entsprechend Abbildung 4-3 vorgesehen, dass sich der Sauger und der Wärmedämmstoff am Boden befinden. Dadurch muss der Wärmedämmstoff entgegen der Schwerkraft für bis zu ca. 12 m in die Öffnung zur Dämmstoffbefüllung des stehenden Speichers transportiert werden. Die Machbarkeit und die dabei mögliche Füllgeschwindigkeit wurden am IGTE mit dem in Abbildung 4-9 dargestellten Versuchsaufbau für eine Saughöhe von ca. 13 m untersucht.

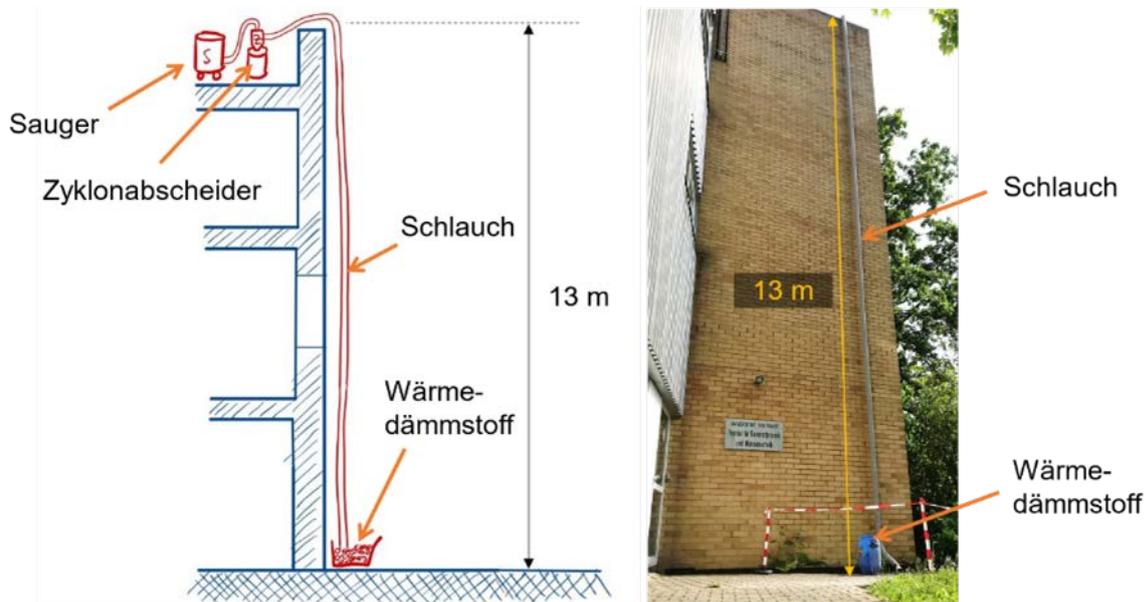


Abbildung 4-9: Versuchsaufbau zur Ermittlung der maximalen Saughöhe und Füllgeschwindigkeit.

Die Saughöhe von 13 m konnte mit Hilfe des Industriesaugers des Typs WSZ 2220 L des Herstellers Ruwac mit einer vom Hersteller angegebenen Saugleistung von 290 m³/h problemlos erreicht werden. Dabei wurde über einen Schlauch mit 9 cm Innendurchmesser eine Füllgeschwindigkeit von im Mittel ca. 400 kg/h Dämmstoffmassenstrom erzielt. Bei der üblichen Dichte der Dämmstoffschüttung von ca. 70 kg/m³ entspricht dies einem Dämmstoffvolumen-

strom von 5,7 m³/h. Damit könnte der 20,4 m³ große Dämmraum des Pilotspeichers für Neumarkt (im weiteren Verlauf „Pilotspeicher Neumarkt“ genannt) in 3,5 Stunden Einsaugzeit befüllt werden.

Der Pilotspeicher Neumarkt gehört mit einem Speichervolumen von 60,6 m³ zu den größten Speichern, welche die Firma Sirch fertigt. Dieser hat eine Höhe von 10,1 m. Da eine Saughöhe von 13 m im Vorversuch problemlos realisiert werden konnte, ist zu erwarten, dass diese Befüllmethode für alle von der Firma Sirch gefertigten Speicher anwendbar ist.

4.1.5 Dämmstoffeinsaugung in den liegenden Behälter

Wie in Abschnitt 4.1.2 beschrieben, wird der Speicher liegend gefertigt und zum Kunden transportiert. Für eine Dämmstoffbefüllung in den stehenden Speicher muss dieser daher von zwei angemieteten Kränen aufgestellt und danach wieder abgelegt werden. Dies ist ein zeit- und kostenintensiver Vorgang. Bei einer Befüllung des Dämmraums des liegenden Speichers kann auf den Kraneinsatz verzichtet werden. Daher wurden die in Abbildung 4-10 gezeigten unterschiedlichen Optionen der Dämmstoffeinsaugung in den Dämmraum eines liegenden Speichers untersucht. Sie werden in den nachfolgenden Abschnitten beschrieben.

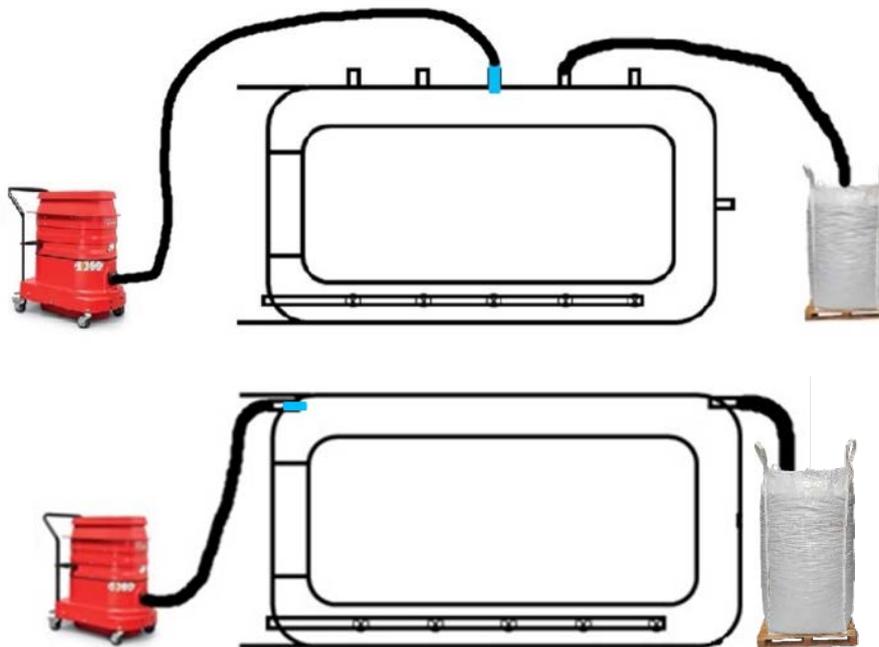


Abbildung 4-10: Optionen der Dämmstoffeinsaugung in den Dämmraum eines liegenden Speichers. In blau: abnehmbarer Staubfilter. Oben: radiale Einsaugung; unten: axiale Einsaugung [Ruw 2016], [Lin 2024].

4.1.5.1 Radiale Dämmstoffeinsaugung in den liegenden Behälter

Bei der radialen Einsaugung werden über die Mantelhöhe verteilt mehrere Anschlüsse zur Dämmstoffbefüllung benötigt, um eine vollständige Befüllung zu ermöglichen. Um eine hohe Saugleistung über die gesamte Einsaugdauer gewährleisten zu können, sollte der Anschluss für den Sauger samt Filter oben angebracht werden, damit der Filter sich nicht mit dem Wärmedämmstoff zusetzt und sich leicht abnehmen und reinigen lässt.

In Abbildung 4-11 ist Versuchsaufbau 1 zur Untersuchung der radialen Einsaugung dargestellt. Dabei wurde ein Versuchskörper verwendet, der einen Abschnitt des doppelwandigen Speichers nachbildet und beidseitig über transparente Kunststoffscheiben mittels Verschraubungen und einem Dichtungsband verschlossen ist. Dieser Versuchskörper hat einen Innendurchmesser von 100 cm, einen Außendurchmesser von 140 cm, eine Länge von 75 cm und wurde bereits im Projekt StoEx aufgebaut für die in Abschnitt 4.1.3 erwähnten Einblasversuche.



Abbildung 4-11: Versuchsaufbau 1 zur radialen Einsaugung.

Mit dem Versuchsaufbau 1 konnte eine vollständige Dämmstoffbefüllung mit einem maximalen Massenstrom von 22,7 kg/h mit Hilfe des stärkeren Saugers Ruwac WSZ 2220 L erreicht werden.

Der Massenstrom bzw. die Füllgeschwindigkeit kann deutlich erhöht werden, wenn der Dämmstoffbehälter mittels eines bei der Firma Sirch vorhandenen Hallenkran jeweils direkt über der Befüllungsöffnung platziert wird. Die BigBags verfügen an der Unterseite über Entleerschläuche, die mit den Stützen an den Befüllungsöffnungen verbunden werden könnten. Ein Versuchsaufbau zur Untersuchung dieser Option ist in Abbildung 4-12 dargestellt. Dafür wurde ein transparentes Rohr mit einem Trichter verbunden, der an einer der oberen Öffnungen des Versuchskörpers befestigt wurde. Das transparente Rohr wurde dann mit Dämmstoff befüllt und ersetzt in diesem Aufbau den BigBag. Diese Einfüllvorrichtung wurde auch zur Untersuchung von Verdichtungstechniken verwendet, die auf die Befüllungsversuche folgten; siehe Abschnitt 4.2.1.2. Der maximal erreichte Füllmassenstrom betrug bei diesem Versuchsaufbau 183,5 kg/h.

Der Versuchsbehälter konnte im Laborversuch vollständig in axialer Richtung mit Dämmstoff befüllt werden. Es lässt sich auf Basis dieser Versuche jedoch keine Aussage darüber treffen, in welchem axialen Abstand die Befüllungsöffnungen zueinander an einem realen Speicher vorgesehen werden müssen um eine vollständige Befüllung über die gesamte Höhe des Speichers zu gewährleisten.

In den Versuchen zeigte sich, dass der Füllmassenstrom bzw. die Füllgeschwindigkeit stark abhängig von der Dichtigkeit des Behälters ist. Die Dichtigkeit des Versuchskörpers war ver-

gleichsweise gering. Dadurch wurde nicht nur Luft und Wärmedämmstoff durch die Befüllöffnungen, sondern auch Umgebungsluft durch Undichtigkeiten zwischen den transparenten Kunststoffscheiben und dem Stahlkorpus angesaugt. Bei einem realen Speicher, der eine sehr hohe Dichtigkeit des Dämmraums vorweisen muss, kann daher mit einer höheren Füllgeschwindigkeit gerechnet werden. Die radiale Einsaugung wurde allerdings nicht an einem realen Speicher erprobt, sondern es wurde die axiale Einsaugung bevorzugt, die im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

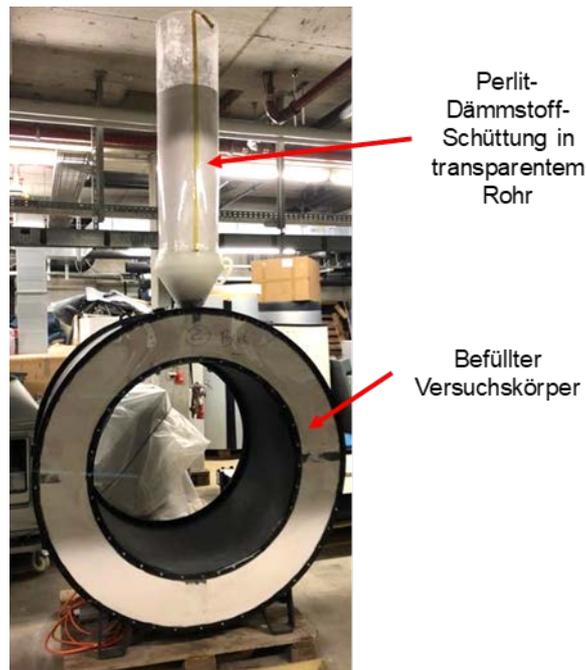


Abbildung 4-12: Versuchsaufbau 2 zur radialen Einsaugung mit Einfüllvorrichtung bestehend aus einem Trichter und einem transparenten Rohr (Sauger nicht mit abgebildet. Saugeranschluss wie bei Versuchsaufbau 1).

4.1.5.2 Axiale Dämmstoffeinsaugung in den liegenden Behälter

Bei der axialen Dämmstoffeinsaugung sind im Vergleich zur radialen Einsaugung weniger Anschlüsse am Speichermantel nötig und die Positionen der Schläuche für den Sauger und den Wärmedämmstoff müssen theoretisch während des Befüllvorgangs nicht geändert werden. Daher wurde diese Befüllungsvariante bevorzugt und auch an einem realen Speicher untersucht. Zunächst wurden zur Prüfung der Machbarkeit jedoch Laborversuche durchgeführt. Diese sollten zeigen, ob es möglich ist, den Wärmedämmstoff durch Einsaugen über mehrere Meter Länge zu transportieren und dabei das Innenvolumen trotz Hindernissen in Form von Einbauten vollständig zu befüllen. Über die Reynoldszahl als Ähnlichkeitskennzahl sollte damit auch bestimmt werden, ob sich der weitgehend ringspaltförmige Dämmraum eines realen Speichers mit dieser Methode grundsätzlich vollständig befüllen ließe. Daraufhin wurde die axiale Dämmstoffeinsaugung auch an dem für den Standort Kirchdorf an der Krems in Österreich geplanten Pilotspeicher experimentell geprüft.

Laborversuche

Für die Laborversuche wurde ein transparentes Kunststoffrohr mit einem Innendurchmesser von 18,5 cm und einer Länge von 365 cm verwendet, an welches an beiden Seiten je eine Abschlussplatte luftdicht befestigt wurde. In einer Abschlussplatte befindet sich ein Anschluss für den Sauger samt Staubfilter und an der anderen Abschlussplatte befindet sich eine Öffnung für einen Schlauch zur Dämmstoffbefüllung. Die Versuchsdurchführung wurde von mehreren Kameras aufgezeichnet. Zunächst wurden die mit den Saugern WD 6 Premium vom Hersteller Kärcher und dem Industriesauger WSZ 2220L vom Hersteller Ruwac einstellbaren Strömungsgeschwindigkeiten der Luft im Leerrohr mit Hilfe des Hitzdrahtanemometers TA300 der Firma Trotec gemessen. Aus der Strömungsgeschwindigkeit wurde der Luftvolumenstrom und die Reynoldszahl ermittelt. Dafür wurde eine verschließbare Bohrung in der Mitte des transparenten Rohrs vorgesehen. Der Versuchsaufbau dafür, sowie zur Befüllung des Rohrs ohne Hindernisse ist in Abbildung 4-13 dargestellt. Die Luftvolumenströme ließen sich mittels der unterschiedlichen Leistungsstufen der zwei Sauger zwischen 40,6 m³/h und 83,2 m³/h einstellen. Der maximale Luftvolumenstrom ist damit deutlich geringer als der vom Hersteller Ruwac des stärkeren Saugers WSZ 2220L angegebene von 290 m³/h. Dies könnte u. a. auf Undichtigkeiten im Versuchsaufbau und Messfehler bei der Strömungsgeschwindigkeitsmessung zurückzuführen sein.

Die vollständige und lückenlose Befüllung des transparenten Rohrs konnte bereits mit dem geringsten einstellbaren Volumenstrom von 40,6 m³/h erreicht werden. Dabei wurde der Feinanteil der Dämmstoffschüttung direkt vom Lufteinlass bis zum Luftauslass transportiert. Der gröbere Anteil häufte sich zwischen Luftein- und -auslass an. Dadurch kam es zu einer Strömungsquerschnittsverengung, wodurch die Strömungsgeschwindigkeit dort lokal anstieg. Durch die höhere Strömungsgeschwindigkeit wurde diese Anhäufung in Richtung Luftauslass transportiert. Dieser Vorgang setzte sich fort bis das Rohr innerhalb von 4,4 Minuten vollständig befüllt war.

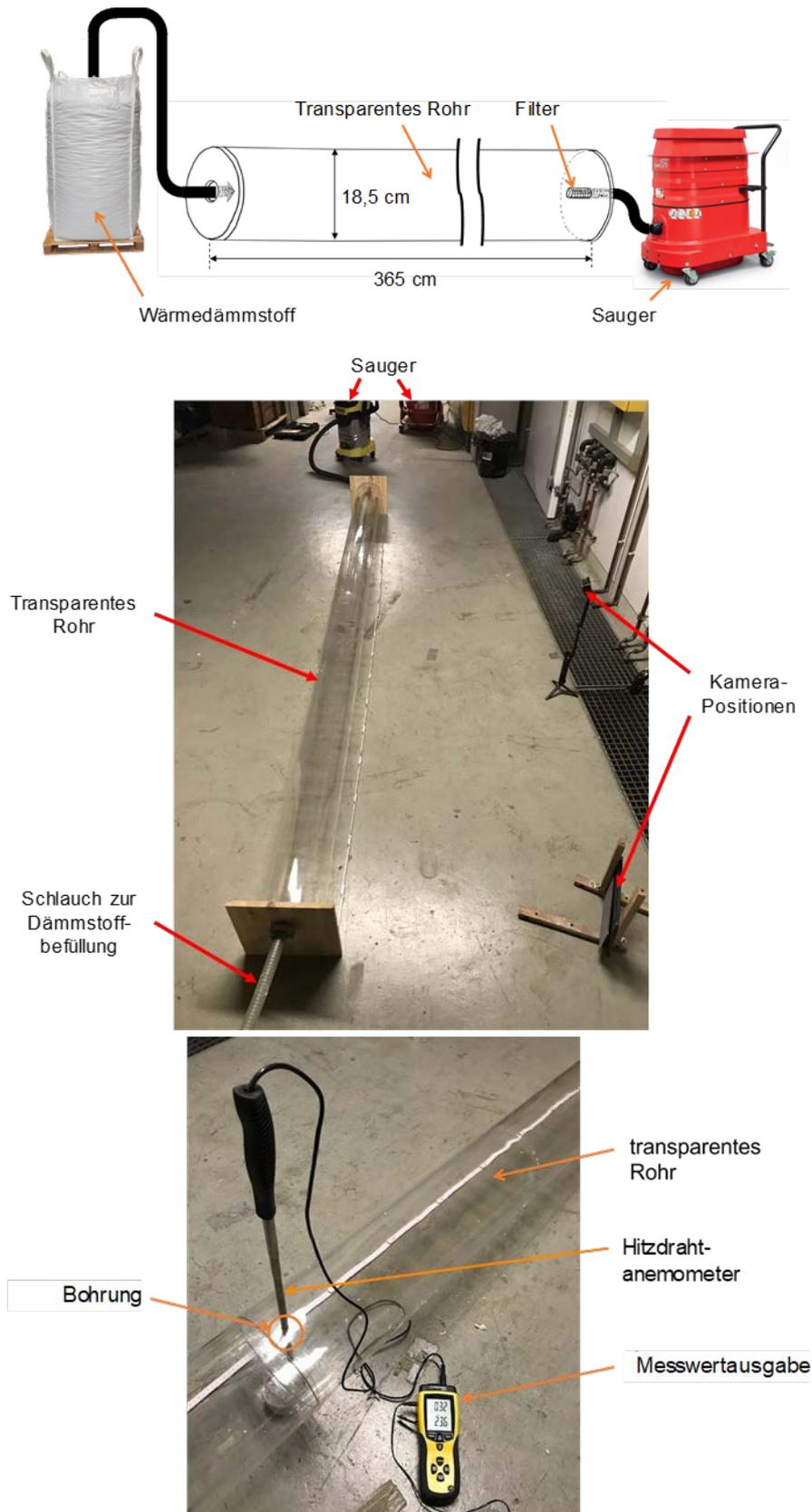


Abbildung 4-13: Versuchsaufbau zur axialen Dämmstoffeinsaugung im Labormaßstab. Oben: vereinfachte schematische Darstellung; Mitte: Fotografie des Versuchsaufbaus; unten: Versuchsaufbau der Luftgeschwindigkeitsmessung [Lin 2024], [Ruw 2016].

In Abbildung 4-14 ist der Füllstand zu sechs verschiedenen Zeitpunkten (1 – 6) in der Totalen (Perspektive A) dargestellt. In der Abbildung 4-15 sind die Zeitpunkte 4, 5 und 6 aus den Perspektiven E am Dämmstoffeinlass und F am Saugeranschluss dargestellt.



Abbildung 4-14: Dämmstoffeinsaugung in horizontales transparentes Rohr zu sechs verschiedenen Zeitpunkten (1 – 6) in hh:mm:ss in der Totalen (Perspektive A).

Der Füllvolumenstrom bzw. die Füllgeschwindigkeit bei einem Luftvolumenstrom von $40,6 \text{ m}^3/\text{h}$ betrug $1,34 \text{ m}^3/\text{h}$, was bei einer üblichen Dichte von $70 \text{ kg}/\text{m}^3$ einem Massenstrom von $93,5 \text{ kg}/\text{h}$ entspricht. Beim maximalen Luftvolumenstrom von $83,2 \text{ m}^3/\text{h}$ war das transparente Rohr nach 3,3 Minuten vollständig gefüllt, was einer Füllgeschwindigkeit von $1,8 \text{ m}^3/\text{h}$ entspricht. Bei einer üblichen Dichte von $70 \text{ kg}/\text{m}^3$ ergibt sich damit ein Massenstrom von $125 \text{ kg}/\text{h}$. Die Reynoldszahl lag bei der geringsten Strömungsgeschwindigkeit bei 5.072 und bei der höchsten Strömungsgeschwindigkeit bei 10.385. Beim Pilotspeicher Neumarkt mit einem Speichervolumen von $60,6 \text{ m}^3$ besteht der Dämmraum im Wesentlichen aus einem Ringspalt mit einem Innendurchmesser von 1,8 m und einem Außendurchmesser von 2,2 m. Wenn dort als Ähnlichkeitskennzahl die Reynoldszahl bei der geringsten im Laborversuch gemessenen Strömungsgeschwindigkeit angesetzt wird, ergibt sich bei diesem realen Speicher eine Strömungsgeschwindigkeit von $0,194 \text{ m}/\text{s}$ und damit ein Volumenstrom von $87,9 \text{ m}^3/\text{h}$. Dieser Volumenstrom ist theoretisch ausreichend um die Dämmstoffschüttung in den Ringspalt zu

transportieren, wurde in den Laborversuchen allerdings auch bei der höchsten Leistungsstufe des leistungsfähigsten geprüften Saugers WSZ 2220L vom Hersteller Ruwac mit $83,2 \text{ m}^3/\text{h}$ knapp unterschritten. Da beim realen Speicher allerdings von einer höheren Dichtigkeit ausgegangen werden kann und der Sauger laut Hersteller einen Volumenstrom von bis zu $290 \text{ m}^3/\text{h}$ erreicht, scheint hierbei ein höherer Luftvolumenstrom realistisch. Außerdem wurde in den Laborversuchen nicht die mindestens notwendige Strömungsgeschwindigkeit ermittelt und für die Berechnungen angesetzt. Somit könnten auch deutlich geringere Luftvolumenströme für eine vollständige Befüllung des Dämmraums ausreichend sein.

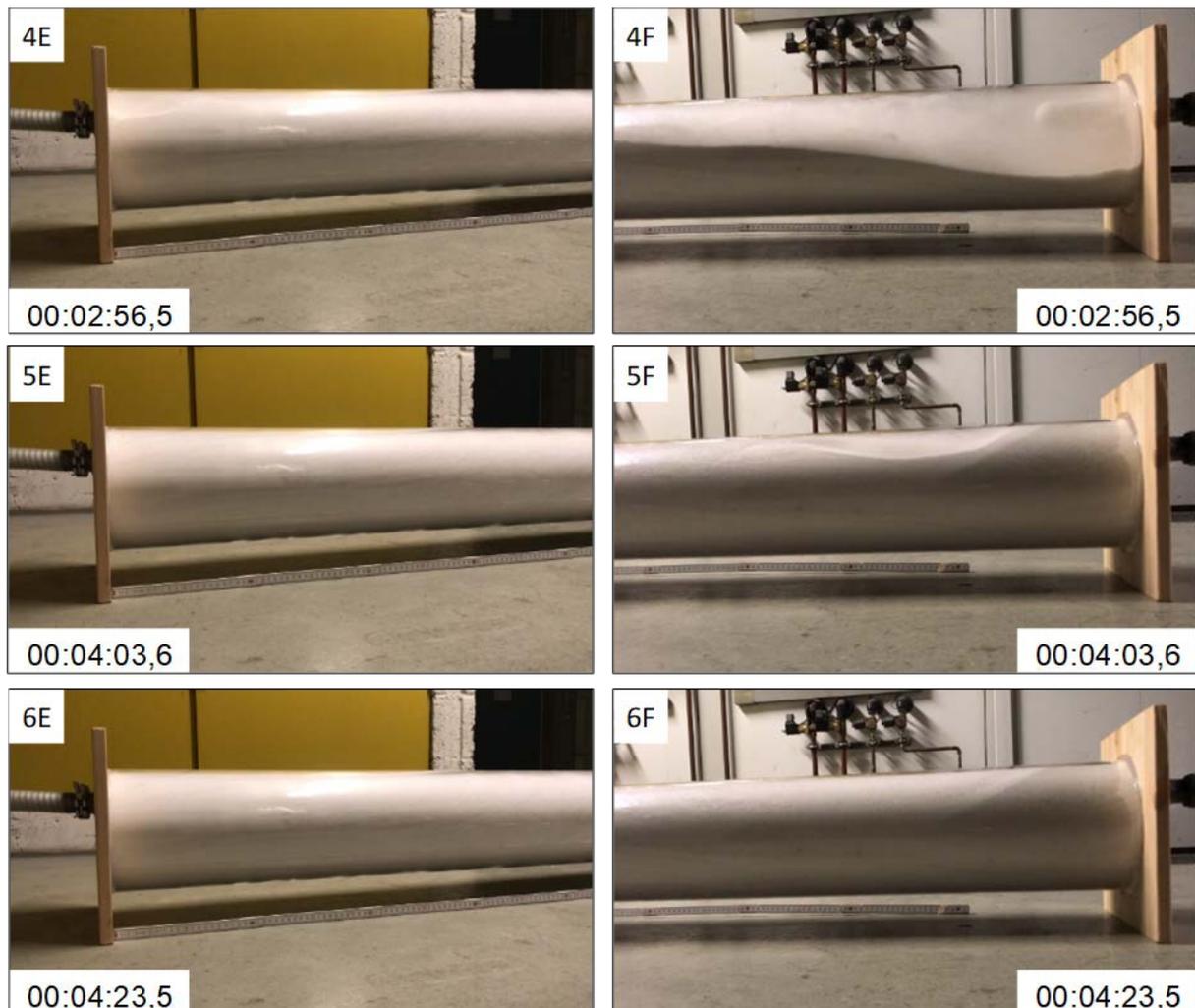


Abbildung 4-15: Dämmstoffeinsaugung in horizontales transparentes Rohr zu drei verschiedenen Zeitpunkten (4, 5, 6) in hh:mm:ss am Dämmstoffeinlass (Perspektive E, links) und am Saugersanschluss (Perspektive F, rechts)

Um zu prüfen, ob dieser Transportvorgang auch in einem Ringspalt mit Hindernissen erfolgen kann, wurde ein zweites, an beiden Enden abgedichtetes, transparentes Rohr („Innenrohr“) mit einem Außendurchmesser von 10 cm in das transparente Rohr mit dem Innendurchmesser von 18,5 cm eingeführt, siehe Abbildung 4-16. Die Abstandhalter dienten zur konzentrischen Positionierung und als Hindernisse, wie sie im realen Speicher auch in Form von Rollen zur Positionierung des Innenmantels in den Außenmantel vorhanden sind. Auch in diesem Aufbau

konnte das transparente Rohr durch Dämmstoffeinsaugung vollständig und ohne sichtbare Lücken gefüllt werden.



Abbildung 4-16: Versuchsaufbau zur axialen Dämmstoffeinsaugung im Labormaßstab mit Innenrohr.

Bei den Laborversuchen konnten also keine prinzipiellen Einwände gegen die Machbarkeit der Befüllmethode des axialen Einsaugens festgestellt werden. Zudem stellt sie in der Theorie die Befüllmethode mit dem geringsten Aufwand dar. Daher wurde sie im Realmaßstab untersucht, was im folgenden Abschnitt beschrieben wird.

Versuche im Realmaßstab

Die Einsaugversuche im Realmaßstab wurden zunächst am für den Standort Kirchdorf an der Krems in Österreich geplanten Pilotspeicher durchgeführt, der im weiteren Verlauf „Pilotspeicher Kirchdorf“ genannt wird. Dieser hat ein Speichervolumen von $7,9 \text{ m}^3$, ein Dämmraumvolumen von ca. 5 m^3 und im zylindrischen Bereich eine Ringspaltweite von 15 cm. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-17 dargestellt.

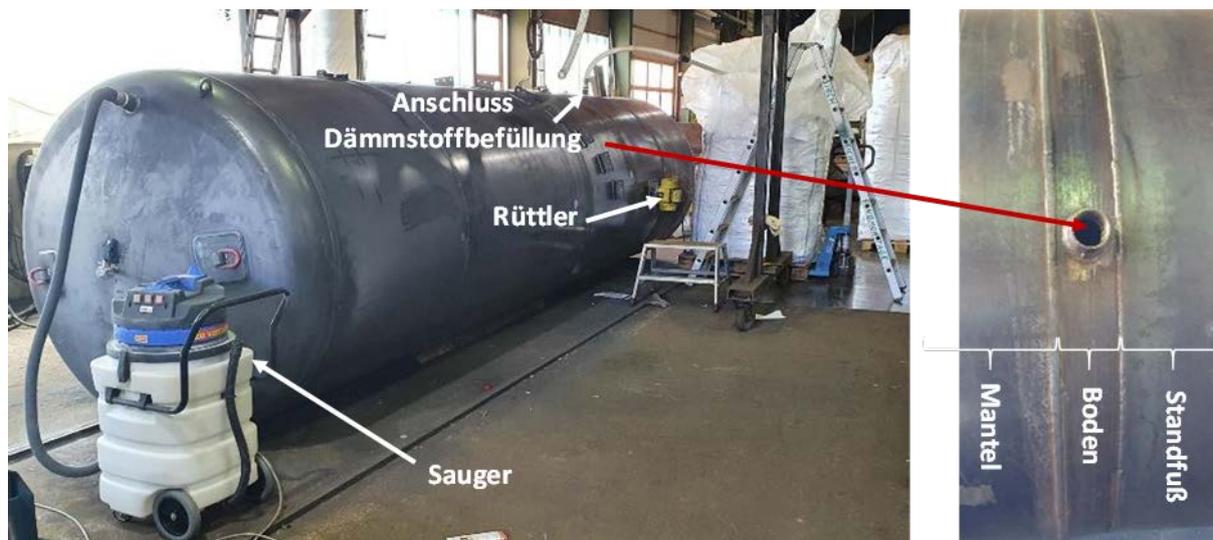


Abbildung 4-17: Versuchsaufbau zur axialen Dämmstoffeinsaugung im Realmaßstab am Pilotspeicher Kirchdorf (Speichervolumen: $7,9 \text{ m}^3$, Dämmraumvolumen: ca. 5 m^3).

Durch die axiale Einsaugung konnten ca. 95 % des Dämmraums bei geringer Staubentwicklung befüllt werden. Probleme beim Befüllprozess waren Verringerungen der Befüllgeschwindigkeit durch die eingesetzten Vorfilter, die ein Eindringen des Wärmedämmstoffs Perlit in den Sauger verhindern sollten, sowie die Tatsache, dass der eingesetzte Sauger nicht für den Dauerbetrieb geeignet war, wodurch einer seiner drei Motoren überhitzte und ausfiel. Für die Befüllung des restlichen Dämmraums mit Perlit wurde der Speicher aufgestellt. Mit Hilfe einer Vakuumpumpe wurde dann ein Gasdruck von ca. 100 mbar im Dämmraum erzeugt. Durch ein Ventil im oberen Bereich des Speichers wurden daraufhin die restlichen ca. 5 % des Perlits (ca. 230 Liter) mittels Druckausgleich eingesaugt. Die maximal erreichte Füllgeschwindigkeit bzw. der maximal erreichte Volumenstrom durch axiales Einsaugen in den Dämmraum des liegenden Speichers betrug ca. 2,5 m³/h, gemessen über einen Zeitraum von 22 Minuten. Es zeigte sich also, dass mit dieser Methode prinzipiell eine hohe Füllgeschwindigkeit bei geringer Staubentwicklung möglich ist. Allerdings ist ein für den Dauerbetrieb geeigneter leistungsstarker Sauger und ggf. ein Vorfilter mit hohem Durchsatz und ausreichendem Abscheidegrad nötig. Tatsächlich zeigte sich bei der darauffolgenden Fertigung eines weiteren vakuumwärmedämmten Warmwasserspeichers gleicher Bauart, aber mit einem deutlich höheren Speichervolumen von ca. 60,6 m³, dass die Dämmstoffbefüllung durch axiales Einsaugen in den Dämmraum des liegenden Speichers mit einem neuen Sauger und ohne Vorfilter vollständig, vergleichsweise schnell und problemlos funktioniert. Eine weitere Verringerung des Füllaufwands wäre evtl. durch die Positionierung der Perlit-BigBags oberhalb des Befüllanschlusses des Dämmraums durch einen Hallenkran möglich. Damit könnte die Förderung des Perlits zum Befüllanschluss schwerkraftbetrieben durch den unteren Anschluss des BigBags erfolgen, was den Personeneinsatz ggf. verringern würde. Falls eine vollständige Befüllung durch axiales Einsaugen in den Dämmraum des liegenden Speichers mit Hilfe eines Saugers nicht gelingt, ergibt sich auch die Möglichkeit am liegenden Speicher den Dämmraum auf ca. 100 mbar zu evakuieren und den restlichen Perlit mit Hilfe dieses Unterdrucks durch ein Ventil einzusaugen. Eine Aufstellung des Speichers wurde beim Pilotspeicher Kirchdorf nur vorgenommen, um das nicht befüllte Restvolumen besser sichten und quantifizieren zu können. Die Dämmstoffbefüllung durch axiales Einsaugen in den Dämmraum des liegenden Speichers hat sich letztlich als erfolgreich erwiesen und führt zu einer Vereinfachung sowie zu einer Beschleunigung und damit Vergünstigung der Fertigung von vakuumwärmedämmten Warmwasserspeichern. Die Kosteneinsparungen durch den geringeren Arbeitsaufwand und durch die Einsparung der Mietkosten für Kräne wurde von der Firma Sirch auf ca. 2.500 € je Speicher beziffert. Daher wird dieses Verfahren von der Firma Sirch für die Fertigung weiterer Speicher dieser Bauart übernommen.

4.2 Vermeidung und Detektion von Dämmstoffsetzungen und Hohlräum-bildungen

Insbesondere während des Transports des Speichers zum Kunden kann es durch Erschütterungen während der Fahrt zu Dämmstoffsetzungen kommen, die in großen Hohlräumen in der Wärmedämmung resultieren. Zudem kann auch eine unvollständige Befüllung nicht ausgeschlossen werden. Die resultierenden großen Hohlräume stellen Wärmebrücken dar, da sich zum einen ohne Wärmedämmstoff die Wärmestrahlung ungehindert ausbreiten kann. Zum

anderen ist die Wärmeleitfähigkeit des Restgases im Vakuum auch vom Abstand der das Gas begrenzenden Wände abhängig. Dieser Effekt wird Knudsen-Effekt oder Smoluchowski-Effekt genannt und ist beispielhaft in Abbildung 4-18 illustriert.

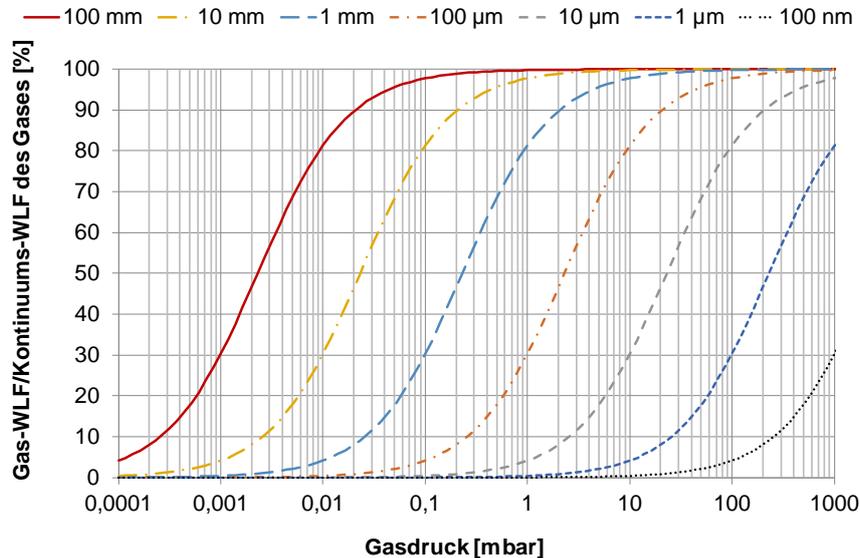


Abbildung 4-18: Gas-Wärmeleitfähigkeit (Gas-WL) bezogen auf die Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit des Gases für unterschiedliche das Gas einschließende Wandabstände über dem logarithmisch aufgetragenen Gasdruck

Als Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit wird vereinfacht gesagt diejenige Wärmeleitfähigkeit eines stehenden Gases bezeichnet, bei welcher sich das Gas beispielsweise bei Erdatmosphärendruck befindet und nicht in kleine Poren eingeschlossen ist. Die mittlere freie Weglänge der Gasmoleküle ist in diesem Bereich sehr viel kleiner als die das Gas begrenzenden Wände. Eine genauere Beschreibung dieser Effekte liefert u. a. [Lan 2022].

Der angestrebte Gasdruck im Dämmraum eines vakuumwärmegedämmten Warmwasserspeichers der Firma Sirch liegt bei ca. 0,1 mbar. Die eingesetzte Perlit-Dämmstoffschüttung hat einen volumengewichtet gemittelten Porendurchmesser von ca. 74 µm [Lan 2022]. Dabei wird die Gaswärmeleitfähigkeit auf nur ca. 3 % der Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit des Gases verringert. Bei einem Hohlraum von ≥ 100 mm kann bei 0,1 mbar bereits nahezu Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit erreicht werden. Daher gilt es Hohlräume durch geeignete Maßnahmen zu vermeiden. Diese Maßnahmen und deren Untersuchungen sind in Abschnitt 4.2.1 beschrieben. In Abschnitt 4.2.2 werden Untersuchungen zu den Möglichkeiten der Detektion solcher Hohlräume aufgezeigt.

Es wird in diesem Bericht häufig der allgemeine Begriff Gas anstelle von Luft für das Restgas im Vakuum verwendet, da sich die Zusammensetzung der vor der Evakuierung vorhandenen Luft durch die Evakuierung stark verändern kann. Zum einen werden durch die Evakuierung einige Luftmoleküle zu einem größeren Anteil entfernt als andere und zum anderen gehen im Vakuum flüchtige Substanzen, vornehmlich Wasser, von den sich im Vakuum befindlichen Oberflächen in die Gasphase über und ändern die Gaszusammensetzung damit signifikant.

4.2.1 Untersuchungen zur Vermeidung von Dämmstoffsetzungen und Hohlräumen

Zur Vermeidung von Setzungen muss der Wärmedämmstoff während der Befüllung hinreichend stark verdichtet werden, damit die nachfolgend zu erwartenden Erschütterungen zu keiner Nachverdichtung und damit an anderer Stelle zu Hohlraumbildungen führen können. Der Hersteller des untersuchten Wärmedämmstoffs berichtete zudem von Erfahrungen von starken Setzungen infolge der Evakuierung.

Zur Verdichtung des Wärmedämmstoffs wurde zum einen die bisher von Firma Sirch angewendete Technik des mechanischen Rüttelns untersucht, mit dem Ziel, die mindestens notwendige Rüttelstärke zu ermitteln. Zum anderen wurde eine Verdichtung durch den Impuls von einströmender Luft durch eine Ventilöffnung nach einer Vorevakuierung untersucht.

4.2.1.1 Untersuchungen zur Dämmstoffverdichtung durch Evakuierung und einströmende Luft

Nach der vorwiegend schwerkraftbetriebenen Dämmstoffbefüllung des Pilotspeichers Neumarkt entsprechend Abschnitt 4.1.2 sollte untersucht werden, ob es durch die Evakuierung zu Setzungen im Wärmedämmstoff kommt. Daher wurde die Befüllungsöffnung zunächst nicht vollständig verschweißt. Dort wurde ein Stutzen mit Blindflansch angebracht, um den Speicher zu evakuieren und danach eine Sichtprüfung bzgl. eventuell entstandener Hohlräume durchführen zu können. Der Speicher wurde dann über mehrere Stunden evakuiert und nach Öffnen des Blindflanschs wurde ein Hohlraum von ca. 200 L festgestellt. Daraufhin wurde ein Vakuumventil an den Stutzen angebracht, der Dämmraum wieder evakuiert und durch den Unterdruck über den Stutzen nach Öffnen des Ventils weiterer Wärmedämmstoff eingesaugt. Dies wurde so oft wiederholt, bis der Hohlraum verschlossen war. Damit konnte die Dämmstoffdichte im Dämmraum von $71,3 \text{ kg/m}^3$ auf $71,7 \text{ kg/m}^3$ gesteigert werden. Im Anlieferungszustand in den BigBags wies der Wärmedämmstoff eine Schüttdichte von $70,4 \text{ kg/m}^3$ auf.

Durch die intransparenten Wände des Dämmraums konnte beim realen Speicher nicht überprüft werden, ob die Hohlraumbildung durch das Evakuieren oder durch das Fluten (Wiederbefüllen mit Umgebungsluft) zustande kam. Eine Hohlraumbildung durch eine Evakuierung konnte allerdings bei keinem der zahlreichen Evakuierungsversuche am Vakuumprobenbehälter (VPB) mit transparenter Abdeckung festgestellt werden. Ein Hohlraum bildete sich jedoch nach einer Flutung des evakuierten und mit Wärmedämmstoff gefüllten VPB bei hoher Einströmgeschwindigkeit, wie beispielhaft in Abbildung 4-19 gezeigt wird. Es wird daher davon ausgegangen, dass auch beim Pilotspeicher Neumarkt die Hohlraumbildung aus der Flutung resultierte. Eine solche Flutung nach vorheriger Vorevakuierung könnte also theoretisch auch zur gezielten Dämmstoffverdichtung und Nachverfüllung verwendet werden, um spätere Setzungen zu verhindern.

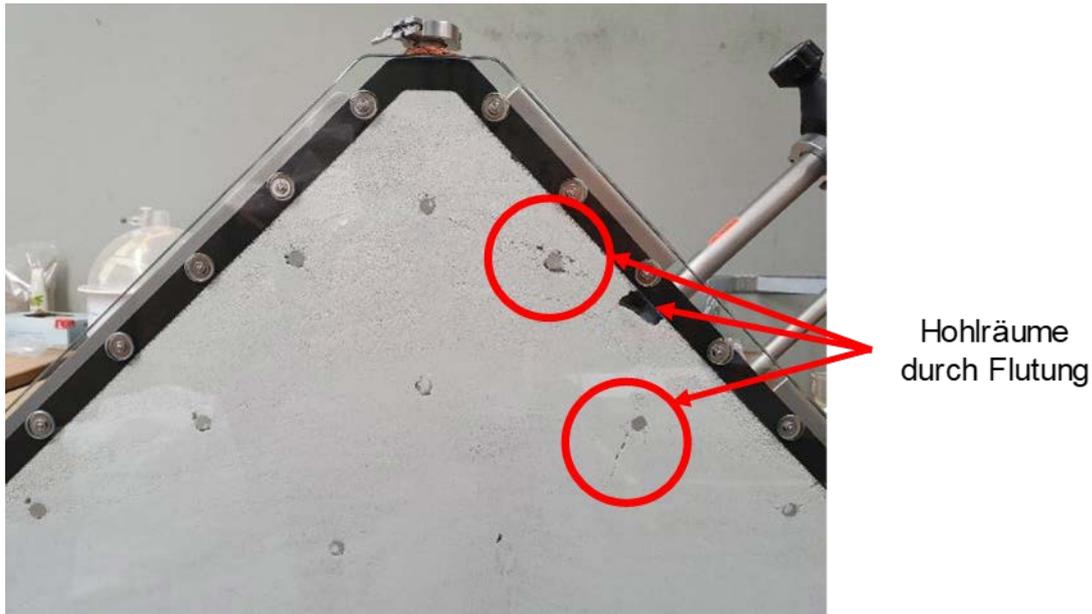


Abbildung 4-19: Hohlräume im Perlit-Wärmedämmstoff im VPB nach Flutung mit Umgebungsluft nach vorheriger Evakuierung.

Die Flutung führte allerdings in einigen Fällen am VPB auch zu Hohlräumen an von der Einströmstelle abgelegenen Stellen (s. Abbildung 4-19), die sich möglicherweise nicht wieder auffüllen lassen. Daher wird dieses Verfahren als vergleichsweise risikobehaftet eingeschätzt. Zudem bildeten sich bei der Flutung am Pilotspeicher Neumarkt Wassertropfen am Einlassventil. Ein Feuchteeintrag würde allerdings die Evakuierungsdauer erhöhen (siehe Abschnitt 4.3), weshalb dieser vermieden werden müsste. Eine Möglichkeit zur Trocknung eines einströmenden Luftstroms ist die Nutzung von getrocknetem Zeolith als starkem Adsorbens und damit Trocknungsmittel bzgl. der Luftfeuchtigkeit. Die Möglichkeit der Trocknung eines Luftstroms mit der für die Verdichtung notwendigen hohen Strömungsgeschwindigkeit durch einen Behälter mit getrocknetem Zeolith d. h. eine sogenannte „Zeolithfalle“, sowie die Trocknungswirkung des Zeoliths auf Luft in einem geschlossenen Behälter wurde daher anhand des in Abbildung 4-20 gezeigten Versuchsaufbaus untersucht. Die zylindrische Zeolithfalle hat eine Länge von 100 mm und einen Innendurchmesser von 25 mm. Die Zeolithschüttung aus dem Material 13X BF, u. a. vertrieben von BASF, hat somit ein Volumen von 49 mL. Der VPB hat ein Innenvolumen von ca. 33 L. Das Volumenverhältnis von Zeolith zu Behältervolumen beträgt somit 0,15 %.

Zum Abgleich wurde zunächst die relative Luftfeuchte und Temperatur der Umgebungsluft des Versuchsaufbaus mit dem Handmessgerät M0290 der Firma Extech Instruments gemessen. Daraufhin wurde die Messspitze des Messgeräts in den Schlauch für die Messung, luftdicht zur Umgebung, eingeführt und dort die Luftfeuchte gemessen. Dann wurde der VPB evakuiert, während alle Ventile am VPB und an der Zeolithfalle geschlossen blieben.

Anschließend wurde zunächst das Ventil 1 an der Zeolithfalle geöffnet, welches zur Erhöhung der Dichtigkeit angebracht wurde. Danach wurden die anderen beiden Ventile (2 und 3) an der Zeolithfalle gleichzeitig abrupt und vollständig geöffnet um eine möglichst hohe Strömungsgeschwindigkeit der einströmenden Luft zu ermöglichen. Nach Erreichen des Umgebungsdrucks

wurden die Ventile an der Zeolithfalle wieder geschlossen und das Ventil 4 am Schlauch wurde für die Messung der relativen Luftfeuchte der eingeströmten Luft geöffnet. Dieser Versuch wurde mehrere Male ohne und mehrere Male mit Zeolith in der Zeolithfalle durchgeführt. Nach der Messung eines hinreichend stationären Werts der relativen Luftfeuchte wurde das untere Ventil der gefüllten Zeolithfalle zum VPB hin geöffnet um die Wirkung der Lufttrocknung des Zeoliths in einem geschlossenen Luftvolumen bestimmen zu können.

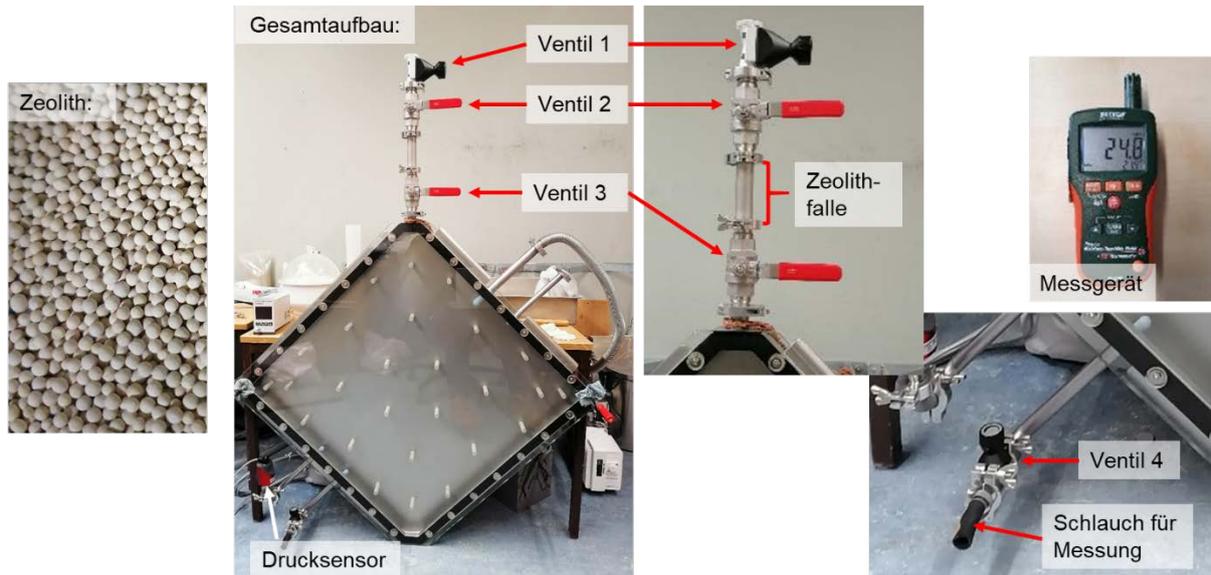


Abbildung 4-20: Versuchsaufbau zur Messung der Lufttrocknung durch eine Zeolithfalle.

Es zeigte sich, dass die eingesaugte Luft ohne Zeolith eine im Mittel um ca. 2 %-Punkte höhere relative Luftfeuchte aufwies als die Umgebungsluft. Dies könnte auf an den Behälterinnenwänden adsorbierte Wassermoleküle, welche durch die Evakuierung desorbiert wurden, zurückzuführen sein.

Bei gefüllter Zeolithfalle hatte die relative Luftfeuchte der eingesaugten Luft wiederum keine signifikante Abweichung zur Luftfeuchte der Umgebungsluft. Der Zeolith konnte in diesem Versuchsaufbau also die relative Luftfeuchte der eingesaugten Luft um 2 %-Punkte gegenüber dem Verzicht auf Zeolith verringern. Die Kinetik der Zeolithfalle ist in diesem Maßstab jedoch zu gering für eine effektive Trocknung.

Nach 12 Stunden Kontakt der Zeolithfalle mit der eingeströmten abgeschlossenen Luft im Behälter bei näherungsweise Umgebungsdruck, wurde die relative Luftfeuchte der Luft von 29 % auf 6 % um 23 %-Punkte bei annähernd gleicher Temperatur verringert. Eine nachträgliche Trocknung der eingeströmten Luft bei Zugabe des Zeoliths in den Dämmraum des Speichers scheint also deutlich effektiver.

Aufgrund der oben genannten Risiken von bleibenden Hohlräumen bei der Flutung wurde diese Verdichtungsmethode jedoch nicht weiter untersucht und wird auch nicht empfohlen. Zudem wäre diese Verdichtungsmethode auch nur für eine leichte Nachverdichtung sinnvoll einsetzbar, da sich die Verdichtung vmtl. vorwiegend lokal in der Nähe der Einströmstelle einstellt.

4.2.1.2 Untersuchungen zur Dämmstoffverdichtung durch mechanische Rüttler

Zur Dämmstoffverdichtung während der Einbringung der Wärmedämmstoffschüttung und vor der Evakuierung hat sich der Einsatz von mechanischen Rüttlern bewährt, die an der Speicher Oberfläche außen befestigt und wieder demontiert werden können, siehe Abbildung 4-2. Diese Rüttler sind meist in ihrer Rüttelstärke einstellbar. Dafür werden Massen auf einer Welle in unterschiedlichem Maß unsymmetrisch versetzt, um die Stärke der Unwucht, welche das Rütteln bei Rotation der Welle verursacht, einzustellen.

Das Ziel der Untersuchungen war es, die mindestens nötige Rüttelstärke zu identifizieren, um den Wärmedämmstoff hinreichend zu verdichten, so dass bei den nachfolgend zu erwartenden Erschütterungen keine Nachverdichtungen und damit einhergehende Hohlrumbildungen mehr auftreten. Die größten Erschütterungen nach der Speicherfertigung werden beim Transport des Speichers zum Kunden mittels eines LKWs erwartet.

Vorversuche

Zunächst wurden Vorversuche zur Funktionsüberprüfung des Rüttlers und der zur Messung der Rüttelstärke eingesetzten Beschleunigungssensoren an einem mit dem Perlit-Wärmedämmstoff gefüllten vertikal positionierten transparenten Rohr durchgeführt. Als Rüttler wurden in den Laborversuchen am IGTE ein Fabrikat der Firma Brecon (Bestellnr.: 18 131 102) eingesetzt, welches mit einer Drehzahl von 2.520 min^{-1} arbeitet und bei einer Rüttlermasse von 2,7 kg eine Fliehkraft von bis zu 400 N erzeugt. Als Beschleunigungssensoren wurden die als Vibration Datalogger PCE-VD 3 bezeichneten Geräte von PCE Instruments verwendet. Dabei handelt es sich um mobile, batteriebetriebene Beschleunigungsdatenlogger (BDL) mit USB-Anschluss zum Auslesen der Messdaten, welche magnetisch oder über Schraubverbindungen mit dem Prüfling verbunden werden können. Diese messen die auftretenden Beschleunigungen auf drei Achsen. Es werden die Beschleunigungen jeder Achse einzeln ausgegeben sowie auch die Summe aller Beschleunigungen gemäß Gleichung 4-1:

$$a_{Sum} = \sqrt{a_X^2 + a_Y^2 + a_Z^2} \quad (4-1)$$

mit:

a_{Sum} : Summe der Beschleunigungen [m/s^2]

a_X : Beschleunigung in X-Richtung [m/s^2]

a_Y : Beschleunigung in Y-Richtung [m/s^2]

a_Z : Beschleunigung in Z-Richtung [m/s^2]

Der für die Laborversuche eingesetzte Rüttler und einer der Beschleunigungsdatenlogger sind in Abbildung 4-21 dargestellt.

Der Rüttler ließ sich in den Vorversuchen auf die gewünschten Stärken einstellen und die Beschleunigungsdatenlogger lieferten reproduzierbare und ausreichend aufgelöste Messergebnisse. Die maximale Messunsicherheit wird vom Hersteller mit $\pm 0,5 \cdot g$ angegeben, wobei g die Erdbeschleunigung mit $9,81 \text{ m/s}^2$ ist. In den Versuchen wurden zeitlich gemittelte Mindestwerte der Beschleunigungssummen von ca. $1,4 \cdot g$ gemessen, womit die maximale relative Messunsicherheit bei den Versuchen ca. $\pm 36 \%$ beträgt.



Abbildung 4-21: Für Laborversuche verwendeter Rüttler der Firma Brecon (links) und Beschleunigungsdatenlogger PCE-VD 3 von PCE Instruments (rechts) [PCE 2024]

Vorverdichtungen und Transportversuche

Der erste Transportversuch TV1 wurde mit einer unverdichteten Dämmstoffschüttung durchgeführt, vor dem zweiten Transportversuch TV2 wurde die Dämmstoffschüttung zuvor bei einer zeitlich und über BDL1 – BDL3 gemittelten Beschleunigungssumme von $1,48\text{-}g$ mit Hilfe des Rüttlers vorverdichtet (VV1) und bei der Vorverdichtung VV2 vor dem dritten Transportversuch TV3 lag diese mittlere Beschleunigungssumme bei $1,63\text{-}g$. Die Dauer der dokumentierten Vorverdichtungen lag jeweils bei 42 h, wobei vor VV1 bereits während der Befüllung für ca. 5 h verdichtet wurde. Dabei wurde allerdings der untere Dämmstoffbereich einer höheren Verdichtungsdauer ausgesetzt als der später befüllte, womit diese 5 Stunden nicht vollständig der gesamten Dämmstoffschüttung zugerechnet werden können.

In Abbildung 4-22 sind beispielhaft die Messdaten des BDL1 (Position s. Abbildung 4-24 links) bei der VV1 abgebildet.

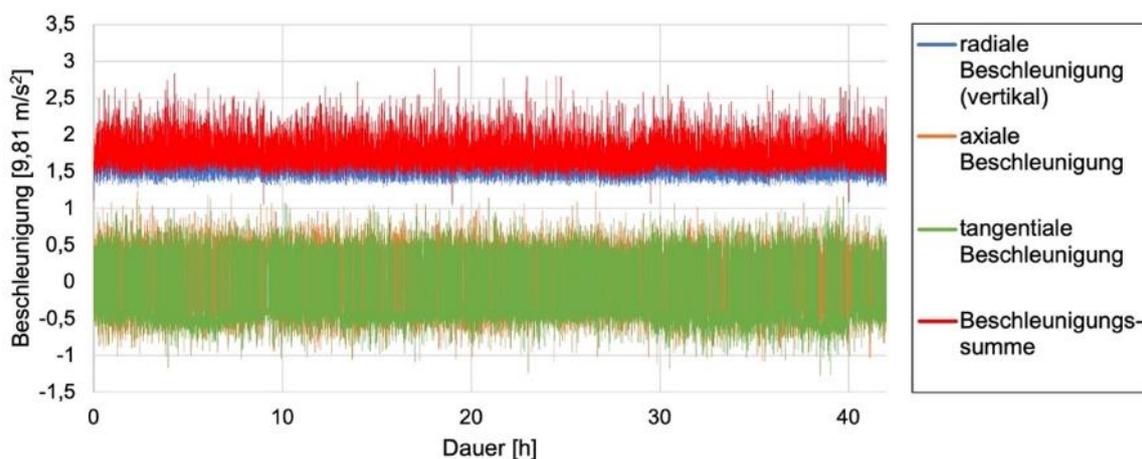


Abbildung 4-22: Vom Beschleunigungsdatenlogger BDL1 gemessene Beschleunigungen durch den Einsatz des Rüttlers bei der Vorverdichtung VV1 der Dämmstoffschüttung im zylindrischen, doppelwandigen Versuchskörper.

Im Diagramm in Abbildung 4-23 sind die gemessenen Dichten während der beiden Vorverdichtungen VV1 und VV2 über der Zeit aufgetragen. Die durchgezogenen Linien zeigen die gemessenen Dichten der Dämmstoffschüttung in Versuchskörper und Einfüllvorrichtung, bestehend aus Trichter und transparentem Rohr, vgl. Abbildung 4-12.

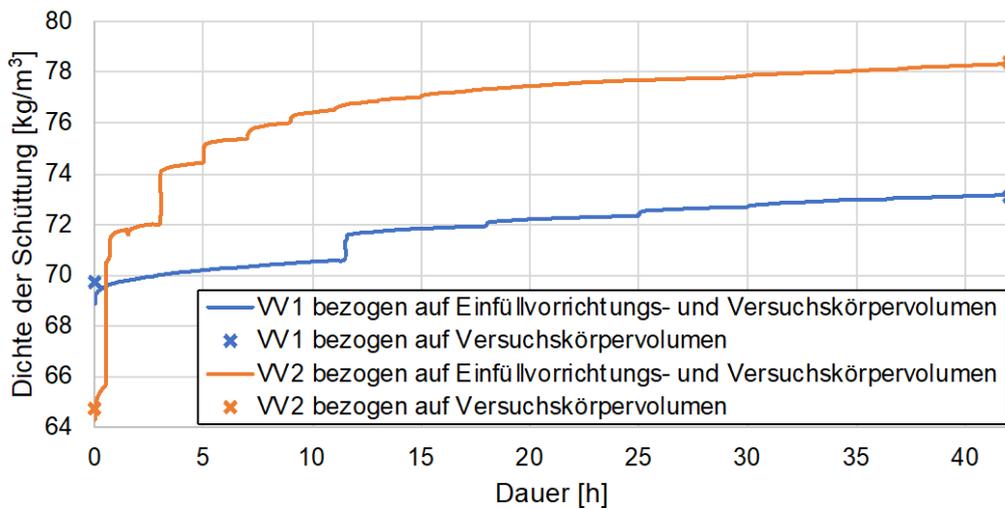


Abbildung 4-23: Dichten der Dämmstoffschüttungen vor, während und nach den Vorverdichtungen VV1 (Beschleunigungssumme 1,48·g) und VV2 (Beschleunigungssumme 1,63·g).

Die Gesamtmasse der Dämmstoffschüttung blieb über die gesamten Versuchsdauern konstant. Somit resultiert die Dichteerhöhung stets aus einer Volumenabnahme. Diese wurde über den Füllstand am transparenten Rohr der Einfüllvorrichtung mittels eines aufgeklebten Maßbands gemessen. Da die Dämmstoffschüttung aus der Einfüllvorrichtung in geringerem Maß in den Versuchskörper nachfloss als sich die Schüttung darin setzte, entstanden während der Vorverdichtungen Hohlräume oben im Versuchskörper, welche im bilanzierten Volumen für die Dichtemessungen enthalten sind. Diese Hohlräume wurden mehrere Male durch Nachsaugen der Dämmstoffschüttung aus der Einfüllvorrichtung gefüllt, wodurch es zu den in Abbildung 4-23 erkennbaren sprunghaften Dichteanstiegen kam. Die Messpunkte in Form von Kreuzen zeigen die jeweilige Anfangs- und Enddichte der Dämmstoffschüttung im Versuchskörper ohne die Einfüllvorrichtung. Diese Messpunkte sind letztlich zur Messung der Gesamtverdichtung nach 42 h Rütteln relevant. Die Messkurven der Dichten von Versuchskörper inkl. Einfüllvorrichtung zeigen wiederum den zeitlichen Verlauf der Verdichtung. Damit lässt sich beispielsweise aussagen, dass bereits nach 3 h Dämmstoffverdichtung bei Vibrationen mit einer mittleren Beschleunigung von 1,63·g in VV2 mit ca. 74 kg/m³ eine Dichte erreicht wird, welche bei Vibrationen mit einer mittleren Beschleunigung von 1,48·g in VV1 auch nach über 42 h (die 5 h zusätzliche, teilweise Verdichtung vor VV1 mit einberechnet) nicht erreicht werden. Die Dichte nach Ende der VV1 beträgt nur 73 kg/m³. Dadurch lässt sich in vorläufiger vereinfachter Näherung postulieren, dass eine Vorverdichtung durch Rütteln über 3 h bei vollständig gefülltem Dämmraum und mit einer um 0,15·g höheren mittleren Beschleunigung als derjenigen, welche bei einem 42-stündigen Speichertransport auftritt, ausreicht, um eine Weiterverdichtung und damit Setzungen und Hohlräumbildungen im Wärmedämmstoff zu vermeiden.

Der Aufbau der Transportversuche ist in Abbildung 4-24 dargestellt (vgl. auch Abbildung 4-12). Die Positionen sowie die Ausrichtungen der Beschleunigungsdatenlogger BDL1 – BDL3, sowohl für die Vorverdichtung als auch für die Transportversuche, sind in Abbildung 4-24 links gezeigt.



Abbildung 4-24: Aufbau für Transportversuche mit doppelwandigem zylindrischem Versuchskörper. Links: Positionen der drei Beschleunigungsdatenlogger (BDL1, BDL2, BDL3); Mitte: gefüllter Versuchskörper mit gefüllter Einfüllvorrichtung auf Palette und Hubwagen zum Transport auf rauem Asphalt; rechts: Weg aus Doppel-T-Verbund-Pflastersteinen.

Der Aufbau wurde für jeweils 2 h mittels eines Hubwagens über die in Abbildung 4-24 Mitte und rechts dargestellten Bodenbeläge transportiert. Es wurden sowohl die bei den Transportversuchen gemessenen Beschleunigungen, als auch die Hohlräume und die Dichten der Dämmstoffschüttungen vor und nach dem Transport für alle drei Dämmstoffschüttungen dokumentiert und ausgewertet. In Abbildung 4-25 sind beispielhaft die Messdaten des BDL3 bei TV3 abgebildet.

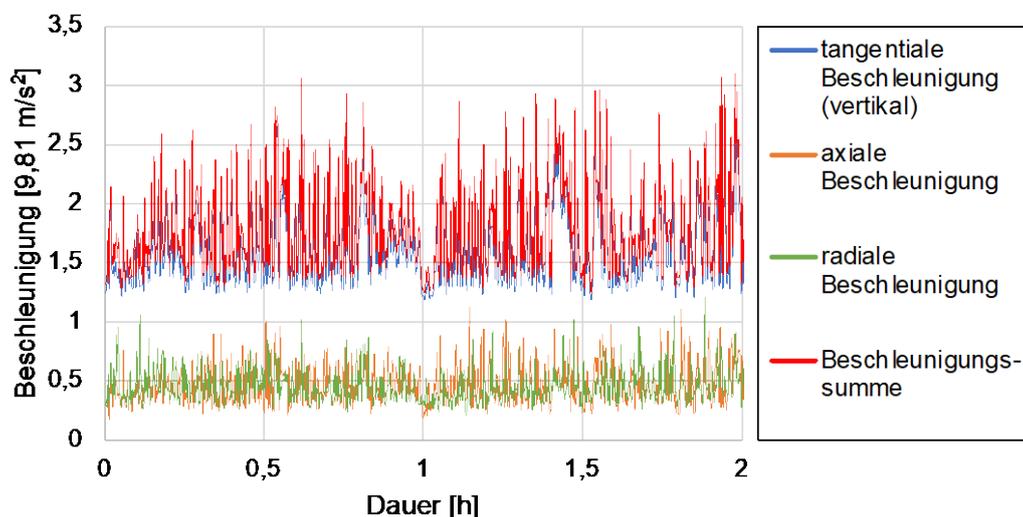


Abbildung 4-25: Vom Beschleunigungsdatenlogger BDL3 gemessene Beschleunigungen beim Transportversuch TV3 des zylindrischen, doppelwandigen Versuchskörpers.

Dabei ist ersichtlich, dass die Variationsbreite der Beschleunigungssummen ähnlich ist, wie bei der Vorverdichtung durch den Rüttler, vgl. Abbildung 4-22. Allerdings sind die Beschleunigungen beim Transportversuch erwartungsgemäß weniger regelmäßig als bei der Vorverdichtung durch den Rüttler.

Die Ergebnisse der Transportversuche sind in Tabelle 4-2 zusammengefasst. Darin ist zu erkennen, dass die mittleren Beschleunigungen beim Transport jeweils höher lagen als diejenigen bei der Vorverdichtung. Bewertungen bzgl. der zu erwartenden Nachverdichtung bei geringeren Beschleunigungen als bei der Vorverdichtung sind damit also nicht möglich. Es lässt sich aber aussagen, dass bei einer Vorverdichtung über 42 h mit einer mittleren Beschleunigung von $1,63 \cdot g$ selbst bei um $0,07 \cdot g$ höheren Beschleunigungen beim Transport mit dem Faktor 1,0003 nur eine sehr geringe Nachverdichtung zu erwarten ist. Bei einem Verzicht auf eine Vorverdichtung ist mit dem Faktor 1,0708 wiederum eine hohe Nachverdichtung durch einen 2-stündigen Transport zu erwarten. Dabei könnte entsprechend ein Hohlraum von ca. 7,1 % des Dämmraumvolumens entstanden sein, der durchaus relevant bzgl. der Wärmeverluste sein kann.

Tabelle 4-2: Ergebnisse der Dämmstoffverdichtungen durch die Transportversuche.
VV: Vorverdichtung; TV: Transportversuch.

Mittlere Beschleunigung bei Vorverdichtung	Mittlere Beschleunigung bei Transport	Anfangsdichte [kg/m ³]	Enddichte [kg/m ³]	Verdichtungs-faktor
unverdichtet	$1,63 \cdot g$ (TV1)	63,12	67,59	1,0708
$1,48 \cdot g$ (VV1)	$1,53 \cdot g$ (TV2)	73,07	73,29	1,003
$1,63 \cdot g$ (VV2)	$1,7 \cdot g$ (TV3)	78,38	78,40	1,0003

Für die Einschätzung der Auswirkung solcher Dämmstoffverdichtungen während des Transport bzgl. der Hohlräumbildung ist eine optische Analyse der Dämmstoffschüttung im Versuchskörper nötig. In Abbildung 4-26, Abbildung 4-27, und Abbildung 4-28 sind Fotografien des Versuchskörpers vor und nach dem jeweiligen Transportversuch dargestellt, wobei markante Bereiche durch eine Vergrößerung hervorgehoben sind.

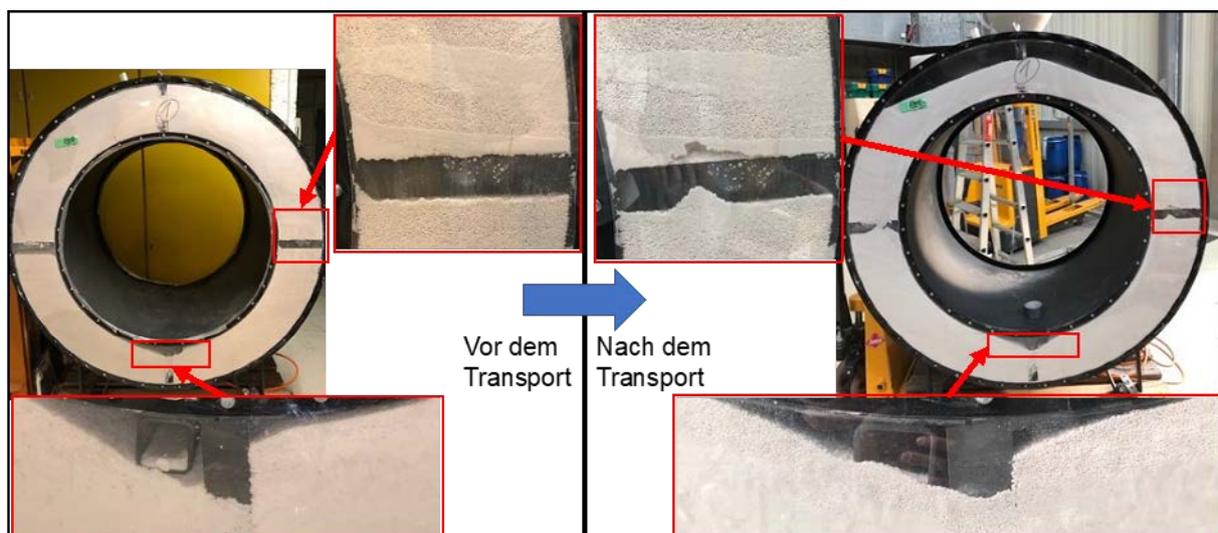


Abbildung 4-26: Dämmstoffverteilung im Versuchskörper vor und nach Transportversuch TV1.

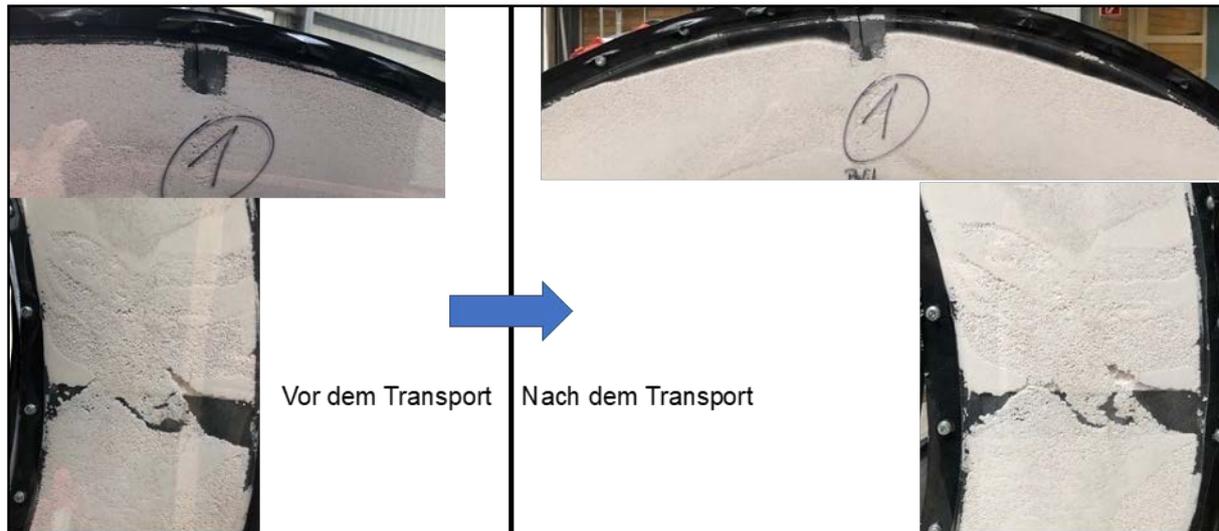


Abbildung 4-27: Dämmstoffverteilung im Versuchskörper vor und nach Transportversuch TV2.

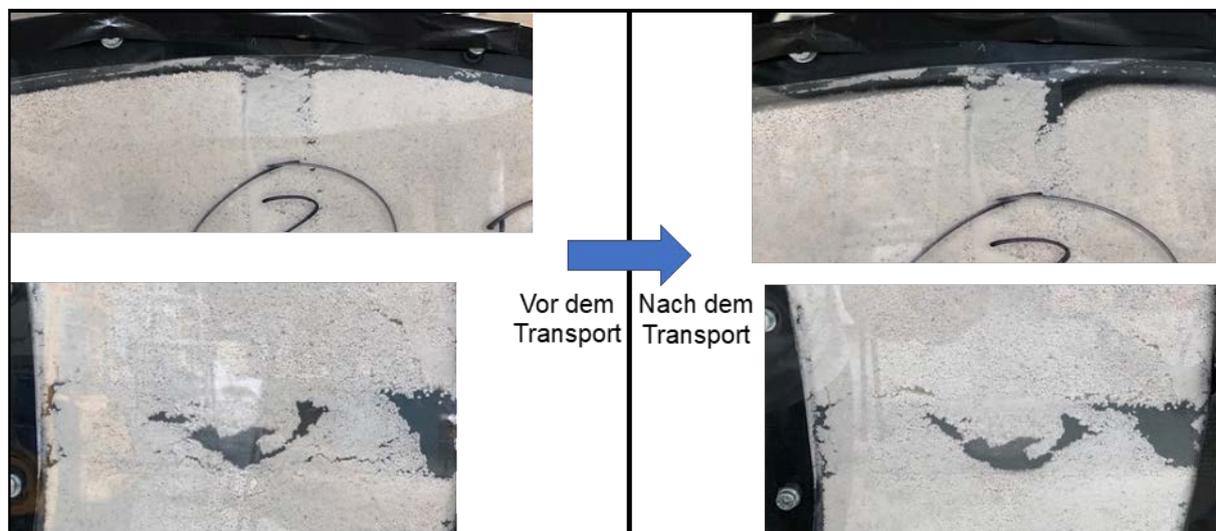


Abbildung 4-28: Dämmstoffverteilung im Versuchskörper vor und nach Transportversuch TV3.

Bereits vor TV1 waren signifikante Hohlräume in der Dämmstoffschüttung im unteren Bereich des Versuchskörpers vorhanden, da vor TV1 keine Vorverdichtung durch einen Rüttler stattfand und somit eine vollständige Befüllung nicht gewährleistet werden konnte. Durch die Vibrationen und andere Beschleunigungen während TV1 kam es zu starken Dämmstoffsetzungen im oberen Bereich. Gleichzeitig wurde der Hohlraum im unteren Bereich verringert. An den seitlichen L-Profilen, die als Abstandhalter dienen, kam es nur zu leichten Umverteilungen der Hohlräume, die vor dem Transport vermehrt unterhalb und nach dem Transport überwiegend oberhalb des L-Profils auftraten.

Die Vorverdichtung vor TV2 und TV3 sorgten für eine vollständige Dämmstoffverteilung im unteren Bereich des Versuchskörpers. Daher sind hierbei vorwiegend der obere und ein seitlicher Bereich des Versuchskörpers relevant. Im seitlichen Bereich sind um das L-Profil nur vernachlässigbar kleine Veränderungen der vergleichsweise kleinen Hohlräume zu erkennen. Nach TV2 kam es im oberen Bereich zu einer sichtbaren Dämmstoffsetzung, welche entsprechend des in Tabelle 4-2 aufgeführten Verdichtungsfaktors ca. 0,3 % des Dämmvolumens einnehmen

könnte. Nach TV3 ist das Hohlraumvolumen oben deutlich geringer und kann entsprechend des Verdichtungsfaktors mit ca. 0,03 % des Dämmvolumens abgeschätzt werden.

Vibrationen bei Dämmstoffbefüllung des Pilotspeichers Kirchdorf und bei LKW-Fahrten

Vor der Einstellung der Rüttelstärke während der Dämmstoffbefüllung wurden die Beschleunigungen beispielhaft während des LKW-Transports einer Stahl-Wanne gemessen. Damit sollten die auftretenden Beschleunigungen während eines Speichertransport abgeschätzt werden, um daraufhin die Rüttelstärke während der Befüllung derart einzustellen, dass die mittleren Beschleunigungen während des Transports mit hoher Sicherheit um mindestens $0,15 \cdot g$ übertroffen werden (vgl. Abschnitt „Vorverdichtungen und Transportversuche“). Die gemessenen Beschleunigungen während des LKW-Transports der Stahl-Wanne sind in Abbildung 4-29 dargestellt. Die mittlere Beschleunigung liegt bei $1,46 \cdot g$, aber es treten kurzzeitige Beschleunigungen bis zu $3,22 \cdot g$ während der Fahrt auf. Die starken Beschleunigungen zu Beginn und Ende des Messzeitraums sind der Installation und Deinstallation des BDL zuzuordnen.

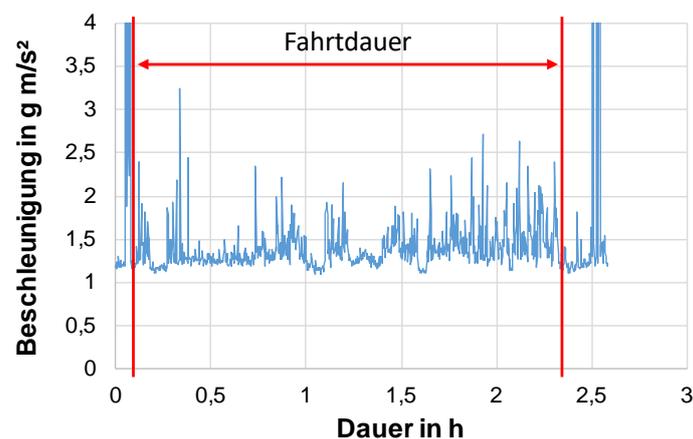


Abbildung 4-29: Gemessene Beschleunigungen an einer Stahlwanne beim Transport auf einem LKW.

In Abbildung 4-30 ist die Positionierung eines der Rüttler und der drei Beschleunigungssensoren dargestellt.



Abbildung 4-30: Positionen der Beschleunigungsdatenlogger und Rüttler beim Pilotspeicher Kirchdorf.

Ein zweiter Rüttler ist auf gleicher Speicherhöhe auf gegenüberliegender Seite installiert. Aufgrund der Ergebnisse der Messungen während des Stahl-Wannen-Transports wurde letztlich eine Rüttelstärke eingestellt, bei welcher eine mittlere Beschleunigung von $3,69 \cdot g$ an der Speicheraußenwand gemessen wurde. Die Rütteldauer während der Befüllung betrug mehr als 6 h, wobei der Speicher in unterschiedlichem Maß mit Wärmedämmstoff befüllt war. Nach nahezu vollständiger Befüllung wurden die Rüttler für weitere ca. 3 h betrieben.

Die LKW-Fahrt des Pilotspeichers von Kaufbeuren nach Kirchdorf an der Krems (Österreich) dauerte ca. 8,5 h. Währenddessen wurde eine mittlere Beschleunigung von $1,3 \cdot g$ gemessen und es kam durch ein unbekanntes singuläres Ereignis zu einer kurzzeitigen Beschleunigung von $15,87 \cdot g$, siehe Abbildung 4-31. Beim Beladen des LKW mit dem Speicher kam es zu kurzzeitigen Beschleunigungen von bis zu $5,23 \cdot g$. Dieser Wert ist jedoch nicht im Diagramm dargestellt, da die Beladung am Vortag des Transports erfolgte. Beim Abladen des Speichers kam es zu kurzzeitigen Beschleunigungen von bis zu $9,86 \cdot g$. Abgesehen davon waren die Werte der gemessenen Beschleunigungen kleiner als $2,44 \cdot g$.

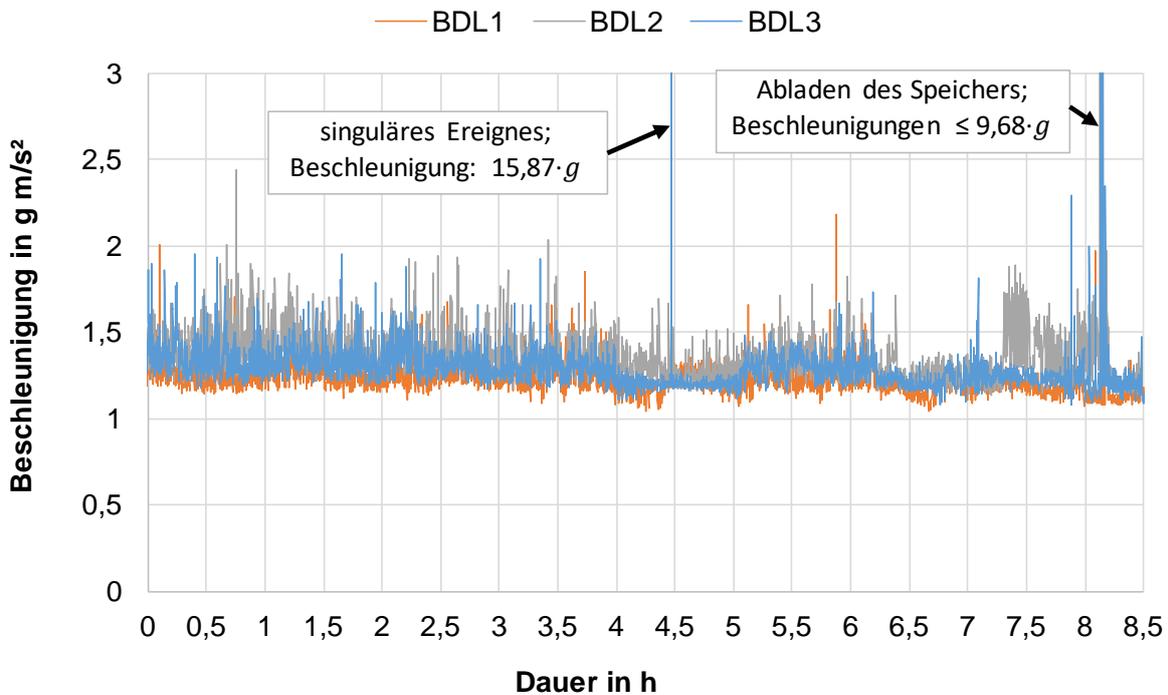


Abbildung 4-31: Gemessene Beschleunigungen am Pilotspeicher Kirchdorf beim LKW-Transport von Kaufbeuren nach Kirchdorf und beim Abladen des Speichers am Zielort.

Die mittlere Beschleunigung während der Dämmstoffbefüllung lag um $2,39 \cdot g$ höher als beim Speichertransport und die Rütteldauer kann auf Basis der Voruntersuchungen als ausreichend gelten um das Ausbleiben von Setzungen durch geringere Beschleunigungen als bei der Verdichtung zu gewährleisten. Daher wird, trotz der sehr kurzzeitigen hohen Beschleunigungen beim Speichertransport, bei der Beladung des LKW mit dem Speicher sowie der Abladung des Speichers davon ausgegangen, dass es zu keiner signifikanten Dämmstoffsetzung und Hohlrumbildung während des Transports kam. Somit gilt als sehr wahrscheinlich, dass die mittlere Beschleunigung bei der gewählten Rüttelstärke von $3,69 \cdot g$ auch bei der Herstellung weiterer Speicher dieser Bauart mit dem gleichen Wärmedämmstoff ausreicht. Für die Zukunft

wird der Einsatz der für die Untersuchung verwendeten BDL empfohlen, um diese mittlere Beschleunigung sicherstellen zu können und um mehr Beschleunigungsdaten während des Speichertransports zu gewinnen.

4.2.2 Untersuchungen zur Detektion von Hohlräumen im Wärmedämmstoff

Da Hohlräume in der Wärmedämmung jedoch auch trotz der oben beschriebenen Vorkehrungen nicht vollständig ausgeschlossen werden können und es auch während der Betriebsdauer durch die temperaturwechselbedingten Verformungen der Speicherhülle zu Setzungen und damit zu Hohlraumbildungen kommen kann, wurden zwei Verfahren geprüft um Hohlräume in der fertiggestellten Vakuumwärmedämmung zu detektieren, ohne diese zu beschädigen. Zum einen wurde eine Laser-Doppler-Vibrometrie geprüft und zum andere eine Röntgenanalyse.

Laser-Doppler-Vibrometrie

Bei der Laser-Doppler-Vibrometrie wird ein Bauteil in Schwingung versetzt und dessen Oberfläche von einem Laser fokussiert. Die Frequenz der reflektierten Laserstrahlung wird aufgrund der Bewegung der Oberfläche durch den Doppler-Effekt verschoben. Ein Interferometer misst diese Frequenzverschiebung. Weicht diese Frequenzverschiebung an unterschiedlichen Stellen eines Bauteils oder bei unterschiedlichen Bauteilen voneinander ab, so lässt sich damit auf unterschiedliche Bauteileigenschaften, wie z. B. auch Hohlräume, schließen. Die im Projekt StoEx2 erprobte Vibrometrie-Methode wurde vom Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart entwickelt und die entsprechenden Untersuchungen auch dort durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine sogenannte „lokale Defektresonanz“ (LDR) [IKT 2024]. Als Versuchskörper wurde ein im Projekt StoEx gefertigter Vakuumprobenbehälter verwendet. Dieser hat eine quadratische Grundfläche mit einer Kantenlänge innen von 700 mm und einer Höhe innen von 50 mm. Dieser Vakuumprobenbehälter wurde mit den expandierten Perliten TPC1,5 und dem zuvor von der Firma Sirch verwendeten expandierten Perlit Volite 200 des Herstellers Knauf Aquapanel (Korngröße 0 – 0,2 mm; Dichte im Vakuumprobenbehälter ca. 140 kg/m³) befüllt. Dabei wurden durch Wellpappe, ein mit Luft gefülltes Cellophan-Tütchen, einen Kunststoffball, zwei Staubfilter aus gesintertem Kunststoff sowie eine Kunststoffstütze unterschiedliche Hohlräume und Bereiche höherer Dichte geschaffen, siehe Abbildung 4-32.

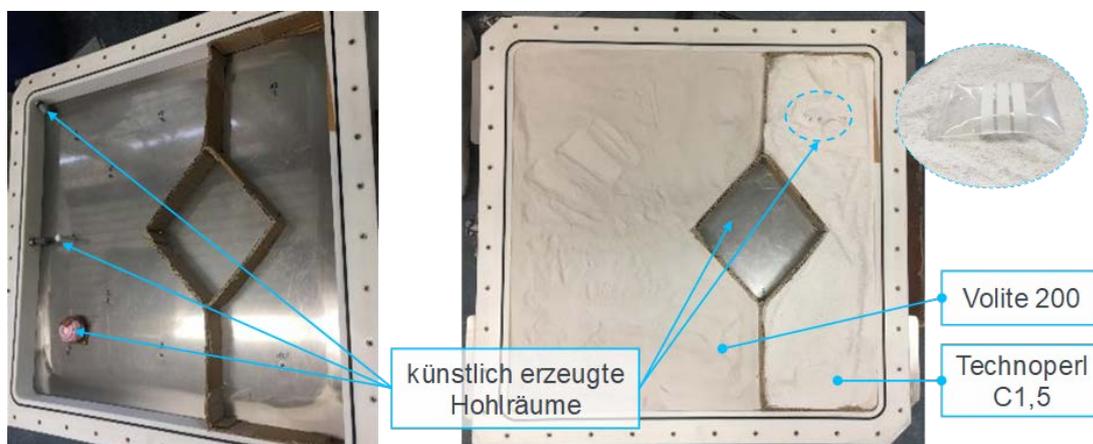


Abbildung 4-32: Vakuumprobenbehälter mit künstlichen Hohlräumen und Bereichen höherer Dichte in den Schüttungen aus den expandierten Perliten Volite 200 und TPC1,5.

Der Vakuumprobenbehälter wird durch zwei Edelstahlgrundplatten mit einer Stärke von 5 mm verschlossen. Zum Verschluss wurden Schraubzwingen eingesetzt, da durch eine thermische Verformung des Rahmens die Gewinde im Rahmen nicht mehr bündig genug mit den entsprechenden Bohrungen der Edelstahlplatten sind um diese über Schrauben zu verbinden. In Abbildung 4-33 ist der Versuchsaufbau dargestellt. Durch den „Piezoshaker“ werden die Schwingungen mit einer Frequenz von 4,5 kHz auf die dem Laser zugewandte Grundplatte aufgeprägt.



Abbildung 4-33: Versuchsaufbau der Vibrometriemessung zur Hohlraumdetektion in Perlit in einem Vakuumprobenbehälter.

Die Ergebnisse der Untersuchung sind in Abbildung 4-34 dargestellt. Dabei wurden die Heatmaps der gemessenen Amplituden über das Bild des geöffneten Vakuumprobenbehälters gelegt um diese mit den Hohlräumen abgleichen zu können. Im Bereich des Kunststoffballs links unten ist eine deutlich größere Amplitude sichtbar als im umliegenden Bereich, was auf eine erfolgreiche Detektion hindeutet. Allerdings ist insbesondere im Bereich des größten rautenförmigen Hohlraums, welcher durch Wellpappe abgegrenzt wurde, keine eindeutige Detektion erkennbar. Daher wird diese Methode für die Detektion von Hohlräumen hinter einer Stahlwand und innerhalb von porösen Schüttungen mit einer Dichte von maximal ca. 140 kg/m^3 als nicht als ausreichend präzise eingeschätzt.

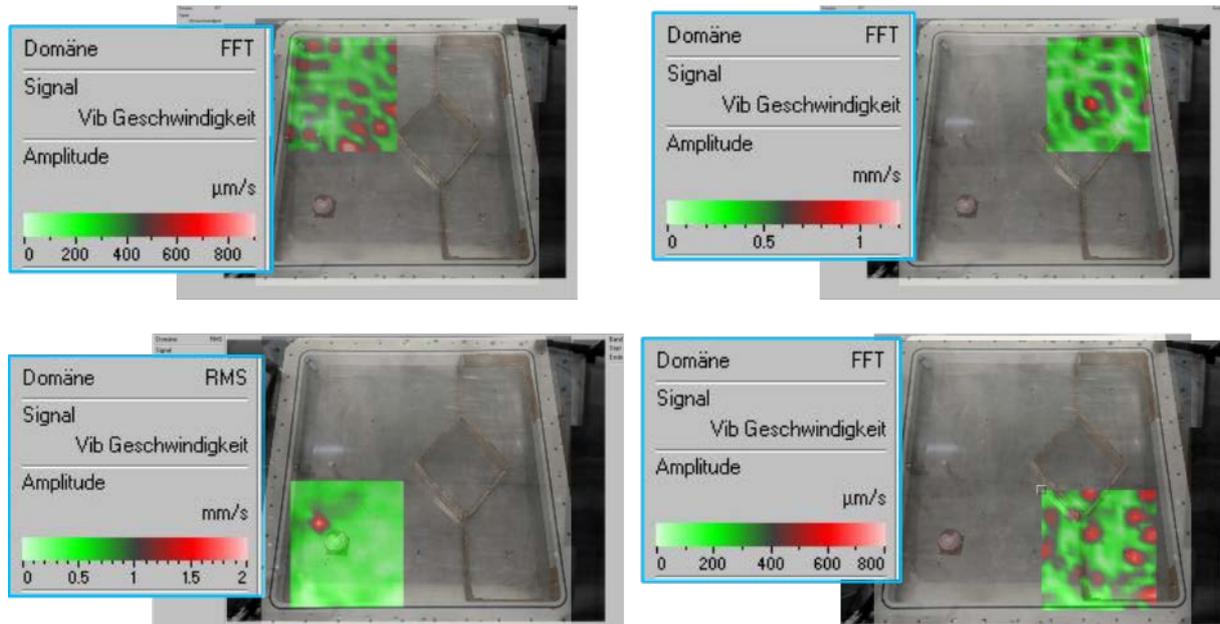


Abbildung 4-34: Ergebnisse der Vibrometriemessung zur Hohlraumdetektion in einer Perlitschüttung in einem Vakuumprobenbehälter.

Röntgenanalyse

Der für die Vibrometrieuntersuchung eingesetzte Vakuumprobenbehälter wurde auch für die Röntgenanalyse verwendet. Hierbei wurde allerdings nur ein großer Hohlraum, abgegrenzt durch Wellpappe, und auch nur der oben beschriebene expandierte Perlit Volite 200 eingesetzt. Die Untersuchungen wurden an der Materialprüfanstalt (MPA) der Universität Stuttgart mit dem Röntgengerät Comet MXR-320HP/11 durchgeführt [MPA 2024].

Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-35 links dargestellt. Zur Orientierung wurde ein Maßband mit Ziffern aus Blei aufgeklebt. In der Mitte von Abbildung 4-35 ist der gefüllte Vakuumprobenbehälter samt Hohlraum dargestellt. Darin ist derjenige Bildausschnitt in rotem Rahmen markiert, welcher rechts im Bild als Röntgenaufnahme dargestellt ist. Die Darstellung des Röntgenbilds erfolgte auf einer digitalen Speicherfolie. In der Röntgenaufnahme ist der Ring aus Wellpappe, sowohl in gefilterter als auch in ungefilterter Darstellung, deutlich zu erkennen. Allerdings ist nur in ungefilterter Darstellung ein signifikanter Schwärzungsunterschied zwischen dem Hohlraum und der mit Perlit gefüllten Umgebung zu erkennen. Prinzipiell scheint diese Methode also für die zerstörungsfreie Hohlraumdetektion in expandierten Perliten zwischen zwei Stahlplatten von 5 mm Stärke geeignet zu sein. Allerdings bleibt zu untersuchen, ob die Methode auch für Schüttungen aus expandierten Perliten geringerer Dichte, wie dem TPC1,5, zuverlässige Ergebnisse liefert und ob eine Röntgendiagnostik auch mobil an doppelwandigen Warmwasserspeichern praktikabel und wirtschaftlich eingesetzt werden kann.

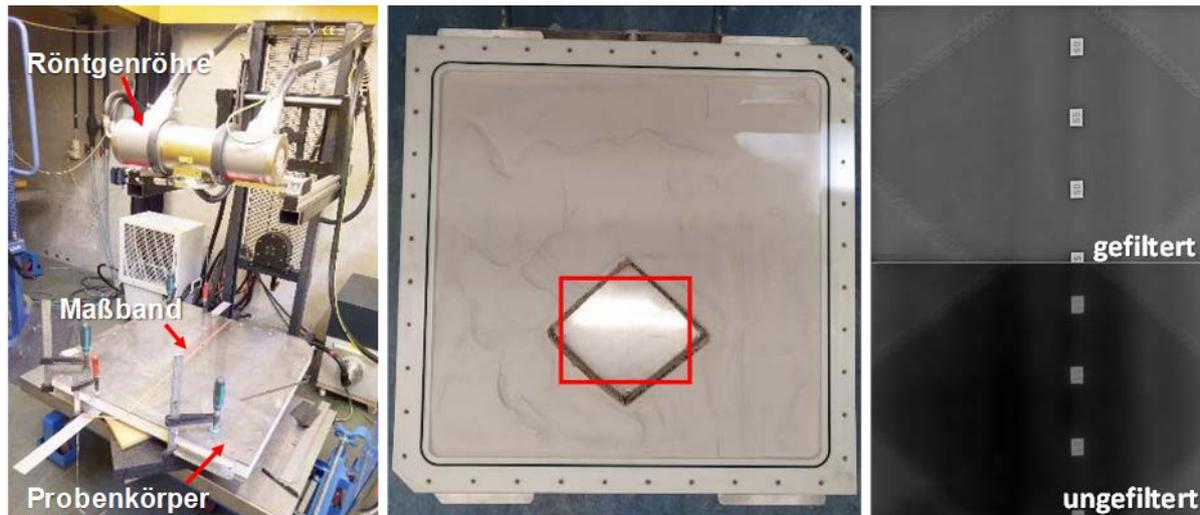


Abbildung 4-35: Versuchsaufbau (links und Mitte) sowie Röntgenaufnahmen (rechts) der Röntgenanalyse (Durchstrahlungsprüfung) zur Hohlraumdetektion in Perlit in einem Vakuumprobenbehälter am MPA der Universität Stuttgart.

4.3 Verringerung der Evakuierungsdauer der Vakuumwärmedämmung

Um die Gas-Wärmeleitung des eingesetzten Wärmedämmstoffs weitgehend zu unterbinden, ist ein Gasdruck von $< 0,1$ mbar erforderlich. Um einen Gasdruck in diesem Bereich herzustellen wird derzeit von der Firma Sirch ein Vakuumpumpstand, bestehend aus einer Drehschieber- und einer Wälzkolbenpumpe, verwendet. Die Evakuierungsdauer variierte in der Vergangenheit stark und betrug bis zu mehrere Wochen. Die größten Einflussfaktoren für eine lange Evakuierungsdauer stellen erfahrungsgemäß zum einen die Desorption von gebundener Feuchtigkeit an Wärmedämmstoff und Begrenzungswänden in die Gasphase dar, was den Gasdruck entsprechend erhöht. Zum anderen erzeugt der Wärmedämmstoff selbst einen starken Strömungswiderstand. Zudem wird bei geringen Gasdrücken das erzeugbare treibende Druckgefälle immer geringer, was ebenfalls die Evakuierung verlangsamt.

Als Möglichkeiten zur Beschleunigung der Evakuierung wurden angesichts der oben beschriebenen Hintergründe folgende Maßnahmen untersucht:

- Ausheizen der Vakuumwärmedämmung bei der Evakuierung
- Vorevakuierung des leeren Dämmraums
- Erhöhung des Evakuierungsquerschnitts
- Verwendung von frisch produziertem Wärmedämmstoff
- Verwendung von hydrophobiertem Wärmedämmstoff
- Einsatz von Trocknungsmitteln (Zeolith)
- Einsatz einer Turbomolekularpumpe

Die hierzu durchgeführten Untersuchungen sowie die daraus resultierenden Ergebnisse werden im Folgenden beschrieben.

4.3.1 Ausheizen der Vakuumwärmedämmung bei der Evakuierung

Das „Ausheizen“ eines Vakuumsystems bedeutet eine gezielte Temperaturerhöhung der Komponenten mit Kontakt zum Vakuum bei gleichzeitiger Evakuierung des Systems. Die Temperaturerhöhung verringert die Bindungsenergie von flüchtigen Substanzen, die in oder an den mit dem Vakuum in Kontakt stehenden Wänden gebunden sind. Bei diesen Substanzen handelt es sich meist zum größten Teil um Feuchtigkeit in Form von Wasser. Durch die Herabsetzung der Bindungsenergie können diese Substanzen schneller und zu einem größeren Anteil aus dem Vakuumsystem entfernt werden. Bei einer Verringerung der Temperatur nach dem Ausheizen sinkt dadurch der Gasdruck stärker ab, als bei einer Evakuierung ohne Ausheizung im gleichen Zeitraum. Bei einer Temperaturerhöhung steigt der Gasdruck wiederum umso stärker an, je größer der Anteil gebundener flüchtiger Substanzen im Vakuumsystem ist. In Abbildung 4-36 ist eine solcher Druckanstieg mit der Temperatur beispielhaft an dem in Abschnitt 2.1 beschriebenen Funktionsmusterspeicher im Technikumsmaßstab aufgezeigt. Während dieser Messung wurde das Speichermedium zwischenzeitlich beheizt. Der Dämmraum des Versuchsspeichers wurde dabei nicht evakuiert. Der Druckabfall ist auf die Temperaturabnahme zurückzuführen. Die dargestellte Dämmraumtemperatur ist das arithmetische Mittel aus der Speichermediumtemperatur und der Umgebungstemperatur, was für diese Betrachtung in hinreichender Näherung ca. der tatsächlichen Dämmraumtemperatur entspricht.

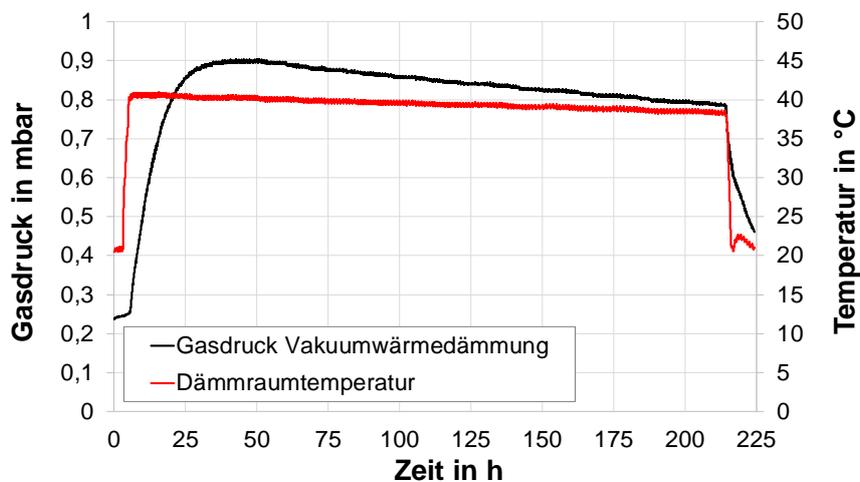


Abbildung 4-36: Druckanstieg mit der Temperatur in der Vakuumwärmedämmung eines Funktionsmusterspeichers im Technikumsmaßstab (siehe Abschnitt 2.1).

Um die Wirkung einer Ausheizung während der Evakuierung zu zeigen, wurden Untersuchungen am im Abschnitt 4.1.4.2 beschriebenen Vakuumprobenbehälter (VPB) durchgeführt. Dieser kann durch Dämmstoffeinsaugung und -absaugung befüllt und entleert werden. Dadurch muss die abgedichtete transparente Abdeckung nicht entfernt werden, was eine weitgehend gleichbleibende Leckagerate ermöglicht. Eine unterschiedliche Leckagerate würde die Messergebnisse verfälschen. Der gefüllte VPB wurde zunächst in einem Vergleichsversuch bei Raumtemperatur von im zeitlichen Mittel 23 °C für 48 h evakuiert. Beim Ausheizungsversuch wurde ebenfalls für insgesamt 48 h evakuiert, wobei der VPB für 22 h davon auf eine zeitliche und örtliche Mitteltemperatur von 39,2 °C beheizt wurde. Vor der Evakuierung und in den letzten 11 h der Evakuierung wurde der VPB auf eine Temperatur von 22,5 °C temperiert. In den

übrigen 15 h hatte der VPB während des Aufheiz- und Abkühlvorgang im zeitlichen Mittel eine Temperatur von 27,8 °C. Die Beheizung wurde in einer Zweiplatten-Apparatur vorgenommen, die am IGTE vorwiegend für die Messung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Wärmedämmstoffen verwendet wird. Diese ermöglicht eine beidseitige Beheizung des VPB. In Abbildung 4-37 ist links der Einbau des VPB in die Zweiplatten-Apparatur abgebildet und rechts der Temperaturverlauf des VPB über der Zeit. Die dargestellte Proben temperatur entspricht der Mitteltemperatur der beiden Heizplatten auf den beiden Seiten des VPB.

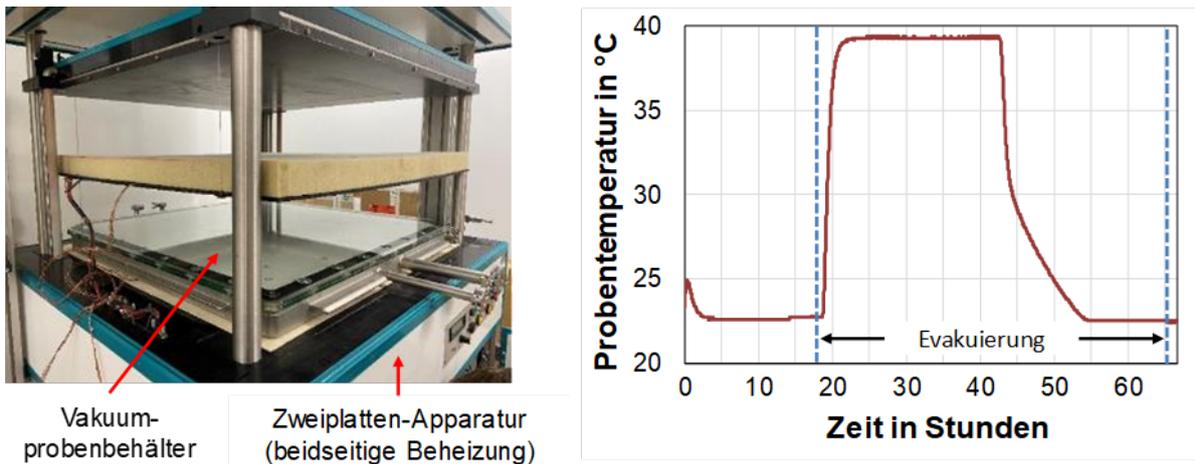


Abbildung 4-37: Ausheizen von gelagertem expandiertem Perlit in einem Vakuumpfenbehälter (VPB). Links: Versuchsaufbau des VPB in einer Zweiplatten-Apparatur zur Beheizung; rechts: Temperaturverlauf des VPB.

Als Wärmedämmstoff wurde jeweils gelagerter expandierter Perlit des Typs TPC1,5 verwendet. Gelagerter expandierter Perlit hat einen höheren Feuchtegehalt als frisch produzierter, wodurch der Effekt einer Ausheizung als größer angenommen werden kann.

Die Evakuierung wurde für diese und alle weiteren Evakuierungsversuche am VPB mit der Vakuumpumpe vom Typ Pascal 2021 SD (einphasig, mit 230 VAC und 50 Hz betrieben) des Herstellers Pfeiffer Vacuum bei geschlossenem Gasballastventil durchgeführt. Die Pumpenkennlinie dieser Vakuumpumpe ist in Abbildung 4-38 dargestellt. Diese Pumpenkennlinie gilt ohne signifikante Strömungswiderstände, wie einer feinporigen Wärmedämmung, und ohne Ausgasungen von flüchtigen Substanzen aus Oberflächen. Daher kann sie nicht zur Abschätzung der Evakuierungsgeschwindigkeit der untersuchten Vakuumsysteme verwendet werden, sondern dient diesbezüglich lediglich der Vergleichbarkeit mit anderen Vakuumpumpen.

Zur Beurteilung der Evakuierungsgeschwindigkeit wurde jeweils der Gasdruck nach einer 48-stündigen Evakuierung ausgewertet und verglichen. Die Gasdrücke wurden gemessen mit den kapazitiven Drucksensoren CMR 361 (Messbereich 0,1 – 1100 mbar) und CMR 364 (Messbereich 10^{-4} – 1,1 mbar) des Herstellers Pfeiffer Vacuum. Beide Sensoren besitzen eine Messgenauigkeit von 0,2 % des Messwerts zuzüglich 0,01 % des Messwerts je Kelvin Temperaturabweichung. Beim Drucksensor CMR 361 kommt noch eine absolute Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-2}$ mbar und beim Drucksensor CMR 364 von $5 \cdot 10^{-5}$ mbar je Kelvin Temperaturabweichung hinzu.

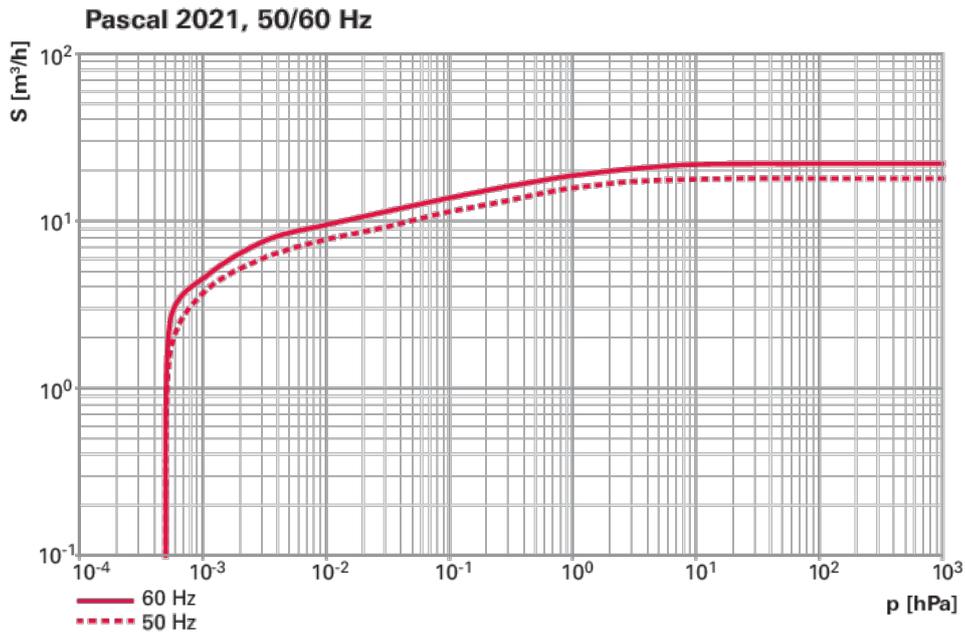


Abbildung 4-38: Pumpenkennlinie der Vakuumpumpe des Typs Pascal 2021 SD des Herstellers Pfeiffer Va-cuum; für die Untersuchungen im Projekt StoEx2 mit 50 Hz betrieben [Pfe 2024-1]. S: Volumenstrom; p: Gasdruck. [hPa] = [mbar].

Da die Pumpenleistung der Vakuumpumpe in diesem Druckbereich groß gegenüber dem evakuierten Volumen des VPB samt Verbindungen von 33 – 36 L ist, gelang die Evakuierung von Umgebungsdruck auf 1 mbar in nahezu allen Untersuchungen in weniger als 30 min. Relevanter für die Evakuierungsgeschwindigkeit ist daher der Bereich < 1 mbar, auf den sich die nachfolgend gezeigten Diagramme zum Druckverlauf bei der Evakuierung aus Übersichtlichkeitsgründen konzentrieren.

In Abbildung 4-39 sind die Druckverläufe im VPB während der Evakuierung bei Raumtemperatur von im Mittel 23 °C und bei zwischenzeitlicher Aufheizung, Temperaturverlauf siehe Abbildung 4-37 rechts, dargestellt. Dabei ist erkennbar, dass der Gasdruck bei erhöhter Temperatur höher ist als bei Raumtemperatur, während er nach der Abkühlung auf ein geringeres Druckniveau fällt.

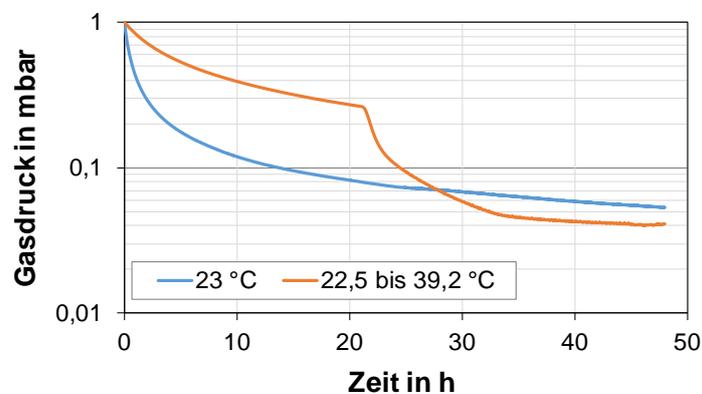


Abbildung 4-39: Druckverläufe im VPB während der Evakuierung bei Raumtemperatur von im Mittel 23 °C und bei zwischenzeitlicher Aufheizung (Temperaturverlauf siehe Abbildung 4-37 rechts).

In Tabelle 4-3 sind die Enddrücke und andere relevante Parameter des Evakuierungsversuchs aufgeführt. Der relative Feuchtegehalt jeder Perlit-Probe wurde vor jedem Evakuierungsversuch entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 4.3.4 bestimmt. Zudem wurde vor jeder Evakuierung die Dichte der Perlitschüttung im VPB durch Wiegen ermittelt, womit der absolute Wassergehalt bestimmt werden konnte.

Tabelle 4-3: Gasdruck nach 48-stündiger Evakuierung einer Probe bei Raumtemperatur (23 °C) und bei zwischenzeitlich bis zu 39,2 °C ausgeheizter Probe.

Probe	Relativer Feuchtegehalt	Absoluter Feuchtegehalt	Probentemperatur	Druck nach 48 h Evakuierung
TPC1,5, gelagert	1,46 %	36,14 g	23 °C	0,053 mbar
TPC1,5, gelagert	1,63 %	38,73 g	22,5 °C - 39,2 °C s. Abbildung 4-37	0,041 mbar

Die Werte in Tabelle 4-3 zeigen, dass nach der Ausheizung mit 0,041 mbar ein um 0,012 mbar und damit um 22,6 % geringerer Druck erreicht wird als ohne Ausheizung, trotz eines um 2,59 g höheren Feuchtegehalts des Wärmedämmstoffs. Eine Aufheizung der Wärmedämmung eines doppelwandigen Warmwasserspeichers auf 39,2 °C wäre bei einer Umgebungstemperatur des Speichers von 20 °C in der Fertigungshalle bereits bei einer Temperatur im Speicherinneren von zwischen 58 und 59 °C erreichbar. Diese Temperatur lässt sich mit sehr geringem Aufwand, beispielsweise mit Hilfe eines Halogenstrahlers mit 200 bis 300 W, im ungefüllten Speicherinneren erreichen [Ger 2016].

Die Untersuchungen im Labormaßstab lassen sich quantitativ nicht direkt auf die Evakuierung des Dämmraums eines realen Speichers anwenden, da das Dämmvolumen dabei deutlich größer ist im Verhältnis zur Saugleistung der Vakuumpumpe und dadurch auch in der gleichen Zeit nicht so geringe Gasdrücke erreicht werden. Daher sind zur Abschätzung quantitativer Auswirkungen vergleichende Untersuchungen im Realmaßstab nötig. Allerdings konnten die Laboruntersuchungen reproduzierbar vergleichend zeigen, dass bereits eine geringe Temperaturerhöhung einen deutlichen Nutzen bzgl. der Evakuierungsgeschwindigkeit besitzt. Zudem ist die Beschleunigung der Evakuierung durch Ausheizen eine bereits umfassend untersuchte und verifizierte Methode im Bereich der Vakuumtechnik – auch bei großen Vakuumsystemen. Daher ist auch im Realmaßstab von einer deutlichen Verringerung der Evakuierungsdauer auszugehen und von einem Nutzen/-Aufwand-Verhältnis deutlich über 1.

4.3.2 Vorevakuierung des leeren Dämmraums

Nicht nur am Wärmedämmstoff, sondern auch an den Wänden des Dämmraums sind flüchtige Substanzen wie Wasser gebunden. Je tiefer der Gasdruck ist, desto schneller können diese flüchtigen Substanzen durch eine Evakuierung desorbiert und aus dem Dämmraum entfernt

werden – und ggf. auch zu einem größeren Anteil. Wenn der Dämmraum noch ohne Wärmedämmstoff ist, ist der Strömungswiderstand deutlich geringer und es lassen sich deutlich schneller tiefere Vakuumdrücke erreichen.

Der Forschungsfrage ist daher, ob eine nachfolgende Evakuierung des mit Wärmedämmstoff gefüllten Dämmraums schneller gelingt, wenn zuvor eine Vorevakuierung des leeren Dämmraums erfolgt ist. Um diese Forschungsfrage zu beantworten, wurden zunächst Laboruntersuchungen an einem zylindrischen Probenbehälter mit einem Innenvolumen von 3,8 L durchgeführt. Dieser Behälter wurde mehrmals vorevakuiert um den Einfluss von Desorptionseffekten von den Behälterwänden auf die Untersuchungsergebnisse weitgehend ausschließen zu können. Die Oberfläche des Dämmraums des Speichers wurde mit Hilfe von Stahlplättchen aus Behälterstahl nachgebildet, die in den Behälter gefüllt wurden. Dabei wurden bei jeder Untersuchung Stahlplättchen mit einer Gesamtoberfläche von jeweils 0,2275 m² verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-40 dargestellt.

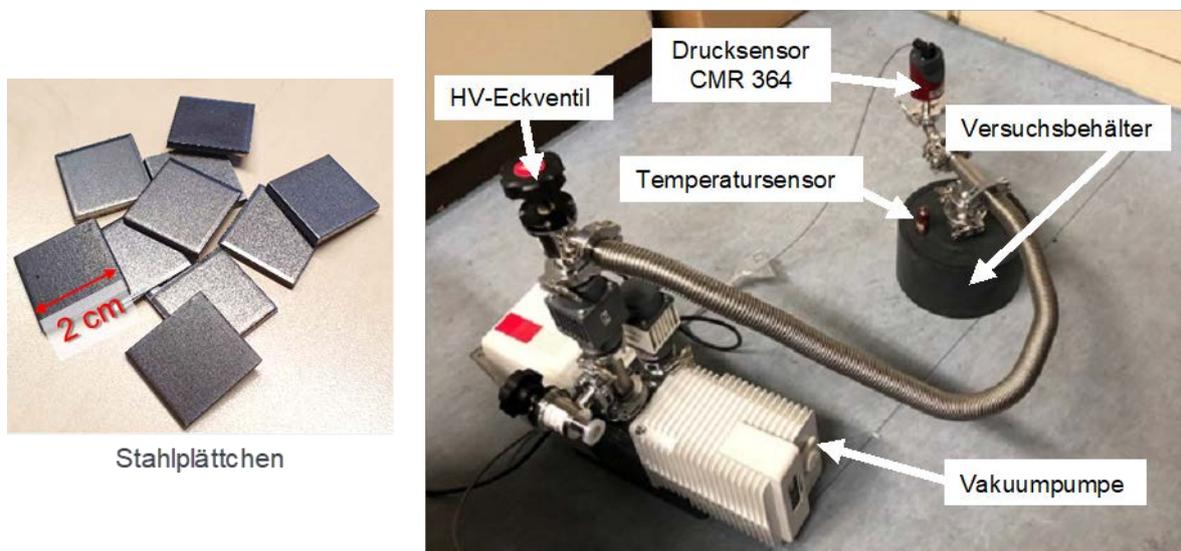


Abbildung 4-40: Versuchsaufbau für Laboruntersuchungen zur Wirkung einer Vorevakuierung eines leeren Dämmraums. Links: Stahlplättchen aus Behälterstahl, rechts: Versuchsanordnung.

Zunächst wurde nur der Unterschied der Evakuierungsgeschwindigkeiten des nur mit Stahlplättchen gefüllten Behälters nach mehrmaliger Evakuierung gemessen. Bei einem signifikanten Abtransport von flüchtigen Substanzen hierbei, müsste sich dieser Effekt bereits beschleunigend auf die Geschwindigkeit der nachfolgenden Evakuierungen auswirken. Danach wurde der Unterschied zwischen den Evakuierungsgeschwindigkeiten des mit jeweils nicht vorevakuiertem expandiertem Perlit gefüllten Behälters und Stahlplättchen ohne und mit Vorevakuierung gemessen.

Es konnten in keiner der beschriebenen Versuchsanordnungen eindeutige und signifikante Unterschiede in der Evakuierungsgeschwindigkeit zwischen vorevakuiertem und nicht vorevakuiertem Behälter und Stahlplättchen gemessen werden. Bei diesen Laboruntersuchungen war allerdings die Pumpleistung der verwendeten Vakuumpumpe vom Typ Pascal 2021 SD

des Herstellers Pfeiffer Vacuum (siehe Abbildung 4-38) im Vergleich zum evakuierten Volumen von 3 – 5 L sehr hoch, wodurch die Evakuierungsgeschwindigkeiten bei allen Versuchen sehr hoch waren. So wurden nach 6 h bereits Gasdrücke von $6 \cdot 10^{-3}$ mbar bei den Evakuierungen mit Perlit und von $2 \cdot 10^{-3}$ mbar bei den Evakuierungen ohne Perlit unterschritten. Bei diesen geringen Gasdrücken ist der Einfluss von unterschiedlichen Temperaturen und Leckagen relativ hoch. Da sich diese Effekte jedoch nicht rechnerisch quantifizieren lassen sind keine belastbaren Aussagen zu den Ergebnissen der hier durchgeführten Evakuierungsversuche möglich.

Da die Laboruntersuchungen, möglicherweise auch aufgrund des zu geringen Maßstabs im Vergleich zur Vakuumpumpe, keine eindeutigen Ergebnisse zur Wirksamkeit einer Vorevakuierung liefern konnten, wurde diese Maßnahme auch am Pilotspeicher Kirchdorf untersucht. Der Dämmraum dieses Speichers hat ein Volumen von 5 m^3 und eine innere Oberfläche von ca. 58 m^2 . Die Pumpenkennlinie des verwendeten zweistufigen Vakuumpumpstands ist in Abbildung 4-41 dargestellt. Der Vakuumpumpstand besteht aus einer Drehschiebervakuumpumpe mit der Bezeichnung Duo 65 und einer Wälzkolbenpumpe mit der Bezeichnung Okta 250 des Herstellers Pfeiffer Vacuum.

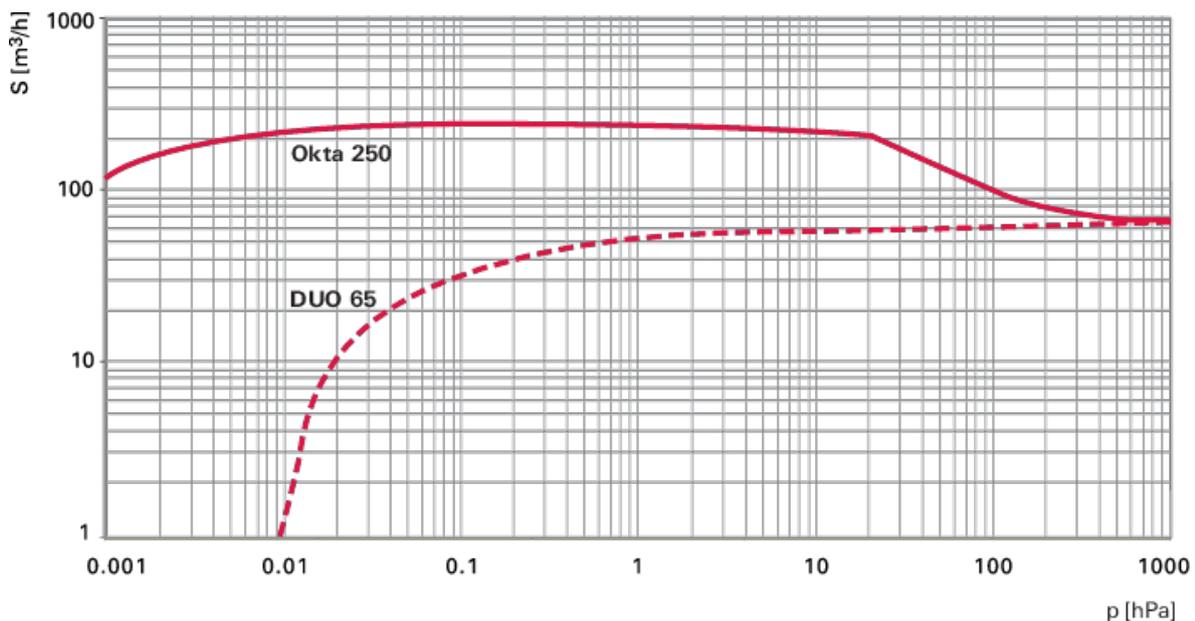


Abbildung 4-41: Pumpenkennlinie des Vakuumpumpstands der Firma Sirch bestehend aus den Vakuumpumpen Okta 250 und Duo 65 des Herstellers Pfeiffer Vacuum [Pfe 2024-2]. S: Volumenstrom; p: Gasdruck. [hPa] = [mbar].

Die Pumpleistung des Vakuumpumpstands ist zwar im relevanten Druckbereich um über den Faktor 20 höher als die der Vakuumpumpe für die Laborversuche, allerdings ist auch die Oberfläche des Dämmraums um den Faktor 255 höher als die der Stahlplättchen im Behälter für die Laborversuche. Zudem ist die Dämmraumoberfläche stärker korrodiert als die der Stahlplättchen, was die Adsorption und in Folge die Desorptionsrate von flüchtigen Substanzen verstärkt.

Bei den Untersuchungen am Pilotspeicher Kirchdorf wurde der leere Dämmraum mehrere Male hintereinander vorevakuiert. Bei der ersten Evakuierung wurde in 4,7 h von Umgebungsdruck auf 2 mbar evakuiert, bei der zweiten Evakuierung in 14,8 h auf 0,035 mbar und bei der dritten Evakuierung in 70 h auf $5,2 \cdot 10^{-3}$ mbar. Die unterschiedlichen Enddrücke sind Folge der unterschiedlichen Evakuierungszeiten. Der Unterschied der Evakuierungsdauern über den gleichen Druckbereich war jedoch nicht eindeutig mit der Anzahl der Vorevakuiierungen und den Temperaturen während und am Ende der Evakuierung in Zusammenhang zu bringen. So wurde beispielsweise ein Gasdruck von 2 mbar bei Evakuierung 1 nach 4,74 h erreicht, bei Evakuierung 2 nach 4,98 h und bei Evakuierung 3 nach 4,89 h. Die Evakuierung 2 dauerte damit länger als Evakuierung 1, obwohl bei Evakuierung 2 zum Ende der Evakuierung mit 27,94 °C eine leicht geringere Temperatur herrschte als nach Evakuierung 1 mit 28,19 °C. Außerdem lag die Mitteltemperatur während der Evakuierung 2 wiederum mit 29,15 °C höher als die Mitteltemperatur während Evakuierung 1 mit 26,4 °C, was einen ausheizenden und damit beschleunigenden Effekt auf die Evakuierung zur Folge hat, wenn die Endtemperatur gleich oder geringer ist als bei der Vergleichsmessung. Die geringere Evakuierungsdauer bei Evakuierung 3 im Vergleich zur Evakuierung 2 kann wiederum z. T. auf die geringere Temperatur am Ende der Evakuierung mit 26,56 °C zurückgeführt werden. Auch beim Vergleich der Evakuierungsdauern zu niedrigeren Gasdrücken bei Evakuierung 2 und 3 stellten sich keine Ergebnisse ein, die einen beschleunigenden Effekt einer Vorevakuiierung eindeutig belegen könnten.

Aufgrund der oben genannten Ergebnisse ist durch eine Vorevakuiierung auch keine signifikante Verringerung der Evakuierungsdauer bei einem mit Perlit gefüllten Dämmraum zu erwarten. Diese Maßnahme wird also zumindest bei einem unbeheizten Dämmraum als nicht zielführend bewertet. Weitere Untersuchungen könnten in Zukunft für eine Vorevakuiierung bei einem beheizten Dämmraum durchgeführt werden, wobei höhere Desorptionsraten zu erwarten sind.

4.3.3 Erhöhung des Evakuierungsquerschnitts

Im Allgemeinen gilt, dass die Evakuierungsgeschwindigkeit mit steigendem Evakuierungsquerschnitt steigt. Bei einer Kontinuumsströmung verringert sich dabei der Strömungswiderstand. Bei einer freien Molekularströmung, die bei niedrigen Vakuumdrücken erreicht wird, bewegen sich die Moleküle frei in der Gasphase und werden von benachbarten Gasmolekülen nur noch in geringem Maße durch Stöße beeinflusst. Die Stöße finden nun vorwiegend mit den begrenzenden Wänden der Feststoffphase statt. Die Gasmoleküle werden demnach auch vorwiegend durch diese Stöße in Richtung des Evakuierungsauslasses transportiert. Je größer der Querschnitt des Auslasses ist, desto geringer ist die Zeit bis ein Gasmolekül aus der freien Molekularströmung den Auslass trifft und desto größer ist entsprechend die Evakuierungsgeschwindigkeit.

Zudem erhöht sich die Evakuierungsgeschwindigkeit bei einer möglichst gleichmäßigen Aufteilung der Evakuierungsanschlüsse im Volumen der Vakuumkammer, da die Gasmoleküle somit im Mittel einen geringeren Weg aus der Vakuumkammer zurücklegen müssen. Dies gilt insbesondere für ein Restgas in einer feinporösen Struktur, wie in expandiertem Perlit. Diese

feinporöse Struktur ist ein System aus vielen Zwischenwänden und damit vielen Strömungswiderständen. Die Firma Sirch verwendet daher zur Evakuierung stets eine Sauglanze mit mehreren Anschlüssen über der Höhe des Dämmraums. Die Anschlüsse sind jeweils mit Staubfiltern versehen, um einen Austrag des Perlits aus dem Dämmraum zu verhindern.

Zur beispielhaften Quantifizieren des Effekts einer Erhöhung des Strömungsquerschnitts und einer gleichmäßigeren Aufteilung der Anschlüsse über das Dämmvolumen, hat das IGTE Laboruntersuchungen am Vakuumprobenbehälter (VPB) durchgeführt, der in Abschnitt 4.1.4.2 beschrieben und gezeigt wird. Dabei wurden ein bis drei der Anschlüsse am VPB verwendet. Der VPB wurde dafür jeweils mit einer neuen Probe aus gelagertem expandiertem Perlit TPC1,5 der gleichen Charge befüllt und mit der Vakuumpumpe vom Typ Pascal 2021 des Herstellers Pfeiffer Vacuum (siehe Abbildung 4-38) evakuiert. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-42 dargestellt.

Bei der Evakuierung mit einem Anschluss wurde ein Wellschlauch mit einer Länge von 1 m und einem Innendurchmesser des Schlauchs und des Anschlusses von ca. 25 mm mit einer Verbindung des Typs ISO-KF DN25 verwendet. Bei der Evakuierung mit zwei Anschlüssen wurde zusätzlich ein Wellschlauch mit einer Länge von 1,5 m und einem Innendurchmesser des Schlauchs und des Anschlusses von ca. 16 mm des Typs ISO-KF DN16 verwendet und zur Vakuumpumpe geführt. Der zweite Anschluss befindet sich auf der gegenüberliegenden Seite des ersten Anschlusses. Bei der Evakuierung mit drei Anschlüssen wurde ein DN25-T-Stück an den ersten Evakuierungsanschluss installiert und daran, neben dem ursprünglichen Wellschlauch, noch ein weiterer DN25-Wellschlauch mit 0,5 m Länge installiert, der an seiner anderen Seite am oberen DN25-Befüllungsanschluss angeschlossen wurde. Um einen Austrag von Perlit durch die Evakuierung zu verhindern, wurden an den Anschlüssen 1 und 2 Sinterfilter aus Kunststoff mit der Bezeichnung „M/S Schalldämpfer“ der Firma Norgren und an Anschluss 3 ein Sinterfilter aus Messing innerhalb eines ISO-KF-Zentrierrings von Pfeiffer Vacuum angeschlossen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Tabelle 4-4 in Form von Enddrücken nach einer 48-stündigen Evakuierung aufgeführt. Zudem sind weitere Einflussgrößen die für die Evakuierungsgeschwindigkeit relevant sind mit aufgeführt.

Bei einer Erhöhung der Anzahl der Evakuierungsanschlüsse von einem auf zwei und damit einer Erhöhung des Evakuierungsquerschnitts von 4,9 auf 6,9 cm² verringert sich der Gasdruck nach einer 48-stündigen Evakuierung von 0,053 auf 0,051 mbar. Hierbei ist die Ursache allerdings nicht eindeutig zuzuordnen, da der absolute Wassergehalt bei der Evakuierung mit zwei Anschlüssen geringfügig kleiner war als derjenige bei der Evakuierung mit einem Anschluss, was ebenfalls zu einer Verringerung der Evakuierungsdauer führen kann. Bei der Evakuierung mit Verwendung von drei Anschlüssen war der absolute Wassergehalt wiederum größer als bei der Evakuierung mit Verwendung von zwei Anschlüssen. Dennoch stellte sich nach einer 48-stündigen Evakuierung ein mit 0,049 mbar geringerer Gasdruck ein. Die Temperaturmittelwerte waren bei allen drei Evakuierungen ca. gleich. Damit deutet sich ein messbarer Effekt der Verwendung eines vergrößerten Strömungsquerschnitts und der gleichmäßigen Verteilung der Evakuierungsanschlüsse auf die Evakuierungsgeschwindigkeit auch einer mit expandiertem Perlit gefüllten Vakuumkammer an. Die Stichprobe an Messungen ist zu

gering um eindeutige Aussagen zu treffen, aber die Ergebnisse der Messungen bestätigen die theoretischen Grundlagen. Die Effekte sind allerdings sehr gering, da das Probenvolumen mit 33 L gering ist im Vergleich zur Pumpenleistung (siehe Abbildung 4-38). Eine Untersuchung im Realmaßstab ist sehr aufwendig und konnte im Rahmen des Projekts StoEx2 daher nicht durchgeführt werden.

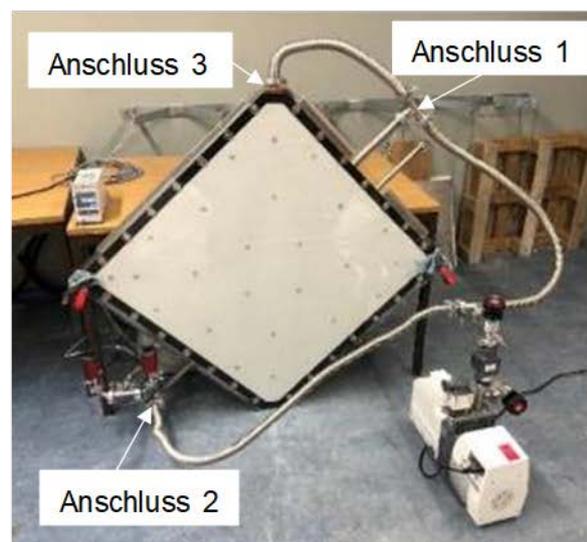
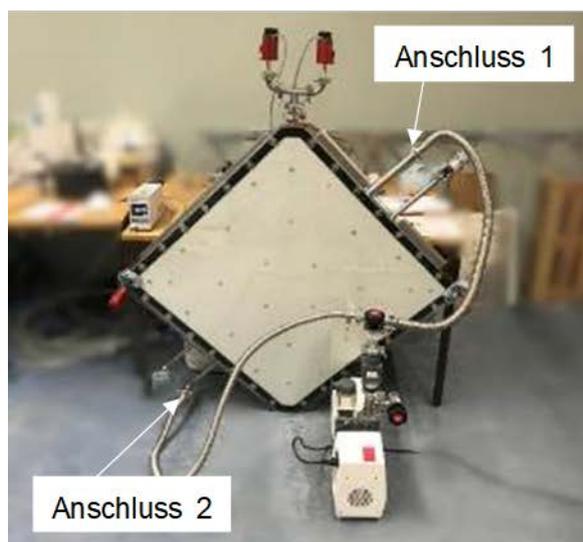
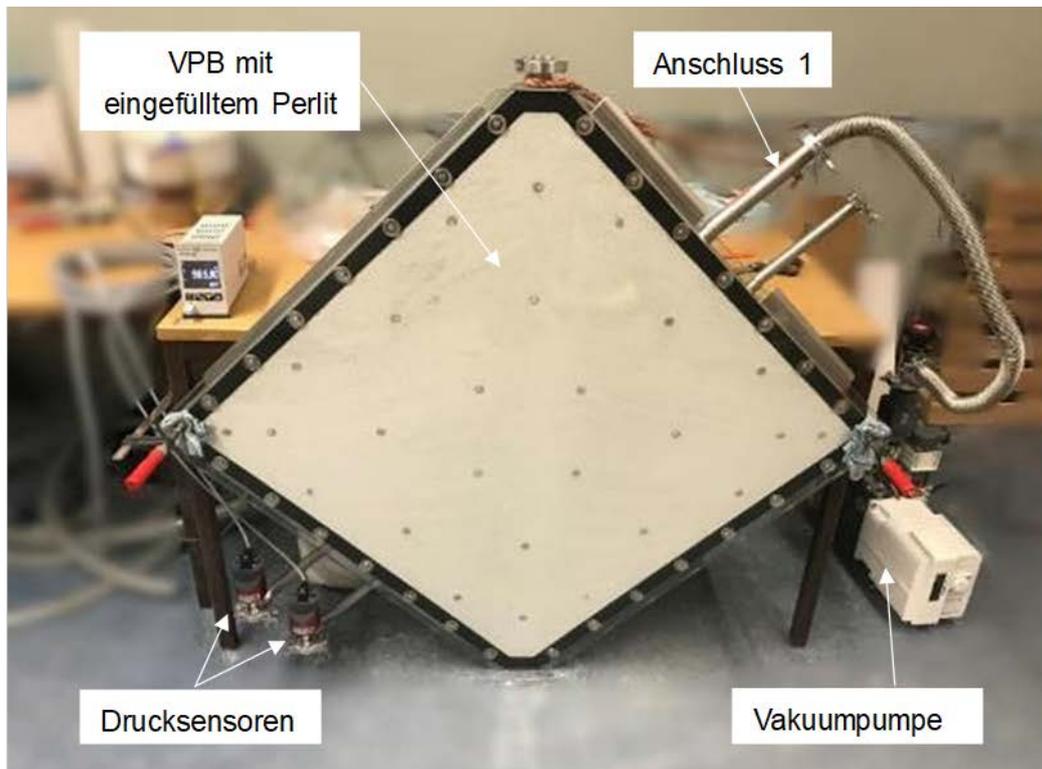


Abbildung 4-42: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Evakuierungsgeschwindigkeit bei Erhöhung des Evakuierungsquerschnitts und gleichmäßiger Verteilung der Evakuierungsanschlüsse.

Tabelle 4-4: Gasdrücke nach 48-stündiger Evakuierung des mit gelagertem expandiertem Perlit TPC1,5 gefüllten Vakuumprobenbehälters (VPB) bei unterschiedlichem Evakuierungsquerschnitt.

Anzahl der Evakuierungsanschlüsse	Evakuierungsquerschnitt gesamt	Relativer Wassergehalt der Probe	Absoluter Wassergehalt der Probe	Proben-temperatur	Gasdruck nach 48 h Evakuierung
1	4,9 cm ²	1,46 %	36,14 g	ca. 23 °C	0,053 mbar
2	6,9 cm ²	1,47 %	34,92 g	ca. 23 °C	0,051 mbar
3	11,8 cm ²	1,48 %	35,16 g	ca. 23 °C	0,049 mbar

4.3.4 Vergleich der Evakuierungsgeschwindigkeiten von frisch produziertem, gelagertem, unbehandeltem und hydrophobiertem Perlit

Die Desorption von gebundener Feuchtigkeit und anderen flüchtigen Substanzen an Wärmedämmstoff und Begrenzungswänden in die Gasphase erhöht den Gasdruck. Dies stellt einen der größten Einflussfaktoren für eine lange Evakuierungsdauer dar. Da die Anlagerung von Wasser aus der Luft an den Perlit-Wärmedämmstoff nach der Produktion des Wärmedämmstoffs mit der Zeit zunimmt, hat frisch produzierter Perlit einen geringeren Feuchtegehalt als gelagerter Perlit. Es existieren auch Perlite, die mit Hilfe von Silanen oder Silikonölen hydrophobiert wurden. Diese Hydrophobierung kann die Anlagerung von Feuchtigkeit hemmen und die Bindungsenergie angelagerter Feuchtigkeit am Perlit herabsetzen, wodurch eine Entfernung der Feuchtigkeit durch Evakuierung und Ausheizung vereinfacht wird.

Im Projekt StoEx2 wurden frisch produzierte und gelagerte expandierte Perlite mit und ohne Hydrophobierung bzgl. der Evakuierungsgeschwindigkeit im Vakuumprobenbehälter (VPB, siehe Abschnitt 4.1.4.2) untersucht. Dafür wurde der in Abschnitt 4.3.3 in Abbildung 4-42 oben gezeigte Versuchsaufbau mit einem Evakuierungsanschluss verwendet.

Kurz vor jeder Dämmstoffbefüllung in den VPB und der anschließenden Evakuierung wurde der relative Feuchtegehalt jedes Wärmedämmstoffs bestimmt. Dafür wurde das Gerät HG63 des Herstellers Mettler Toledo verwendet, siehe Abbildung 4-43. Mit diesem wurde der Wärmedämmstoff bei einer Temperatur von 160 °C über jeweils 2 h ausgeheizt wobei die Massenabnahme vom Gerät ermittelt wurde. Daraus lässt sich schließlich der relative Feuchtegehalt in Massen-% flüchtiger Substanzen, bezogen auf die Anfangsmasse bestimmen. Mit Hilfe der Dichte des Wärmedämmstoffs im VPB, die durch Wiegen und das befüllte Volumen des VPB ermittelt wird, kann ein absoluter Feuchtegehalt jeder Perlit-Probe im VPB berechnet werden.



Abbildung 4-43: Versuchsaufbau zur Bestimmung des relativen massenbezogenen Feuchtegehalts von expandiertem Perlit mit dem Gerät HG63 des Herstellers Mettler Toledo.

Der von der Firma Sirch verwendete und in Abbildung 4-1 gezeigte Perlit-Wärmedämmstoff Technoperl C1,5 (TPC1,5) wurde vom Hersteller nicht in hydrophobierter Form angeboten. Daher wurde der hydrophobierte Perlit Eurocell 1500-H (EC1500-H) des gleichen Herstellers mit einer sehr ähnlichen Korngrößenverteilung untersucht. Zu Vergleichszwecken wurde auch die unbehandelte Variante dieses Wärmedämmstoffs mit der Bezeichnung Eurocell 1500 (EC1500) untersucht.

In Abbildung 4-44 sind die untersuchten Perlite, deren relative und absolute Feuchtegehalte sowie die Gasdrücke nach einer 48-stündigen Evakuierung im VPB aufgeführt. Dabei zeigt sich, dass die frisch produzierten Perlite jeweils deutlich geringere Gasdrücke nach einer 48-stündigen Evakuierung erreichen als die gelagerten Perlite der gleichen Sorte. Auffällig ist auch, dass der gelagerte Perlit EC1500-H trotz Hydrophobierung den bei Weitem höchsten Feuchtegehalt besitzt. Dieser Perlit wurde beim Hersteller, unter dem IGTE unbekanntem Bedingungen, gelagert. Daher kann über die Ursachen dazu keine Aussage getroffen werden. Es ist aber offenbar möglich relative massenbezogene Feuchtegehalte von $> 2\%$ auch mit hydrophobiertem Perlit zu erreichen. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass bereits bei der Ausheiztemperatur von 160 °C bei der Feuchtebestimmung Teile des zur Hydrophobierung verwendeten Siliconöls verdampft und entfernt wurden. Dann wären diese Siliconölteile Teil des gemessenen Feuchtegehalts. Allerdings ist auch feststellbar, dass sich hydrophobierter Perlit schneller evakuieren lässt als unbehandelter Perlit der ansonsten gleichen Sorte. So wird nach einer 48-stündigen Evakuierung mit dem gelagerten Perlit EC1500-H trotz einem um den Faktor 1,8 höheren Feuchtegehalt mit $0,093\text{ mbar}$ ein geringerer Gasdruck erreicht als mit dem gelagerten Perlit EC1500. Zudem ist anhand des Vergleichs des frisch produzierten Perlits EC1500-H mit dem ebenfalls frisch produzierten Perlits TPC1,5 erkennbar, dass TPC1,5 selbst ohne Hydrophobierung beim gleichen Feuchtegehalt eine geringere Evakuierungsgeschwindigkeit ermöglicht. Ein Wechsel des bisher verwendeten Perlits zu

einem hydrophobierten Perlit des ähnlichen Typs EC1500 kann daher nicht empfohlen werden.

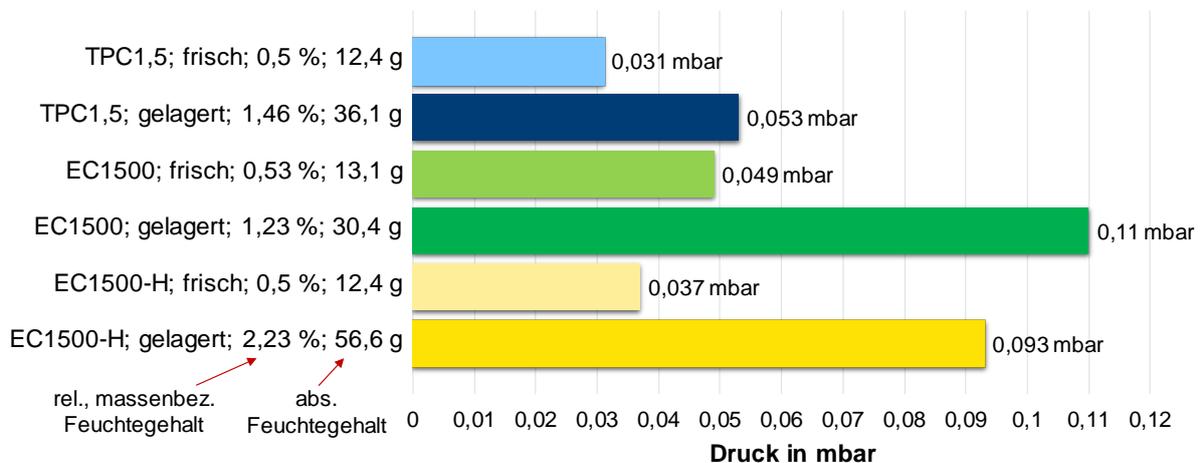


Abbildung 4-44: Gasdrücke nach einer 48-stündigen Evakuierung des VPB, gefüllt mit frisch produzierten, gelagerten, hydrophobierten und unbehandelten expandierten Perlit.

Um über die obige Analyse hinausgehende Vergleiche der Perlite zu ermöglichen, wurden die Gasdrücke nach der 48-stündigen Evakuierung auf die jeweiligen absoluten Feuchtegehalte der Perlitproben bezogen und in Abbildung 4-45 dargestellt.

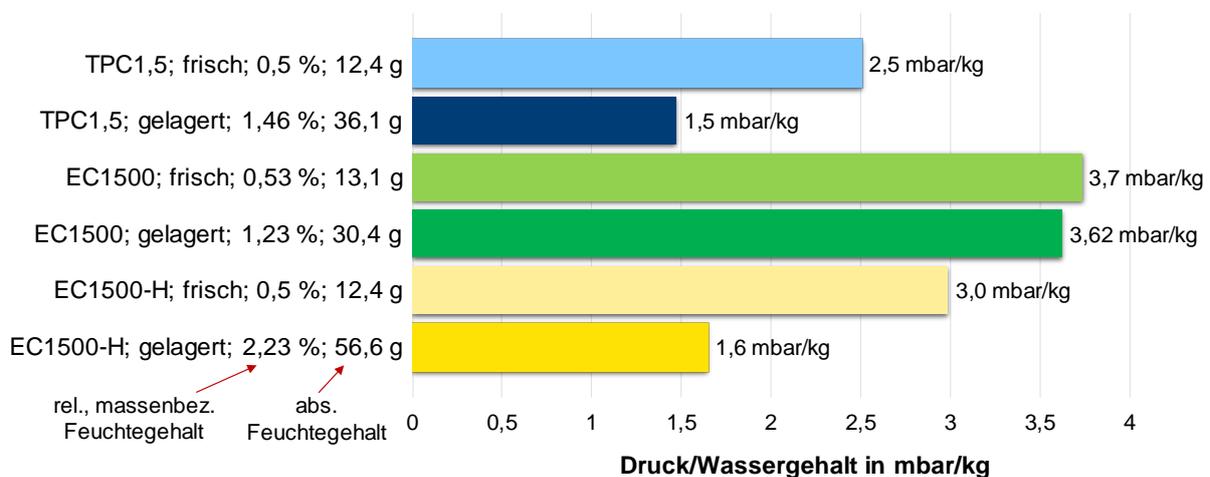


Abbildung 4-45: Auf absoluten Feuchtegehalt bezogene Gasdrücke nach einer 48-stündigen Evakuierung des VPB, gefüllt mit expandierten Perliten frisch produzierten, gelagerten, hydrophobierten und unbehandelten expandierten Perliten.

Anhand dieser Ergebnisse lässt sich auch für die übrigen Perlite aussagen, dass eine Hydrophobierung prinzipiell Vorteile bzgl. der Evakuierungsgeschwindigkeit bringt gegenüber einem unbehandelten Perlit des ansonsten gleichen Typs. Es zeigt sich damit jedoch auch eindeutig, dass unter den frisch produzierten Perliten TPC1,5 der bzgl. der Evakuierungsgeschwindigkeit günstigste ist. Die höheren Werte für frisch produzierte Perlite im Vergleich zu gelagerten Perliten zeigen nur, dass der erreichte Gasdruck nach 48-stündiger Evakuierung unterproportional

mit dem Feuchtegehalt sinkt und damit die Evakuierungsgeschwindigkeit unterproportional mit sinkendem Feuchtegehalt steigt.

4.3.5 Einsatz von Trocknungsmitteln (Zeolith)

Der hochporöse Zeolith ist stark hygroskopisch und bindet Wassermoleküle durch Adsorption. Dadurch kann er als Trocknungsmittel verwendet werden. Wird der Zeolith auf sehr niedrige Temperaturen gebracht, können auch die Luftmoleküle Stickstoff und Sauerstoff gebunden werden. Das machen sich sogenannte Sorptions-Vakuumpumpen zunutze. Im Projekt StoEx2 wird Zeolith verwendet, um Wassermoleküle aus dem Restgas eines Vakuums zu binden und damit einerseits den absoluten Gasdruck zu verringern und andererseits den Druckanstieg im Dämmraum aufgrund eines Temperaturanstiegs zu mindern. Bei einem Temperaturanstieg steigt der Gasdruck im Dämmraum nämlich zum größten Teil aufgrund von Desorption von an den Oberflächen des Wärmedämmstoffs und der Dämmraumwände gebundenen Wassers in die Gasphase. Im Projekt StoEx wurde der Zeolith 13X BF von BASF eingesetzt. Dabei handelt es sich um ein Schüttungsmaterial aus hochporösen Körnern mit einem Durchmesser von 1,6 – 2,5 mm, dargestellt in Abbildung 4-20 links. Weitere Eigenschaften dieses Zeoliths sind beispielsweise [BAS 2024] zu entnehmen.

Bereits im Projekt StoEx wurde die Wirkung von Zeolith auf die Druckabsenkung im Dämmraum eines Funktionsmusterspeichers im Technikumsmaßstab untersucht [Ger 2016]. Dafür wurde ein evakuierter Behälter mit 0,3 L regeneriertem Zeolith, d. h. eine sogenannte Zeolithfalle an einen Dämmraum mit 1300 L, gefüllt mit dem expandierten Perlit Volite 200 (s. Abschnitt 4.2.2), angeschlossen. Dabei konnte der Gasdruck im Dämmraum von 1,55 auf 1,17 um 0,38 mbar abgesenkt werden.

Die Untersuchungen zum Einsatz von Zeolith wurden im Projekt StoEx2 für den derzeit verwendeten Perlit TPC1,5, für größere Dämmvolumina, zur Stabilisierung des Gasdrucks bei Zugabe direkt in den Dämmraum und zur Quantifizierung der nötigen Zeolithmenge fortgeführt.

4.3.5.1 Untersuchungen im Labormaßstab

Zunächst wurden Untersuchungen im Labormaßstab mit dem im Abschnitt 4.1.4.2 und Abbildung 4-4 gezeigten Vakuumprobenbehälter (VPB) durchgeführt. Dort wurde sowohl die Wirkung einer Zeolithfalle als auch die Wirkung von in den VPB gefüllten Zeolith untersucht.

Die Zeolithfalle besteht aus einem mit Zeolith gefüllten T-Stück mit Ventil und einem Innenvolumen von ca. 0,2 L. Dieses wurde auf ca. 0,2 mbar evakuiert und über das zunächst geschlossene Ventil an die Befüllöffnung des VPB angeschlossen, siehe Abbildung 4-46. Daraufhin wurde der mit TPC1,5 gefüllte VPB auf einen Gasdruck von 0,175 mbar evakuiert. Nach der Evakuierung wurde für 5,84 h der Druckanstieg aufgrund der Leckage des VPB gemessen. Der Druckanstieg betrug $6,1 \cdot 10^{-2}$ mbar/h, was mit dem evakuierten Gasvolumen einer Leckagerate von $5,6 \cdot 10^{-4}$ mbar·L/s entspricht. Diese Leckagerate ist deutlich höher als bei den übrigen Versuchen am VPB und ist vmtl. auf Undichtigkeiten an einem Anschluss zwischen dem VPB und der Zeolithfalle zurückzuführen. Nach der Messung der Leckage wurde das Ventil zwischen Zeolithfalle und VPB geöffnet, was innerhalb von 18 h zu einer Druckabsenkung von

0,09 mbar führte. Die Leckage war danach so gering, dass sie nicht mehr eindeutig bestimmbar war. Der Gasdruck schwankte danach entsprechend der Raumtemperaturschwankungen, wie in Abbildung 4-47 gut erkennbar ist.



Abbildung 4-46: Versuchsaufbau zur Untersuchung der Wirkung einer Zeolithfalle zur Druckabsenkung des mit Perlit TPC1,5 gefüllten VPB im Labormaßstab.

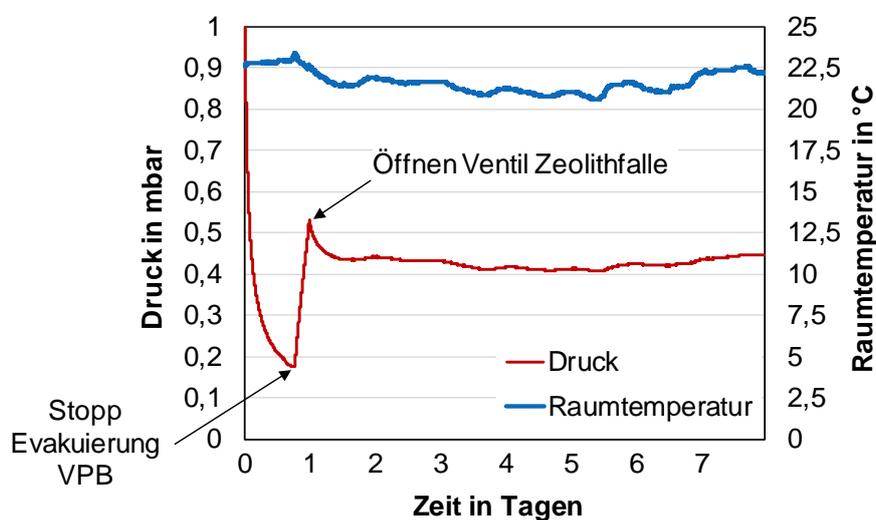


Abbildung 4-47: Verlauf von Gasdruck und Raumtemperatur bei der Untersuchung der Wirkung einer Zeolithfalle zur Druckabsenkung des mit Perlit TPC1,5 gefüllten VPB im Labormaßstab.

Die Zeolithmasse 13X BF von 150 g bezogen auf eine Perlitmasse TPC1,5 im VPB von 2.380 g mit einem Massenverhältnis von 0,063 reicht demnach aus, um den Gasdruck von 0,53 auf 0,44 mbar um 0,09 mbar abzusenken und um temporär eine Leckagerate von $5,6 \cdot 10^{-4}$ mbar·L/s auszugleichen. Das Ausgleichen der Leckage gelingt durch die Adsorption des Wasserdampfanteils aus der Gasphase im VPB und der einströmenden Luft am Zeolith.

Der Perlit hatte einen relativen massenbezogenen Feuchtegehalt von 1,48 %, was bei der gemessenen Dichte von 72 kg/m^3 einem absoluten Feuchtegehalt von 34,92 g entspricht.

In einem weiteren Versuch wurde eine Zeolithmasse von 365 g dem mit 2.310 g TPC1,5 gefüllten VPB beigemischt, siehe Abbildung 4-48. Daraus ergibt sich ein Massenverhältnis von Zeolith zu Perlit von 0,158. Dieses Massenverhältnis wurde für die Möglichkeit einer vollständigen Adsorption der am Perlit gebundenen Feuchte ausgelegt. Die benötigte Zeolithmasse wurde dafür auf der Basis der konservativen Annahme berechnet, dass der Zeolith 20 % seiner Masse an Wasser aufnehmen kann, wobei dies lt. Herstellerangabe bis zu 30 % sein können [BAS 2024] und der Perlit einen relativen Feuchtegehalt von 1,58 % aufweist. Zudem wurde ein Sicherheitsfaktor von 2 angesetzt. Der Beitrag der Feuchtigkeit der Umgebungsluft kann auch bei 100 %-iger relativer Luftfeuchte bei $24 \text{ }^\circ\text{C}$ gegenüber dem Feuchtegehalt des Wärmedämmstoffs vernachlässigt werden. Die oben beschriebenen konservativen Annahmen wurden getroffen, da davon auszugehen ist, dass der Zeolith bei geringen Gesamtgasdrücken weniger Feuchtigkeit aufnehmen kann. Unter den optimistischeren Annahmen von 30 % Wasseraufnahme, frisch produziertem TPC1,5 mit einem relativen Feuchtegehalt von 0,5 % und ohne Sicherheitsfaktor wäre schon ein Massenverhältnis von 0,017 ausreichend.

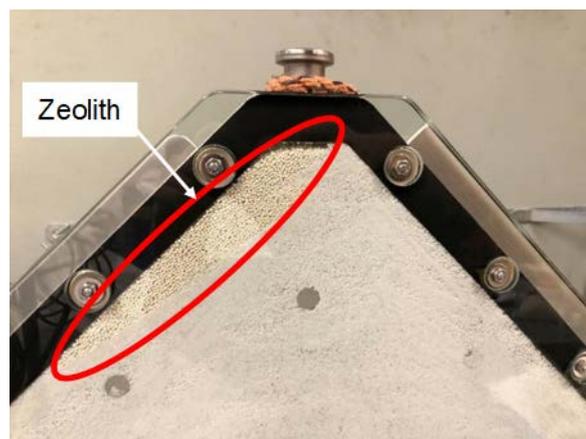


Abbildung 4-48: Zeolith 13X BF im mit dem Perlit TPC1,5 gefüllten VPB für die Untersuchungen zur Wirkung einer Zeolithbeimischung auf die Evakuierungsgeschwindigkeit und zum Druckanstieg in Folge von Temperaturerhöhungen und Leckage.

Der wie oben beschrieben präparierte VPB wurde für 48 h evakuiert und danach wurde die Leckagerate ermittelt. Die resultierenden Werte wurden mit den entsprechenden Werten eines Evakuierungsversuchs ohne Zeolith verglichen. Die relevanten Werte dieser Evakuierungsversuche sind in Tabelle 4-5 aufgeführt.

Trotz des höheren absoluten Feuchtegehalts des TPC1,5 konnte die Probe mit Zeolith nach 48 h auf einen geringfügig niedrigeren Gasdruck evakuiert werden. Die geringe Wirkung kann darauf zurückgeführt werden, dass die Feuchtigkeit, die vom Zeolith adsorbiert wird zu einem gewissen Maß wieder durch das Evakuieren desorbiert wird. Zudem wird bei höheren Gasdrücken eine ausgeprägtere Wirkung des Zeoliths erwartet, da sich dabei ein höherer Wassergehalt im Wärmedämmstoff und in der Gasphase befindet und der Zeolith bei höheren Gasdrücken mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann.

Tabelle 4-5: Gasdrücke und Leckageraten nach 48-stündiger Evakuierung eines mit gelagertem expandiertem Perlit TPC1,5 gefüllten Vakuumprobenbehälters (VPB) mit und ohne zusätzlicher Zeolithbeimischung.

Probe	Relativer Feuchtegehalt des TPC1,5	Absoluter Feuchtegehalt des TPC1,5	Proben-temperatur	Gasdruck nach 48 h Evakuierung	Leckagerate
TPC1,5 gelagert	1,46 %	36,14 g	ca. 23 °C	0,053 mbar	$6,1 \cdot 10^{-5}$ mbar·L/s
TPC1,5 gelagert + Zeolith 13X BF	1,58 %	38,73 g	ca. 23 °C	0,051 mbar	$7,9 \cdot 10^{-6}$ mbar·L/s

Die Leckagerate liegt beim VPB mit Zeolithbeigabe um den Faktor 7,7 niedriger als ohne Zeolith. Daher kann dem Zeolith auch auf Basis dieses Versuchs eine gasdruckstabilisierende Wirkung unterstellt werden. Die Wirkung kann dadurch erklärt werden, dass der Zeolith weiterhin Feuchtigkeit aus der Gasphase aufnimmt, die sowohl vom Wärmedämmstoff, als auch aus der durch Leckage einströmenden Luft stammen kann.

4.3.5.2 Untersuchungen im Realmaßstab am Funktionsmusterspeicher StoEx

Für Untersuchungen der Wirkung von Zeolith im Realmaßstab wurde u. a. eine Zeolithfalle am Funktionsmusterspeicher aus dem Projekt StoEx (s. Abbildung 3-1) angeschlossen. Dieser hat ein Speichervolumen von 12 m³ und ein Dämmraumvolumen von ca. 8 m³.

Die Zeolithfalle besitzt ein Füllvolumen von 3,8 L und eine Zeolithmasse von 2,8 kg. Für die Zeolithfalle wurde der in Abbildung 4-40 rechts dargestellte Behälter verwendet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 4-49 dargestellt.

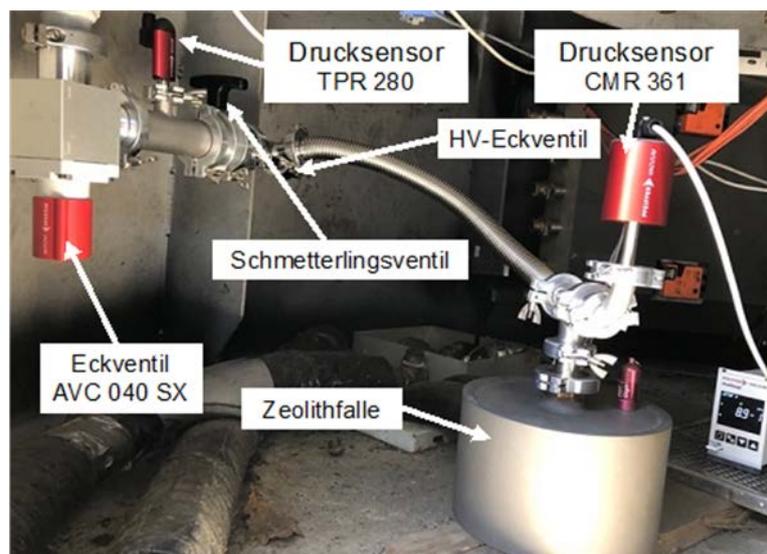


Abbildung 4-49: Zeolithfalle mit 3,8 L Füllvolumen angeschlossen an Funktionsmusterspeicher aus dem Projekt StoEx mit einem Dämmraumvolumen von ca. 8 m³.

Im Dämmraum des Funktionsmusterspeichers aus dem Projekt StoEx befindet sich eine Mischung aus 70 Massen-% TPC1,5 und 30 Massen-% der pyrogenen Kieselsäure HDK T30 des Herstellers Wacker [Wac 2012]. Die Dämmstoffmasse beträgt insgesamt 496 kg, der Feuchtegehalt des Wärmedämmstoffs ist unbekannt. Im Allgemeinen nimmt die beschriebene hydrophile pyrogene Kieselsäure jedoch höhere Massenanteile an Feuchtigkeit auf als expandierter Perlit. Das Massenverhältnis von Zeolith zum Wärmedämmstoff beträgt bei dieser Untersuchung 0,0056 und ist somit um den Faktor 28 geringer als das oben empfohlene Massenverhältnis von Zeolith zu TPC1,5 und um den Faktor 3 geringer als das unter optimistischen Annahmen berechnete Mindestmaß dieses Massenverhältnisses. Die Gasdrücke wurden mit den Drucksensoren TPR 280 und CMR 361 des Herstellers Pfeiffer Vacuum gemessen. Zudem wurde die Temperatur an der Zeolithfalle im unteren Speicherbereich mit dem Datenlogger Digit-TL von Labjack gemessen. Die Temperatur ändert sich sowohl aufgrund der Umgebungslufttemperatur als auch aufgrund der Sonneneinstrahlung auf die äußere Speicherwand. Es wird davon ausgegangen, dass die Temperatur an der Position des Temperatursensors weitgehend proportional zur Temperatur im Dämmraum ist. Es sollte sowohl der Druckabfall nach Zuschalten der Zeolithfalle, als auch der Einfluss der Zeolithfalle auf die temperaturabhängigkeit des Gasdruckes im Dämmraum untersucht werden. Dafür wurden Gasdruck und Temperatur über nahezu 11 Tage aufgenommen, siehe Abbildung 4-50.

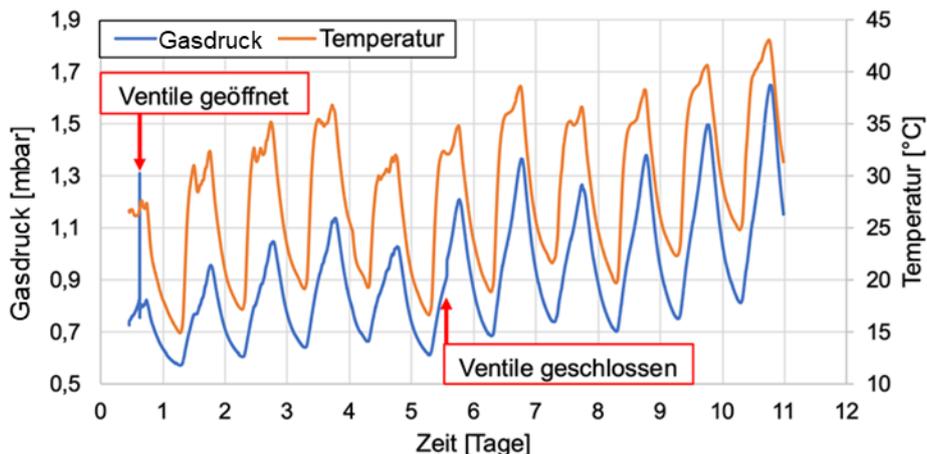


Abbildung 4-50: Verlauf von Temperatur und Gasdruck im Dämmraum des Funktionsmusterspeichers StoEx vor, während und nach dem Anschluss der Zeolithfalle. Die Zeolithfalle ist zwischen den Zeitpunkten „Ventile geöffnet“ und „Ventile geschlossen“ zugeschaltet.

Der Druck- und Temperaturverlauf von ca. 4 Stunden vor dem pneumatischen Zuschalten der Zeolithfalle bis ca. 3 Stunden danach ist in Abbildung 4-51 dargestellt. Die direkt vor dem Öffnen der Ventile gemessenen Gasdrücke betragen 0,832 mbar im Speicherdämmraum und 1,44 mbar in der Zeolithfalle. Daher kommt es an nach dem Öffnen der Ventile zunächst zu einem Druckanstieg auf 1,31 mbar innerhalb eines 10-sekündigen Messintervalls, bevor der Gasdruck innerhalb von 3 Minuten auf 0,773 mbar absinkt. Es wird also durch die Zeolithfalle ein Druckabfall von 0,059 mbar erreicht. Danach kommt es zu einem Gasdruckanstieg, der auf den Temperaturanstieg zur gleichen Zeit zurückgeführt werden kann. Der Druckanstieg

mit der Temperatur ist allerdings geringer als vor dem Zuschalten der Zeolithfalle. Der Druckanstieg vom geringsten Gasdruck nach der Ventilöffnung bis zum letzten lokalen Druckmaximum in Abbildung 4-51 liegt bei $0,0166 \text{ mbar/h}$. In diesem Zeitraum von $2,78 \text{ h}$ steigt die Temperatur von $26,92 \text{ °C}$ auf $27,28 \text{ °C}$ um $0,36 \text{ K}$. Dies ergibt einen zeit- und temperaturbezogenen Druckanstieg von $0,0461 \text{ mbar}/(\text{h}\cdot\text{K})$. In den $2,78 \text{ h}$ vor dem Öffnen der Ventile beträgt der Druckanstieg $0,0251 \text{ mbar/h}$ und der Temperaturanstieg $0,14 \text{ K}$ von $26,73$ bis $26,87 \text{ °C}$, was einem zeit- und temperaturbezogenen Druckanstieg von $0,1793 \text{ mbar}/(\text{h}\cdot\text{K})$ entspricht. Dieser Wert liegt demnach um den Faktor $3,91$ höher als bei zugeschalteter Zeolithfalle, was auf eine starke Wirkung des Zeoliths bzgl. der Abschwächung des temperaturbedingten Druckanstiegs hindeutet.

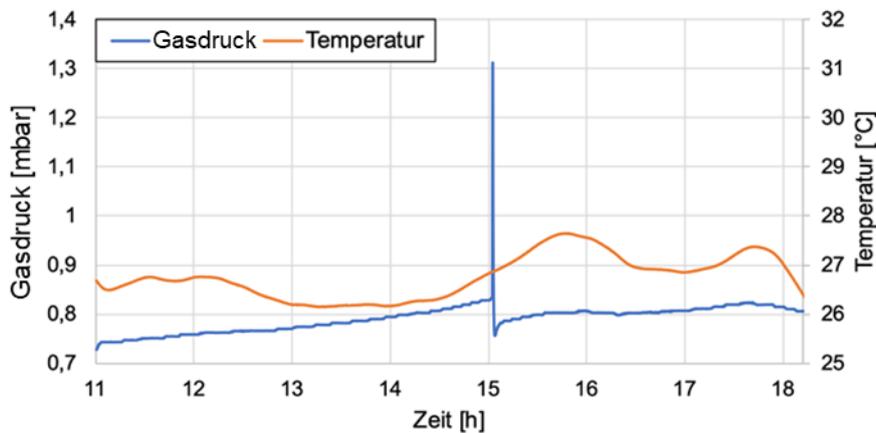


Abbildung 4-51: Verlauf von Temperatur und Gasdruck im Dämmraum des Funktionsmusterspeichers StoEx kurz vor, während und nach dem Zuschalten der Zeolithfalle

Da eine Zeolithfalle jedoch nur für einen temporären Einsatz am Speicher vorgesehen ist, wurde auch die Zeit nach dem pneumatischen Trennen der Zeolithfalle vom Speicherdämmraum untersucht. Dabei wurde zunächst ein abrupter Druckanstieg von $0,9142$ auf $0,9527 \text{ mbar}$ um $0,0385 \text{ mbar}$ gemessen, siehe Abbildung 4-52. Wird dieser Wert vom Druckabfall beim Zuschalten der Zeolithfalle abgezogen, ergibt sich noch ein Netto-Druckabfall von $0,0205 \text{ mbar}$.

Der Effekt des Druckanstiegs nach dem pneumatischen Trennen der Zeolithfalle von der Vakuumkammer konnte bei den Untersuchungen im Labormaßstab am VPB nicht beobachtet werden. Dort befanden sich Drucksensor und Zeolithfalle auf gegenüberliegenden Seiten des VPB. Am Dämmraum des Funktionsmusterspeichers existiert nur ein Vakuumananschluss, wodurch zwischen Zeolithfalle und Drucksensor nur ein sehr geringer Strömungswiderstand vorhanden ist im Vergleich zum Dämmraum mit Wärmedämmstoff. Es ist daher anzunehmen, dass ein Teil des Druckabfalls, der nach dem pneumatischen Zuschalten der Zeolithfalle gemessen wird, auf einen permanenten Druckunterschied zwischen Zeolithfalle und Dämmraum zurückzuführen ist, der aus der adsorbierende Wirkung des Zeoliths resultiert. Der Drucksensor misst in diesem Fall einen Gasdruck der geringer ist als der Gasdruck im Speicherdämmraum. Dass der verbleibende Netto-Druckabfall von $0,0205 \text{ mbar}$ geringer ist als in den Labormessungen kann einerseits auf das deutlich geringere Massenverhältnis von Zeolith zu

Wärmedämmstoff zurückgeführt werden und andererseits durch die stärkere Bindungsenergie von der im Dämmraum enthaltenen pyrogenen Kieselsäure zu Wasser im Vergleich zu Perlit.

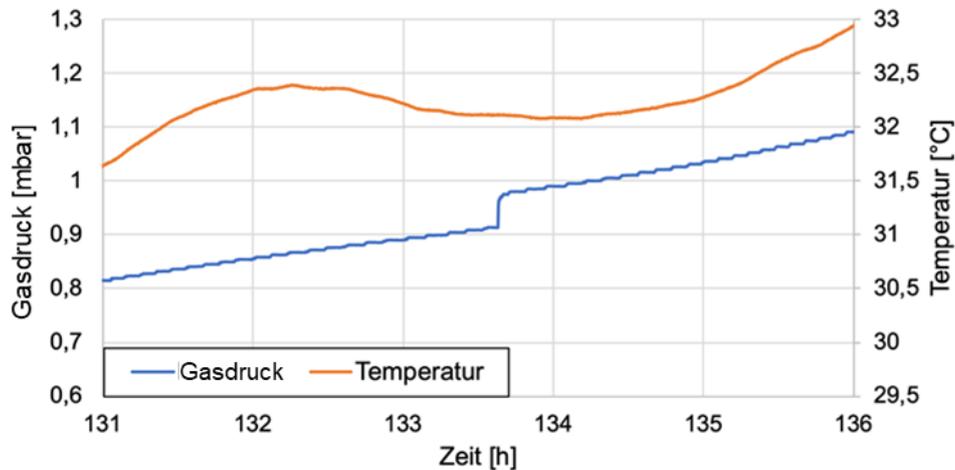


Abbildung 4-52: Verlauf von Temperatur und Gasdruck im Dämmraum des Funktionsmusterspeichers StoEx kurz vor, während und nach dem pneumatischen Abtrennen der Zeolithfalle.

Es wurde auch untersucht, wie nachhaltig sich die Temperaturabhängigkeit des Gasdrucks durch die temporäre Zuschaltung einer Zeolithfalle verringern lässt, indem auch Zeiträume nach dem pneumatischen Trennen der Zeolithfalle diesbezüglich ausgewertet wurden. Um Trägheitseinflüsse möglichst weitgehend auszuschließen, wurden dabei möglichst lange Zeiträume mit möglichst ähnlichem Temperaturverlauf bei und nach Zuschaltung der Zeolithfalle identifiziert. In Abbildung 4-53 sind die Gasdruck- und Temperaturverläufe von zwei 5 h-Zeiträumen, an Tag 4 und Tag 7, mit sehr ähnlichem Temperaturverlauf abgebildet, die ausgewertet wurden. Im Zeitraum zwischen den beiden senkrechten roten Geraden ist die Anfangs- und Endtemperatur beider Tage identisch. Von diesen Zeiträumen wurde jeweils die letzte Stunde ausgewertet.

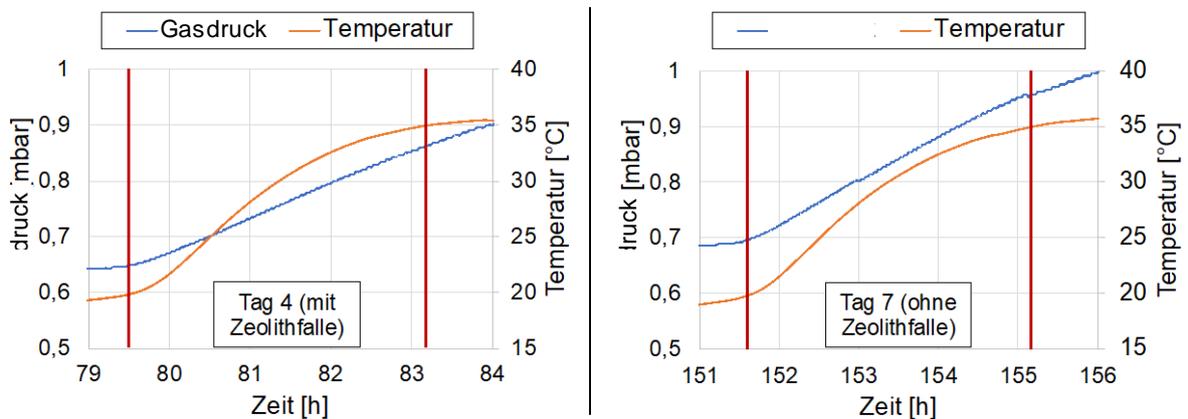


Abbildung 4-53: Verlauf von Temperatur und Gasdruck im Dämmraum des Funktionsmusterspeichers StoEx bei zugeschalteter Zeolithfalle (links) und nach dem Abtrennen der Zeolithfalle (rechts) zum Vergleich der Temperaturabhängigkeit des Gasdrucks.

An Tag 4 mit zugeschalteter Zeolithfalle lag der zeit- und temperaturbezogene Druckanstieg in dieser letzten Stunde bei 0,02967 mbar/(h·K) und an Tag 7, nach dem pneumatischen Abtrennen der Zeolithfalle, bei 0,03295 mbar/(h·K) und damit um den Faktor 1,1 höher. Dabei fällt auf, dass

- diese Werte deutlich geringer sind als der Wert vor dem Zuschalten der Zeolithfalle von 0,1793 mbar/(h·K),
- diese Werte geringer sind als der Wert unmittelbar nach dem Zuschalten der Zeolithfalle von 0,0461 mbar/(h·K) und
- die Differenz der Werte zwischen zugeschalteter und nach dem Zuschalten getrennter Zeolithfalle deutlich geringer ist als die Differenz der Werte vor und während dem Zuschalten der Zeolithfalle.

Alle drei Befunde deuten darauf hin, dass die Zeolithfalle einen nachhaltigen Effekt auf die Absenkung der Temperaturabhängigkeit des Gasdrucks hat, obwohl die Zeolithmasse um mindestens den Faktor 3 unterdimensioniert ist, wie oben berechnet wurde. Für eine noch effektivere Wirkung wird ein Massenverhältnis von Zeolith zu Perlit zwischen 0,017 und 0,158 empfohlen.

Von einem Vergleich der Leckageraten bei zugeschalteter und nicht zugeschalteter Zeolithfalle wurde aufgrund der großen Temperaturabhängigkeit des Drucks abgesehen.

4.3.5.3 Untersuchungen im Realmaßstab am Pilotspeicher Neumarkt

Für eine Untersuchung der Wirkung einer Zeolithfalle am Pilotspeicher Neumarkt wurde eine Zeolithfalle mit einem Innenvolumen von 180 L gefertigt, die mit ca. 132,6 kg Zeolith gefüllt wurde. Die Dämmstoffmasse des TPC1,5 liegt bei 1.434 kg. Damit ergibt sich ein Massenverhältnis von Zeolith und Perlit von 0,092, was somit im oben beschriebenen empfohlenen Bereich liegt. Der Gasdruck im Dämmraum, die Temperaturen im Fußring des Speichers und im Speichermedium sowie die Globalstrahlung wurden ca. 7,5 Tage vor, ca. 8 Tage während und ca. 14 Tage nach dem Anschluss der Zeolithfalle gemessen und ausgewertet. Danach wurde der Speicherdämmraum für ca. 6 Tage evakuiert.

Bei Zuschaltung der Zeolithfalle durch Öffnung der Ventile zwischen Zeolithfalle und Speicherdämmraum, kam es innerhalb von zwei Minuten zu einem Druckabfall von 0,412 mbar auf 0,299 mbar um 0,113 mbar. Der Gasdruck in der Zeolithfalle lag zuvor bei 0,256 mbar. Der Einfluss des geringeren Drucks in der Zeolithfalle auf die Druckabsenkung liegt aufgrund des geringen Volumenverhältnisses bei nur 0,0014 mbar. Bei gleichem Druck in der Zeolithfalle ergäbe sich also eine nur sehr leicht geringere Druckabsenkung von 0,1116 mbar. Bei der pneumatischen Trennung der Zeolithfalle vom Speicherdämmraum wurde hingegen nur ein Druckanstieg von 0,001 mbar gemessen. Die Netto-Druckabsenkung durch die Zeolithfalle beträgt demnach 0,1106 mbar. Dies ist ein signifikanter Beitrag von 26,8 % gegenüber dem Gasdruck vor dem Zuschalten der Zeolithfalle.

Es konnte in diesem Versuchsaufbau allerdings, anders als in den vorangegangenen Versuchen, kein eindeutiger Einfluss der Zeolithfalle auf die Temperatur- und Leckageabhängigkeit des Gasdrucks ermittelt werden. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich am Speicher samt

Rohrsystem zum Anschluss von Zeolithfalle und Drucksensor sehr hohe leakagebedingte Druckanstiege zwischen $6,0 \cdot 10^{-4}$ und $1,1 \cdot 10^{-3}$ mbar/h einstellten, was einer Leckagerate von $3,3 \cdot 10^{-3}$ mbar·L/s bis $6,1 \cdot 10^{-3}$ mbar·L/s entspricht. Eine Suche und Verringerung der Leakage war im Projektzeitraum nicht mehr möglich.

4.3.5.4 Beobachtungen zur Druckmessung mit unterschiedlichen Drucksensoren

Bei den Druckmessungen am Dämmraum des Pilotspeichers Neumarkt stellte sich allerdings ein interessanter Effekt ein. Mehrere gasartabhängige Drucksensoren maßen sehr hohe Gasdrücke – bis zum Umgebungsdruck. U. a. wurden mehrere Drucksensoren des Typs TPR 280 des Herstellers Pfeiffer Vacuum geprüft. Dieser, sowie die weiteren geprüften Drucksensoren, funktionieren nach dem sogenannten Pirani-Prinzip, bei dem der Gasdruck abhängig von der Wärmeleitfähigkeit des Gases gemessen wird. Gasartunabhängige Drucksensoren, z. B. des Typs CMR 363 des Herstellers Pfeiffer Vacuum, zeigten wiederum plausible Vakuumdrücke an. Dieses Phänomen trat nur am Pilotspeicher Neumarkt sowie an einem weiteren von der Firma Sirch gefertigten vakuumwärmedämmten WWS am Standort Mengen in Baden-Württemberg auf, der bereits mehrere Jahre in Betrieb ist, nicht aber an anderen Vakuumkammern, an welchen dieselben Drucksensoren geprüft wurden. Auch am Funktionsmusterspeicher StoEx, welcher bereits eine Standzeit von > 8 Jahren aufweist, trat dieses Phänomen nicht auf, was darauf hindeutet, dass es sich nicht um ein prinzipielles Problem dieser Speicherbauart handelt. Eine mögliche Erklärung dafür könnte die Anwesenheit von einem Gas mit sehr hoher Wärmeleitfähigkeit wie z. B. Wasserstoff im Dämmraum der beiden weiter oben genannten Speicher sein. Eine zielführende Gasanalyse des Restgases konnte allerdings mit den vorhandenen Projektmitteln und der verbliebenen Zeit nicht mehr im Projekt StoEx2 durchgeführt werden. Es wurden aber bereits vorbereitende Messungen zur Prüfung des Funktionsprinzips an einem Massenspektrometer des Instituts für Biomedizinische Technik (BMT) der Universität Stuttgart durchgeführt, wofür an dieser Stelle gedankt wird.

4.3.5.5 Fazit zur Wirkung von Zeolith auf die Evakuierungsgeschwindigkeit und Gasdruckstabilität von Vakuumwärmedämmungen

Sowohl in Untersuchungen im Labor- und Technikumsmaßstab, als auch im Realmaßstab konnte prinzipiell eine deutliche Wirkung einer Zeolithfalle bzgl. der Verringerung des Gasdrucks und des temperatur- und leakagebedingten Druckanstiegs in einer Vakuumwärmedämmung nachgewiesen werden. Die Wirkung von in den Dämmraum zugesetztem Zeolith auf die oben beschriebenen Mechanismen wurde bisher nur im Labormaßstab gezeigt. Eine Untersuchung im Realmaßstab hierzu wurde bisher noch nicht detailliert wissenschaftlich begleitet. Die Firma Sirch hat allerdings in den Dämmraum eines, nicht im Rahmen des Projekts StoEx2 gefertigten, Warmwasserspeichers mit einem Speichervolumen und ca. $60,6 \text{ m}^3$ und einem Dämmraumvolumen von ca. 20 m^3 Zeolith mit einer Masse von 135 kg dem Wärmedämmstoff TPC1,5 zugesetzt. Dieser Dämmraum konnte innerhalb von sechs Tagen auf einen Gasdruck von 0,3 mbar evakuiert werden. Beim Pilotspeicher Neumarkt, mit nahezu gleichem Dämmraumvolumen und gleichem Wärmedämmstoff wurde hingegen kein Zeolith beigemischt. Dessen Dämmraum konnte in 54 Tagen nur auf einen Druck von 0,9 mbar evakuiert werden. In beiden Fällen wurde verhältnismäßig frisch produzierter Perlit der Sorte TPC1,5 verwendet,

allerdings wurde der tatsächliche Feuchtegehalt beider Perlite nicht vorab untersucht und verglichen. Auch wurde keine Leckagerate beider Speicherdämmräume ermittelt. Somit kann die Beschleunigung der Evakuierung nicht eindeutig dem zugesetzten Zeolith zugeschrieben werden. Zudem ist nicht auszuschließen, dass die tatsächlichen Gasdrücke im Dämmraum des Pilotspeichers Neumarkt deutlich geringer waren, als die mit dem eingesetzten gasartabhängigen Drucksensors gemessenen, siehe Abschnitt 4.3.5.4. Dadurch wäre auch die tatsächliche Evakuierungsgeschwindigkeit höher.

Die Laborergebnisse zeigten aber, dass eine Beschleunigung der Evakuierung durch Zugaben von Zeolith in den Wärmedämmstoff gelingen kann. Zugesetzter Zeolith kann bei hinreichender Menge auch einen nachhaltigeren Effekt auf die Stabilisierung des Gasdrucks erreichen und ist mit geringerem Aufwand umsetzbar als eine temporär zugeschaltete Zeolithfalle. Eine Zeolithfalle kann wiederum nach dem Einsatz unter deutlich geringerem Aufwand durch Ausheizen und Evakuieren regeneriert werden und kann danach eine stärkere Wirkung haben als zugesetzter Zeolith, der bereits teilweise mit Feuchtigkeit beladen ist. Eine Kombination aus beiden Methoden wurde im Rahmen des Projekts StoEx2 nicht untersucht, es kann aber erwartet werden, dass dies den größten Effekt bzgl. der Erhöhung der Evakuierungsgeschwindigkeit und der Gasdruckstabilität von Vakuumwärmedämmungen hat.

4.3.6 Einsatz einer Turbomolekularpumpe

Eine Turbomolekularpumpe, in Kurzform auch Turbopumpe genannt, kann im Bereich von Gasdrücken < 1 mbar und insbesondere bei sehr niedrigeren Vakuumdrücken $\ll 1$ mbar sehr hohe Saugleistungen erreichen. In Laboruntersuchungen konnte eine geringfügige Auswirkung hiervon auch auf die Evakuierungsgeschwindigkeit des mit TPC1,5 gefüllten Vakuumprobenbehälters (s. Abschnitt 4.1.4.2 und Abbildung 4-4) nachgewiesen werden. Dabei wurde die Evakuierung mittels der Drehschiebervakuumpumpe von Typ Pascal 2021 des Herstellers Pfeiffer Vacuum verglichen mit der Evakuierung bei zusätzlicher Zuschaltung der Turbopumpe des Typs HiPace 80 des gleichen Herstellers. Die Saugleistung des von der Firma Sirch bisher verwendeten Vakuumpumpstands aus Drehschieber- und Wälzkolbenpumpe (Pumpenkennlinie siehe Abbildung 4-41) wird allerdings für den Anwendungszweck als ausreichend bewertet, so dass mit einer Turbopumpe keine signifikante Steigerung der Evakuierungsgeschwindigkeit im Verhältnis zu den Beschaffungskosten einer ausreichend dimensionierten Turbopumpe erwartet wird.

4.3.7 Qualitative vergleichende Einschätzung von Nutzen und Aufwand der untersuchten Methoden zur Erhöhung der Evakuierungsgeschwindigkeit

Die beschleunigende Wirkung des Einsatzes von frisch produziertem expandiertem Perlit mit geringem Feuchtegehalt gegenüber gelagertem Perlit hat sich in den Untersuchungen als am größten herausgestellt, siehe Abschnitt 4.3.4. Demgegenüber stehen als Aufwand nur die Restriktionen bei der Planung des Herstellungsablaufes. Hierfür ist ein zuverlässiger Dämmstofflieferant und ein Wärmedämmstoff mit hoher Verfügbarkeit unabdingbar.

Die Methode mit der unter den Untersuchungsbedingungen zweitgrößten Wirkung ist der Einsatz von Zeolithen. Der Nutzen des Einsatzes von Zeolithen beschränkt sich dabei nicht nur auf die Beschleunigung der Evakuierung, sondern zeigt sich auch bzgl. der Gewährleistung

eines geringeren Druckanstiegs der Vakuumwärmedämmung mit der Temperatur und der Zeit, siehe Abschnitt 4.3.5. Die Kosten des untersuchten Zeoliths 13X BF betragen im Projektzeitraum ca. 5 €/kg und der Bau einer Zeolithfalle ist für die Firma Sirch kostengünstig realisierbar. Außerdem kann diese, nach einer Ausheizung und Evakuierung des Zeoliths im Behälter, nahezu beliebig oft wiederverwendet werden.

Die Methode, welche in den Laboruntersuchungen den drittgrößten Nutzen zeigte, ist die Ausheizung der Wärmedämmung während der Evakuierung. Der Kosten- und Materialaufwand für die Erreichung einer mittleren Dämmstofftemperatur von ca. 40 °C werden als sehr gering eingeschätzt, wohingegen der Nutzen schon bei diesen geringen Ausheiztemperaturen hoch ist, siehe Abschnitt 4.3.1. Bei höheren Ausheiztemperaturen sind erfahrungsgemäß auch deutlich höhere Effekte erzielbar, so dass dann auch eine höhere Wirksamkeit bzgl. der Beschleunigung der Evakuierung erwartet wird als durch den Einsatz von Zeolith. In den Laborversuchen zur Ausheizung und zum Einsatz von Zeolith wurde aus logistischen Gründen gelagerter Perlit verwendet. Bei frisch produziertem expandiertem Perlit muss, aufgrund des geringeren Feuchtegehalts, allerdings ein geringerer Effekt erwartet werden.

Die Erhöhung des Evakuierungsquerschnitts und eine möglichst gleichmäßige Verteilung der Evakuierungsanschlüsse über den zu evakuierenden Bereich führt im Allgemeinen zu einer höheren Evakuierungsgeschwindigkeit, wie auch in Laboruntersuchungen bestätigt werden konnte, siehe Abschnitt 4.3.3. Wie stark sich eine weitere Verbesserung im Vergleich zur der von der Firma Sirch bereits verwendeten Sauglanze im Realmaßstab auswirkt, konnte im Projekt StoEx2 allerdings nicht untersucht werden.

Eine Hydrophobierung von expandiertem Perlit kann die Evakuierungsgeschwindigkeit der Vakuumwärmedämmung im Vergleich zur nichthydrophobierten Variante des gleichen Perlits erhöhen. Allerdings ist der von der Firma Sirch verwendete Perlit nicht in hydrophobierter Ausführung verfügbar. Laut Hersteller liegt dies darin begründet, dass er eine für die Vakuumwärmedämmung nötige hohe Offenporigkeit der porösen Körner aufweist. Ein hydrophobierter Perlit mit sehr ähnlicher Korngrößenverteilung, aber mit geringerer Offenporigkeit, zeigte wiederum geringere Evakuierungsgeschwindigkeiten als der bereits verwendete unbehandelte Perlit, siehe Abschnitt 4.3.4.

Eine Turbomolekularpumpe kann insbesondere bei sehr geringen Gasdrücken die Saugleistung im Vergleich zu anderen Vakuumpumpenarten erhöhen. Die Firma Sirch hat mit ihrem Vakuumpumpstand jedoch bereits eine ausreichende Saugleistung zur Verfügung, so dass die Zusatzwirkung einer Turbomolekularpumpe derzeit nicht die Zusatzkosten hierfür rechtfertigen würde. Diese Einschätzung hängt aber u. a. von der Anzahl der in Zukunft von der Firma Sirch produzierten vakuumwärmegedämmten Warmwasserspeicher ab.

Entgegen der Erwartung konnte durch die Vorevakuierung des leeren Dämmraums ohne Ausheizung keine signifikante Evakuierungsbeschleunigung nachgewiesen werden, wie in Abschnitt 4.3.2 beschrieben wird, weshalb auf diesen Mehraufwand verzichtet werden kann. Eine Vorevakuierung des leeren Dämmraums bei gleichzeitiger Ausheizung bleibt wiederum ein interessanter Untersuchungsaspekt für die Zukunft.

Eine weitere Überlegung mit Einfluss auf die Evakuierungsgeschwindigkeit sowie zur Technologieoptimierung ist der Einsatz eines expandierten Perlits mit einer anderen mittleren Korngröße als die des bisher verwendeten. Prinzipiell verursacht ein feinkörnigerer und damit feinporigerer expandierter Perlit zwar geringere Evakuierungsgeschwindigkeiten, dafür wird damit für den relevanten Temperaturbereich bereits bei höheren Vakuumdrücken eine geringere effektive Wärmeleitfähigkeit erreicht [Lan 2022]. Bzgl. einer Technologieoptimierung wäre dies daher eine vielversprechende Option.

5. Untersuchung von architektonischen Integrationsmöglichkeiten (AP4)

Große Warmwasserspeicher, die außerhalb des Gebäudes aufgestellt werden, verändern sichtbar die Architektur und optische Anmutung der unmittelbaren Umgebung. Darüber hinaus verringern extern aufgestellte Speicher durch ihren Platzbedarf die vorhandene, nutzbare Fläche, welche dann nicht mehr für andere Zwecke zur Verfügung steht. Dieses kann zu Akzeptanzproblemen führen.

Aufgrund dieser Tatsachen wurde im Projekt das Ziel formuliert, architektonisch-ästhetische oder unauffällige Integrationsmöglichkeiten der Speicher für den Außenbereich zu entwickeln und zu untersuchen. Dieses sollte sowohl durch eine Verschönerung der Optik und des Designs erfolgen, wie zum Beispiel durch entsprechende farbliche Gestaltung der Außenhülle des Speichers, als auch durch Erweiterung der Funktionalität des Speichers für weitere Zwecke, wie bspw. durch zusätzliche Nutzung als Kletterturm, als Werbeträger oder als Stützsäule. Zum eigentlichen Zweck der Speicherung von thermischer Energie kommen somit weitere, durch die Speicheraufstellung möglich gewordene interessante Nutzungsmöglichkeiten hinzu, welche die Funktionalität und damit den Kundennutzen und folglich auch die Akzeptanz erhöhen können.

Im Einzelnen bestand die Vorgehensweise darin, dass zuerst erfolgversprechende architektonische Integrationsvorschläge durch Interviews identifiziert und anschließend die fünf attraktivsten Entwürfe ausgewählt wurden. Ein Teil hiervon wurde baulich umgesetzt und kann somit in der Praxis erprobt werden. Abschließend wurde ein Katalog-Entwurf mit architektonischen Integrationsvorschlägen zur Steigerung der Akzeptanz von potentiellen Bauherren, Planern, Architekten, Bewohnern und Behörden erstellt.

5.1 Identifikation architektonischer Integrationsmöglichkeiten

Zunächst wurden erfolgversprechende architektonische Integrationsvorschläge durch Interviews und Anfragen bei Behörden und potentiellen Kunden identifiziert. Hierfür wurde in einem ersten Schritt Kontakt zum Institut für Darstellung und Gestalten (idg) der Universität Stuttgart aufgenommen. In diesem Rahmen konnten erste Entwürfe für Integrationsmöglichkeiten, vornehmlich gemeinsam mit dem Künstler und Architekten Primin Wollensak vom idg, konkretisiert und grafisch skizziert werden.

In einem nächsten Schritt konnten durch Interviews mit Architekten, Planern und Nutzern weitere erfolgsversprechende architektonische Integrationsmöglichkeiten, aber auch damit zusammenhängende technische, rechtliche und praktische Probleme identifiziert werden. Insgesamt ergaben sich somit 14 Entwürfe, die näher zu betrachten waren.

So lässt sich der hocheffiziente Warmwasserspeicher beispielsweise unter einem Spiel- und Kletterturm für Kinder positionieren. Diese Variante eignet sich sowohl für Familien bzw. Wohngebäude als auch für Kindergärten und Schulen. Alternativ kann die Speicher-Außenhülle mit dekorativen Kunstwerken gestaltet werden. Diese Ausführung bietet sich beispielsweise für Gärten, aber auch für öffentliche Gebäude wie Museen und für Firmen als Werbe-

träger an. Für Gebäude-Gärten ist die Möglichkeit der vertikalen Begrünung des Speichermantels sehr gut geeignet. Hierdurch lässt sich der Speicher optisch harmonisch in die Gartenbepflanzung integrieren. Mittels gebogener Flachbildschirme, die der Speicherhülle angepasst sind, können wechselnde und bewegte Bilder und Texte dargestellt werden. Dies bietet insbesondere Firmen die Möglichkeit, Informationen für ihre Kommunikations- und Marketingaktivitäten der Öffentlichkeit zu präsentieren. Aber auch Gemeinden und Städte können diese Variante für Ihre Informationsaktivitäten multifunktional nutzen. Neben der separaten Aufstellung gibt es auch die Möglichkeit der funktionellen Integration der Speicher direkt am Gebäude, beispielsweise als Stütze einer Wendeltreppe für einen Aufgang, als Balkonstütze oder als Stütze für einen Wintergarten. Ebenso ist eine Nutzung des Speichers als Basisstütze für eine Aussichtsplattform möglich. Der Speicher als Stützsäule für eine stilvolle Überdachung einer Gartenterrasse oder einer Sitzecke zum Entspannen im Garten bietet eine weitere Möglichkeit der Integration, die nicht nur vor Sonne, Wind und Regen Schutz bietet, sondern auch individuell, modern und funktionell gestaltbar ist.

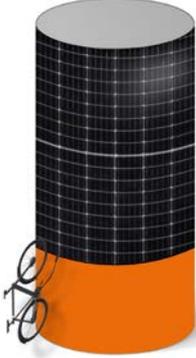
Die 14 erarbeiteten Vorschläge wurden der Firma Sirch vorgestellt und mit dieser diskutiert. Es wurde beschlossen, diese Vorschläge in einem nächsten Schritt noch um einen Vorschlag für die Gebäudeintegration von großvolumigen Warmwasserspeichern zu erweitern. Diese Idee der architektonischen Gebäudeintegration eines großvolumigen Warmwasserspeichers wurde durch Kombination mit einer Wendeltreppe umgesetzt.

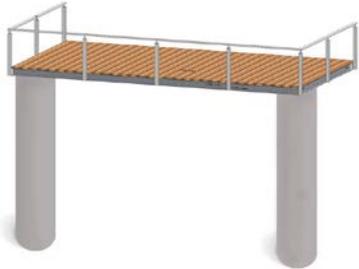
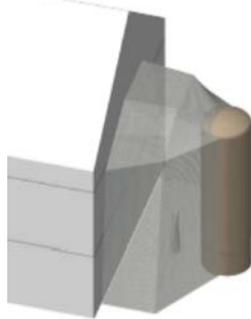
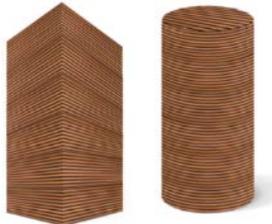
Im der folgenden Tabelle 5-1 sind die erarbeiteten 15 Entwürfe von Integrationsmöglichkeiten grafisch dargestellt und werden stichwortartig beschrieben.

Tabelle 5-1: Übersicht Entwürfe von architektonischen Integrationsmöglichkeiten von Speichern.

	Beschreibung	Bild
1	<p>Kunst-Säule</p> <p>Außenhülle kann mit dekorativen Kunstwerken gestaltet werden, welche wetterbeständig und je nach Geschmack unterschiedlich gestaltbar sind.</p> <p>Diese Variante ist beispielsweise für Gärten, aber auch für öffentliche Gebäude wie Museen, Kunsthallen und Firmen, z. B. als Werbeträger, geeignet.</p>	

2	<p>Werbesäule / Litfaßsäule / Informationssäule</p> <p>Mittels gebogener Flach-Bildschirme, welche der Speicherhülle angepasst sind, können wechselnde bzw. bewegte Bilder und Texte dargestellt werden.</p> <p>Dies bietet insbesondere für die Zielgruppe „Firmen“ die Möglichkeit, Informationen für ihre Kommunikations- und Marketingaktivitäten der Öffentlichkeit zu präsentieren. Aber auch Städte und Gemeinden, Schulen und Kindergärten können diese Variante für Ihre Informationsaktivitäten multifunktional nutzen.</p>	
3	<p>Spiel-Kletterturm</p> <p>Der hocheffiziente Warmwasserspeicher ist hier unter einem Spiel- bzw. Kletterturm für Kinder positioniert, welcher je nach Alter der Kinder beliebig ausgeführt werden kann.</p> <p>Diese Variante eignet sich für die Zielgruppe Familien bzw. Wohngebäude sowie auch für Kindergärten und Schulen, sowie Gaststätten und Restaurants, Hotels etc.</p>	
4	<p>Kletterturm für Sportler</p> <p>Hier ist der Warmwasserspeicher unter einem professionellen Kletterturm für Sport- und Hobbykletterer verborgen.</p> <p>Diese Variante ist bspw. für Vereine, Event- und Sport-Parks sowie Freizeiteinrichtungen von Interesse.</p>	
5	<p>Begrünte Säule</p> <p>Sehr gut für Gebäude-Gärten geeignet, ist die Möglichkeit der vertikalen Begrünung des Speichermantels. Hierdurch kann der Speicher optisch harmonisch in die Gartenbepflanzung integriert werden, unauffällig und dezent, oder als Attraktion mit farbigem Blütenmeer.</p> <p>Geeignet für Gärten von Privathäusern, aber auch (Senioren-)Heime, Hotels, etc.</p>	

6	<p>Säule „Überdachung“ und/oder Sonnenschutz</p> <p>Der Speicher als Stützsäule für eine stilvolle Überdachung einer Gartenterrasse bzw. einer Sitzecke zum Entspannen im Garten bietet eine weitere Möglichkeit der Integration, die nicht nur vor Sonne, Wind und Regen Schutz bietet, sondern auch individuell, modern und funktionell gestaltbar ist.</p> <p>Einsatzmöglichkeiten sind Privatgärten, Kultureinrichtungen, Restaurants, Hotels, etc.</p>	
7	<p>Stütze/Integration Gewächshaus</p> <p>Der Speicher als Stützsäule für ein Gewächshaus im Garten oder auch für die professionelle Anwendung für Gärtnereien oder in Zoos.</p>	
8	<p>Fahrradständer mit Auflademöglichkeit für E-Bikes durch PV-Außenhülle</p> <p>Die Außenwand des Speichers kann im unteren Bereich als Fahrradständer mit Hilfe von senkrechten Aufständerungsmöglichkeiten für Fahrräder dienen. Zusätzlich können im oberen Bereich der Außenhülle PV-Module zur Stromerzeugung angebracht werden und somit z. B. zur direkten Aufladung von E-Bikes dienen.</p> <p>Geeignet für Schulen, Universitäten, kulturelle Einrichtungen etc.</p>	
9	<p>Wendeltreppe</p> <p>Neben der separaten Aufstellung gibt es auch die Möglichkeit der funktionellen Integration der Speicher direkt am Gebäude, beispielsweise als zentrales Element einer Wendeltreppe für einen Aufgang, als Balkonstütze oder auch als Stütze für einen Wintergarten. Ebenso ist eine Nutzung des Speichers auch als Basisstütze für eine Aussichtsplattform möglich.</p>	

10	<p>Stütze(n) für Balkon</p> <p>Die Speicher dienen hier als Säulen für einen extern anzubauenden Balkon</p> <p>Diese Variante ist für alle Arten von Gebäuden gleichermaßen geeignet.</p>	
11	<p>Stütze für Treppenhaus oder Anbau</p> <p>Der Speicher dient als Stütze für einen Anbau, der als Platz für Fahrräder, Mülltonnen oder Kinderwagen dienen kann.</p> <p>Diese Variante ist für Mehrfamilienhäuser, Wohnheime etc. denkbar.</p>	
12	<p>Aussichtsturm</p> <p>Der Speicher dient hier als Säule für einen Aussichtsturm.</p> <p>Solche Türme sind an vielen Orten einsetzbar, u. a. in Parkanlagen oder Freibädern.</p>	
13	<p>Sprungturm für Schwimmbäder</p> <p>Der Speicher ist hier in der Säule des Sprungturms untergebracht.</p> <p>Für Schwimmbäder geeignet.</p>	
14	<p>Holzverkleidung in runde oder eckiger Ausführung</p> <p>Die Speicher werden hier mit Holzelementen verkleidet.</p> <p>Geeignet für jegliche Art von Gebäuden.</p>	
15	<p>Speicher mit Wendeltreppe im Gebäude</p> <p>Der Speicher wird über mehrere Stockwerke in das Gebäude integriert und kann innerhalb der Etagen als Stützsäule für eine Wendeltreppe dienen. Geeignet für alle Arten von Gebäuden.</p>	

Aufgrund der Tatsache, dass nicht sämtliche der 15 Entwürfe, insbesondere aus wirtschaftlichen und anwendungsspezifischen Gesichtspunkten, weiterverfolgt werden konnten, wurde beschlossen fünf Konzepte für eine Weiterverfolgung auszuwählen.

Die Auswahl wurde durch ein Expertenteam durchgeführt. Dieses war so zusammengesetzt, dass unterschiedliche fachliche Kompetenzen, Altersgruppen und Geschlechter vertreten waren. Diese Auswahl erfolgte in Form einer Priorisierung durch Nummerierung mit den Zahlen 1 bis 5 in die Kästchen der Konzeptübersichtstabelle. Das Gesamtergebnis der Priorisierung ist aus der in Abbildung 5-1 dargestellten Konzeptübersichtstabelle ersichtlich.

Bitte wählen Sie 5 Konzepte aus und kennzeichnen diese hinsichtlich Ihrer Priorität mit den Zahlen 1 – 5



Abbildung 5-1: Konzeptübersichtstabelle mit Gesamtergebnis der Priorisierung der architektonischen Integrationsmöglichkeiten

5.2 Bauliche Umsetzung ausgewählter Maßnahmen

Nach der Identifikation der fünf erfolgversprechendsten Konzepte, wurden ausgewählte architektonischer Integrationsmöglichkeiten an den im Projekt StoEx2 gefertigten Pilotspeichern umgesetzt.

Der erste Pilotspeicher wurde auf der Liegewiese des Schlossbads in Neumarkt aufgestellt. Dieser Speicher dient nun sowohl als Werbesäule für die Stadtwerke Neumarkt mit der Aufschrift „swn“, als auch als weithin sichtbares Kennzeichen und Alleinstellungsmerkmal für das Schlossbad, siehe Abbildung 5-2.

Werbesäule	
Entwurf	Realisierung
	

Abbildung 5-2: Entwurf (links) und Umsetzung (rechts) der Nutzung des Speichers als Werbesäule

Eine weitere architektonische Integrationsmöglichkeit wurde beim zweiten gefertigten Pilot-speicher umgesetzt. Dieser fungiert als Stützsäule für eine freischwebende Wendeltreppe in einem weitgehend solarbeheizten Haus in Kirchdorf an der Krems in Österreich; siehe Abbildung 5-3.

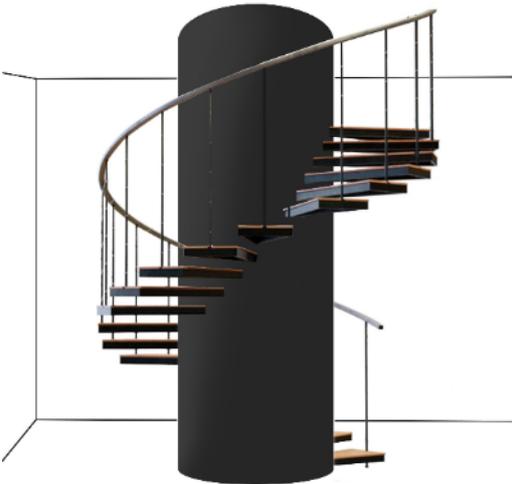
Speicher als Stützsäule für eine Wendeltreppe	
Entwurf	Realisierung
	

Abbildung 5-3: Entwurf (links) und Umsetzung (rechts) zur architektonische Gebäudeintegration eines großvolumigen Warmwasserspeichers als Stützsäule für eine Wendeltreppe

5.3 Erstellung Katalog mit architektonischen Integrationsvorschlägen

Nach der Identifikation von Vorschlägen zur ansprechenden architektonischen Integration von vornehmlich extern aufzustellenden Speichern, wurden diese in einem letzten Schritt in Form eines Katalogs übersichtlich zusammengestellt. Dieser Katalog soll dem Ziel der Steigerung der Akzeptanz von potentiellen Bauherren, Planern, Architekten, Bewohnern und Behörden dienen und kann von der Firma Sirch produktbegleitend zur Verfügung gestellt und in Zusammenhang mit Verkaufsgesprächen eingesetzt werden. In der Abbildung 5 5-4 sind exemplarisch einige Katalogseiten dargestellt.



Abbildung 5-4: Exemplarische Darstellung einiger Seiten des erstellten Katalogs mit architektonischen Integrationsvorschlägen

Der Katalog ist so aufgebaut, dass nach einer kurzen Beschreibung der Anwendungsgebiete und Vorteile von außenaufgestellten großvolumigen Warmwasserspeichern sowie des Vorhabens StoEx2, sämtliche erarbeiteten architektonischen Integrationsvorschläge auf jeweils einer Seite mit Bild und in Textform vorgestellt werden.

6. Untersuchung der Adaption auf andere Anwendungen (AP5)

Der Warmwasserspeicher (WWS) mit Vakuumwärmedämmung (VWD) wurde ursprünglich für die Wärmeversorgung von SolarAktivHäusern konzipiert. Jedoch ist diese Speichertechnologie mit ihrer hocheffizienten Wärmedämmung, den großen Speichervolumina und durch die mögliche Außenaufstellung grundsätzlich auch als Pufferspeicher für andere Anwendungen interessant. Hierzu zählen insbesondere BHKWs, Wärmenetze und Anwendungen im Bereich der industriellen Prozesswärme, also z. B. Brauereien und Wäschereien. Auch ein multifunktionaler Einsatz für verschieden Wärmequellen z. B. Solarthermie in Kombination mit einem BHKW und / oder einer Wärmepumpe ist möglich.

6.1 Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung als Pufferspeicher für BHKWs

Der Pilotspeicher Neumarkt wurde im Freizeitbad „Schlossbad“ in Neumarkt i.d.Opf. in eine Wärmeversorgungsanlage mit zwei stromgeführten BHKWs und einem Spitzenlastkessel integriert und dort innerhalb des Projekts StoEx2 messtechnisch untersucht (siehe hierzu auch Abschnitt 1.7 und 1.8). Dort ist perspektivisch auch der Einsatz einer „Power2Heat“-Wärmequelle geplant, um im Falle von niedrigen oder sogar negativen Strompreisen Wärme kostengünstig erzeugen und effizient im WWS speichern zu können.

Für diesen Pilotspeicher stehen durch das im Projekt StoEx2 erfolgte Monitoring detaillierte Messdaten in Form der ein- und austretenden Volumenströme und der Ein- und Austrittstemperaturen des Speichers sowie der Speicherinnen- und Umgebungstemperatur zur Verfügung. Lastdaten hiervon aus dem Betriebszeitraum vom 27.05.2022 bis zum 04.12.2022 wurden mit Hilfe des Simulationsprogramms TRNSYS auf ein entsprechendes Speichermodell aufgebracht. Für die Simulation wurde die aus den Abkühlversuchen ermittelte Wärmeverlustrate des Speichers von 12 W/K verwendet, siehe Abschnitt 8.1.1. Im Auswertzeitraum von 6 Monaten ergab sich die mittlere Speichertemperatur zu 66,8 °C, die mittlere Umgebungstemperatur zu 15,8 °C und die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung zu 51,0 K. Für Ganzjahresbetrachtungen wurden die Werte auf den entsprechenden Zeitraum extrapoliert.

Zum Vergleich wurde das thermische Verhalten eines WWS mit einer konventionellen Wärmedämmung (KWD) mit Hilfe der gleichen Lastdaten simuliert. Für diesen WWS wurde auf Basis der in Abschnitt 8.1.1 bzw. 8.3 beschriebenen Untersuchungen eine Wärmeverlustrate von 60 W/K gewählt, die damit um den Faktor 5 größer ist als die des WWS mit VWD. Aus den Simulationsergebnissen ergaben sich Gesamtwärmeverluste des WWS mit VWD von 4.544 kWh/a. Für einen WWS mit einer konventionellen Wärmedämmung ergaben sich aus der Simulation Gesamtwärmeverluste 21.445 kWh/a. Es können durch eine VWD in diesem Anwendungsfall also 16.901 kWh/a eingespart werden. Über eine angenommene Betriebsdauer von 50 Jahren ergibt sich damit eine Einsparung von 845 MWh. Eine einfache Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für diesen und andere Anwendungsfälle erfolgt im folgenden Abschnitt.

6.2 Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung für weitere Anwendungen

In Mengen in Baden-Württemberg wird ein WWS mit VWD der Firma Sirch mit einem Speichervolumen von ca. 60,6 m³ als Pufferspeicher für eine Biogasanlage zur Holz Trocknung sowie zur Wärmeversorgung des Betriebs und eines Einfamilienhauses eingesetzt. Dieser Speicher konnte allerdings nicht bzgl. seiner Wärmeverluste messtechnisch untersucht werden, vgl. auch Abschnitt 1.3. Dies lag zum einen an der hierfür unzureichenden installierten Messtechnik durch den Betreiber. Zum anderen konnte kein Auskühlungsversuch zur Bestimmung der Wärmeverluste aufgrund der Notwendigkeit eines kontinuierlichen Betriebs der Anlage durchgeführt werden.

Für die Anwendung in einem solarunterstützten **Nahwärmenetz** wurde bereits im Vorgängerprojekt StoEx eine Simulationsstudie mit TRNSYS durchgeführt [Ger 2016]. Bei einem Gesamtwärmebedarf des Netzes von 1.200 MWh/a ergab sich dabei eine Einsparung an fossiler Heizenergie von 14.122 kWh/a bei einer um den Faktor 5 geringeren Wärmeverlustrate der VWD im Vergleich zur KWD.

Um die Eignung der Speicherbaureihe für **Prozesswärmeanwendungen** zu untersuchen, wurden mehr als 40 Unternehmen aus unterschiedlichen Branchen wie z. B. Wäschereien und Brauereien im Hinblick auf die Bereitstellung geeigneter Messdaten kontaktiert. Leider konnte keine Unternehmen gefunden werden, welches entsprechende Messdaten zur Wärmeerzeugung und Wärmelast in der notwendigen zeitlichen Auflösung zur Verfügung stellen konnte. In der Literatur verfügbare repräsentative Lastdatensätze wie z. B. aus der SHC Task 64 verfügen mit Tageswerten über eine zu grobe zeitliche Auflösung für die hier durchzuführenden Betrachtungen.

Aufgrund der verfügbaren und zeitlich hoch aufgelösten Messdaten des Pilotspeichers Neumarkt wurde daher auf die Verwendung der gering aufgelösten Daten zu Gunsten einer allgemeineren Betrachtung verzichtet.

Die entscheidende Größe, die sich bei unterschiedlichen Anwendungen bzgl. der Wärmeverluste ändert, ist die zeitlich gemittelte Speichertemperatur und damit die mittlere Temperaturdifferenz zwischen Speicher- und Umgebungstemperatur. Je größer diese Differenz ist, desto höher sind die Wärmeverluste und desto größer ist der Nutzen einer Vakuumwärmedämmung. Um den Einfluss dieser Temperaturdifferenz auf die Amortisationszeiten einer VWD abzuschätzen, wurde das oben beschriebene Simulationsmodell für den Pilotspeicher in Neumarkt verwendet. Hierbei wurden die Lastdaten angepasst, um unterschiedliche mittlere Temperaturdifferenzen des Speichers zur Umgebung $\Delta T_{Sp,amb}$ [K] simulativ abbilden zu können. $\Delta T_{Sp,amb} = 69$ K entspricht z. B. ca. einer mittleren Speichertemperatur von 80 °C bei einer mittleren Umgebungstemperatur von 11 °C. Dieses Szenario ist beispielsweise bei der Nutzung des WWS als Pufferspeicher in einer Brauerei und bei einer Außenaufstellung realistisch [Bei 2013].

Für eine einfache Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden zunächst die Mehrkosten einer VWD gegenüber einer KWD eines WWS berechnet. Dafür werden exemplarisch die Speicherpreise

für einen WWS mit 60,6 m³ Speichervolumen und VWD sowie für einen WWS mit dem gleichen Speichervolumen und KWD der Firma Sirch herangezogen. Der 60,6 m³-WWS mit KWD wird von der Firma Sirch derzeit zu ca. 59.000 € angeboten, ein WWS mit der gleichen Größe und VWD für ca. 90.000 €. Es ergibt sich hierbei also eine Differenz von 31.000 €, die den Zusatzkosten einer Vakuumwärmedämmung entspricht.

Die Wirtschaftlichkeit der Speichertechnologie hängt zudem insbesondere von den Kosten der Energie ab, die für die Wärmebereitstellung aufgewendet werden muss. Diese Kosten sind allerdings nur mit sehr hohen Unsicherheiten für die Zukunft zu prognostizieren und hängen auch davon ab, ob günstige Großhandelspreise erhältlich sind oder nicht.

In Abbildung 6-1 sind daher die Amortisationszeiten in Jahren für Temperaturdifferenzen $\Delta T_{Sp,amb}$ von 40 K, 50 K, 59 K und 69 K aufgetragen über dem Wärmepreis zur Beheizung des Speichers in €/kWh. Zudem sind die entsprechenden Regressionskurven inkl. der dazugehörigen Gleichungen dargestellt. Damit lassen sich die Amortisationszeiten in Abhängigkeit von den Wärmepreisen für die unterschiedlichen Temperaturdifferenzen $\Delta T_{Sp,amb}$ berechnen. In den Gleichungen entspricht „y“ der Amortisationszeit in Jahren und für „x“ ist der Wärmepreis in €/kWh einzusetzen.

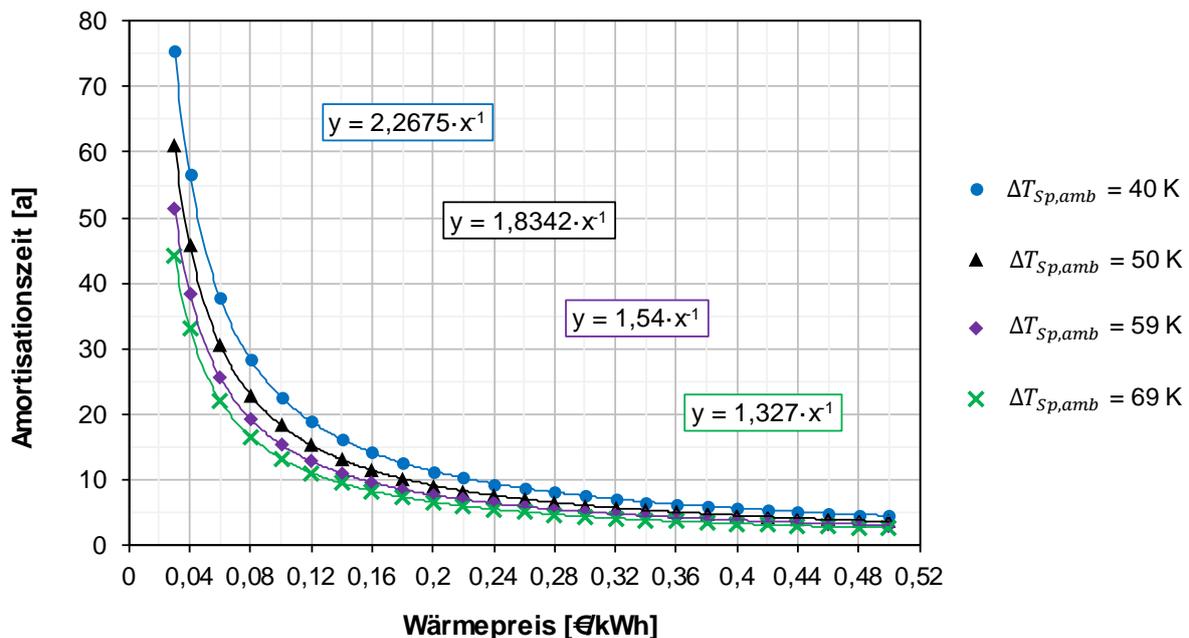


Abbildung 6-1: Amortisationszeiten einer Vakuumwärmedämmung (VWD) für einen 60 m³ Warmwasserspeicher (WWS) in Abhängigkeit vom Wärmepreis für unterschiedliche, über das Jahr gemittelte Temperaturdifferenzen zwischen Speicher- und Umgebungstemperatur $\Delta T_{Sp,amb}$.

In Abbildung 6-1 ist beispielsweise erkennbar, dass sich die Mehrkosten einer Vakuumwärmedämmung gegenüber einer konventionellen Wärmedämmung bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T_{Sp,amb} = 50$ K und einem Wärmepreis von 12 ct./kWh nach ca. 15 a amortisieren. Bei einer Temperaturdifferenz von $\Delta T_{Sp,amb} = 69$ K kann bereits bei einem Wärmepreis von ca. 9 ct./kWh die gleiche Amortisationszeit erreicht werden. Als Speichernutzungsdauer können

erfahrungsgemäß mindestens 50 a angesetzt werden. In den oben beschriebenen Szenarien kann also von einer Wirtschaftlichkeit der Vakuumwärmedämmung ausgegangen werden. Für sehr geringe Wärmepreise von ≤ 4 ct./kWh ist eine VWD nach Abbildung 6-1 wiederum nur für hohe Temperaturdifferenzen $\Delta T_{Sp,amb}$ wirtschaftlich. Bei einer Stromdirektheizung mit Wärmekosten von 0,3 €/kWh würde sich eine Vakuumwärmedämmung bei Temperaturdifferenzen $\Delta T_{Sp,amb}$ zwischen 40 K und 69 K bereits nach 4,4 a bis 7,6 a amortisieren.

6.3 Anpassung der Speichertechnologie für Temperaturen > 110 °C

Bei Speichern für den bestimmungsgemäßen Betrieb mit Temperaturen von mehr als 110 °C kommt Artikel 4 der Druckgeräterichtlinie⁵ zur Anwendung. Der hieraus resultierende administrative und finanzielle Aufwand ist für die Firma Sirch so groß, dass die Fertigung von Speichern für derartige Anwendungen unattraktiv ist. Daher erfolgten für diese Anwendungen im Projekt StoEx2 keine weiteren Untersuchungen; siehe auch Abschnitt 1.3.

Die Fragestellung der **Entspannungsverdampfung** kann allerdings bei einer Havarie des Speichers auch für Temperaturen < 110 °C von Relevanz sein. Daher wurden hierzu die folgenden Recherchen und Analysen durchgeführt.

Im Hinblick auf die Beschaffung geeigneter Vakuumbrecher bei einer Entspannungsverdampfung durch eine unkontrollierte Entleerung des Speichermediums, beispielsweise aufgrund einer Havarie, wurden Anfragen bei entsprechenden Herstellern durchgeführt. Allerdings konnte für dieses Ereignis kein geeignetes Produkt gefunden werden. Aus festigkeitstechnischer Sicht sollte eine mögliche Entspannungsverdampfung aber bei dieser Speicherbauart kein Problem darstellen. Dies ist in dem durch die VWD nur sehr geringen Druck von < 10 mbar begründet, der auf die Außenseite der inneren Speicherwand wirkt. Dadurch ist der Druck im Speicher zu jeder Zeit größer als in der VWD - auch während einer Entspannungsverdampfung. Für ein Kollabieren der inneren Speicherwand müsste hier der Druck geringer sein als im Dämmraum. Bei konventionellen Speichern, bei welchen auf die Außenseite der Speicherwand der Umgebungsdruck einwirkt, kann ein solches Kollabieren stattfinden, sollte der Druck im Inneren des Behälters durch eine Entspannungsverdampfung oder sonstige Sogwirkungen deutlich unter den von außen wirkenden Umgebungsdruck absinken.

⁵ Richtlinie 2014/68/EU

7. Installation und Fertigung Pilotspeicher (AP6)

Zur Durchführung der messtechnischen Untersuchung der neu entwickelten Technologien für die Realisierung großvolumiger außenaufgestellter Warmwasserspeicher im realen Betrieb wurden 2 Pilotspeicher von der Firma Sirch gefertigt. Während der Fertigung wurden vom IGTE begleitende Untersuchungen hinsichtlich der Wärmedämmung durchgeführt. Diese sind aufgrund der thematischen Nähe in Abschnitt 4 (AP 3: „Optimierung des Herstellungsprozesses“) detailliert beschrieben.

In den Abschnitten 7.1 und 7.2 sind die Fertigung und die Installation des ersten und zweiten Pilotspeichers beschrieben.

7.1 Pilotspeicher 1

Der erste Pilotspeicher wurde von der Firma Sirch für die Wärmeversorgungsanlage im Schloss-bad in Neumarkt i. d. Oberpfalz gefertigt (siehe Abbildung 7-1) und dort auf der Liegewiese aufgestellt (siehe Abbildung 8-1). Der Speicher verfügt über ein Speichervolumen von 60,6 m³ und dessen Dämmraum wurde mit dem schüttfähigen Wärmedämmstoff Technoperl C1,5 befüllt und bei der Firma Sirch zunächst auf einen Gasdruck von ca. 53 mbar im Dämmraum evakuiert. Nach der Aufstellung wurde der Dämmraum vor Ort weiter auf einen Druck von unter 1 mbar evakuiert.



Abbildung 7-1: Fertigung des äußeren Speicherbehälters und des Fußrings von Pilotspeicher 1

Die Stadtwerke Neumarkt benötigen als Betreiber bereits die Messung der Temperaturen in unterschiedlichen Höhen des Speichers. Eine separate messtechnische Erfassung durch das IGTE hätte die zusätzliche Installation von mind. 12 Temperaturfühlern und damit einen erheblichen konstruktiven Mehraufwand erfordert. Die Messdatenerfassung wurde deshalb vom Betreiber, also den Stadtwerken Neumarkt, selbst durchgeführt. Die Fühler zur Messung der Temperaturen im Speicherinnenraum wurden bereits bei der Firma Sirch mittels zweier Tauchhülsen installiert. Die Messdaten wurden dann dem IGTE zur Verfügung gestellt. In Absprache zwischen Betreiber und Projektpartnern wurden folgende Sensoren für die messtechnische Untersuchung geplant:

- 12 Fühler zur Messung der Temperaturen im Wasserraum des Speichers, verteilt über die gesamte Höhe. Der Abstand der Temperaturfühler beträgt dabei in der Regel ca. 0,75 m (siehe Abbildung 8-6 in Kapitel 8).
- 5 Fühler zur Messung der Temperaturen an der äußeren Speicheroberfläche an unterschiedlichen Positionen im unteren Speicherbereich (hier konnte innerhalb der Projektlaufzeit nur der Anschluss von 2 Temperaturfühlern realisiert werden, siehe Abbildung 8-2).
- 1 Fühler zur Messung der Temperatur auf der Außenseite der Entlüftungsleitung.
- 2 Volumenstrommessgeräte zur Bestimmung der ein- und austretenden Volumenströme.
- Jeweils 1 Temperaturfühler in Vor- und Rücklauf des Speichers.
- 1 Temperaturfühler zur Messung der Umgebungslufttemperatur.
- 1 Einstrahlungssensor zur Messung der Globalstrahlung in horizontaler Ebene.

Das Messintervall betrug für alle Größen 3 Minuten. Die messtechnische Untersuchung des ersten Pilotspeichers sowie die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Abschnitt 8.1 detailliert beschrieben.

7.2 Pilotspeicher 2

Aufgrund ungünstiger äußerer Umstände konnte die Installation des zweiten Pilotspeichers für den realen Betrieb nicht abgeschlossen werden (siehe Abschnitt 1.3.6). Dieser Speicher wurde aber ebenfalls durch die Firma Sirch gefertigt und vor Ort aufgestellt (siehe Abbildung 7-2) und die Vorbereitung der zu installierenden Messtechnik abgeschlossen. Wichtige Aspekte der Fertigung sind daher im Folgenden kurz beschrieben. Die detaillierte Beschreibung derjenigen Aspekte, welche die Vakuumwärmedämmung betreffen sowie der daraus resultierenden Ergebnisse ist in Zusammenhang mit AP 3 in Abschnitt 4 erfolgt.

Der zweite gefertigte Pilotspeicher hat ein Speichervolumen von 7,9 m³. Er verfügt über mehrere Anschlüsse für den Betrieb mit einer aktiven thermischen Schichtbeladungseinrichtung. Die Aufstellung des Speichers erfolgte in einem EFH, das weitgehend solar beheizt werden soll.

Während der Fertigung des zweiten Pilotspeichers wurden bereits einige Optimierungsmaßnahmen für den Herstellungsprozess erprobt. Zur Beschleunigung der Evakuierung wurde eine Vorevakuierung des leeren Dämmraums erprobt. Um den Aufwand der Dämmstoffbefüllung zu verringern, wurde eine axiale Einsaugung in den liegenden Speicher erprobt. Um Setzungen und Hohlraumbildungen im Wärmedämmstoff beim späteren Transport des Speichers zu vermeiden, wurde die Rüttelstärke der Rüttler, die bei der Befüllung eingesetzt werden, so eingestellt, dass die daraus resultierenden Beschleunigungen an der Speicheroberfläche die bei einer typischen LKW-Fahrt auftretenden Beschleunigungen übersteigen.

Für die Messung der Temperatur im Wasserraum des Speichers wurden 8 Temperaturfühler von der Firma Sirch bereits während der Fertigung des Speichers installiert. Insgesamt wurden folgende Messgeräte für die Untersuchung des Speichers vorgesehen:

- 8 Fühler zur Messung der Temperaturen im Wasserraum des Speichers über die gesamte Höhe. Der Abstand der Temperaturfühler beträgt dabei meist ca. 0,6 m.
- 5 Fühler zur Messung der Temperaturen an der äußeren Speicheroberfläche an unterschiedlichen Positionen im unteren Speicherbereich. Der Grund für die Messung der Temperaturen ausschließlich im unteren Bereich des Speichers ist der, dass aufgrund der Vakuumwärmedämmung die an den anderen äußeren Speicheroberflächen gemessenen Temperaturen nicht aussagekräftig wären.
- 5 Fühler zur Erfassung der Umgebungslufttemperatur in unterschiedlichen Speicherhöhen. Dies trägt der Umbauung des Speichers durch das Gebäude Rechnung. Die Gebäudeintegration kann dazu führen, dass die unterschiedlichen Speicherbereiche sehr unterschiedliche Umgebungstemperaturen aufweisen.
- 1 Drucksensor zur Messung des Gasdrucks im Dämmraum.



Abbildung 7-2: Zweiter gefertigter Pilotspeicher während der Einbringung (links) und am Aufstellungs-orts positioniert (rechts) in einem EFH in Kirchdorf an der Krems (Österreich).

Da die ursprünglich geplante messtechnische Untersuchung des Pilotspeichers in Kirchdorf aufgrund umfangreicher Verzögerungen und letztendlich eines Baustopps nicht möglich war (vgl. Abschnitt 1.3.6) wurde diese alternativ an einem baugleichen Speicher der Firma Sirch mit einem Speichervolumen von ca. 26 m³ durchgeführt, der seit 2016 im botanischen Garten in Augsburg in Betrieb ist (siehe Abbildung 8-9). Dieser Speicher wird in Kombination mit einem Hackschnitzelkessel als Pufferspeicher genutzt. Als schüttfähiger Wärmedämmstoff wurde auch hier Technoperl C1,5 verwendet. Der Speicher verfügt im Wasserraum über 5 Temperaturfühler, die über der gesamten Höhe angeordnet sind. Die genauen Positionen der

Temperaturfühler über der Höhe sind jedoch nicht bekannt. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass die Temperaturfühler gleichmäßig über der Höhe des Speichers verteilt sind. Dies entspricht der üblichen Vorgehensweise. Die Messdaten wurden vom Betreiber, d. h. den Stadtwerken Augsburg, zur Verfügung gestellt. Die messtechnische Untersuchung des zweiten Pilotspeichers sowie die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Abschnitt 8.2 beschrieben.

8. Prüfung und Demonstration (AP7)

Um die gefertigten Speicher unter realen Betriebsbedingungen zu prüfen sollten ursprünglich zwei Pilotspeicher installiert und messtechnisch untersucht werden.

Ein erster Pilotspeicher mit einem Speichervolumen von 60,6 m³ wurde im Frühjahr 2021 auf der Liegewiese des Freizeitbads „Schlossbad“ in Neumarkt i. d. Oberpfalz aufgestellt. Die messtechnische Untersuchung des Pilotspeichers „Neumarkt“ begann im November 2021. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 8.1 vorgestellt.

Für die Installation eines zweiten Pilotspeichers wurden umfangreiche Arbeiten und Planungen durchgeführt. Nach anfänglichen Zusagen mehrerer interessierter Betreiber und entsprechenden Planungen durch die Firma Sirch und das IGTE erfolgten diesbezüglich aber mehrmalig plötzliche und unvorhersehbare Absagen (siehe dazu auch Abschnitt 7 und Abschnitt 1.3.6). Dies führte sowohl zu einem gegenüber den ursprünglichen Planungen deutliche erhöhten Personalaufwand als auch zu signifikanten zeitlichen Verzögerungen.

Als zweiter Pilotspeicher wurde daher ein bereits im Jahr 2016 installierter Speicher im botanischen Garten in Augsburg verwendet. Die Ergebnisse der messtechnische Untersuchung des Pilotspeichers „Augsburg“ werden in Abschnitt 8.2 vorgestellt.

8.1 Pilotspeicher 1

Die Abbildung 8-1 zeigt den Pilotspeicher Neumarkt auf der Liegewiese des Schlossbads. Die Inbetriebnahme sowie der Beginn der messtechnischen Untersuchung erfolgten im November 2021. Eine kontinuierliche Nutzung, d. h. die regelmäßige Be- und Entladung, des Speichers findet erst seit dem 27.05.2022 statt. Der Speicher wird über nur zwei durch den Boden des Speichers geführte Anschlüsse, die den oberen und unteren Bereich des Wasserraum mit der Anlagenhydraulik verbinden, thermisch be- und entladen (siehe Abbildung 8-2). Für die Be- und Entladung des Speichers werden daher beide Anschlüsse in beiden Strömungsrichtungen durchströmt. Der Wasserraum hat eine Höhe von 8,8 m und einen Durchmesser von 3 m. Als Wärmequelle dienen zwei BHKWs mit einer thermischen Leistung von je 250 kW.



Abbildung 8-1: Pilotspeicher mit Vakuumschichten und einem Speichervolumen von 60,6 m³ aufgestellt auf der Liegewiese im neuen Schlossbad in Neumarkt i. d. Oberpfalz. Foto: Stadtwerke Neumarkt.

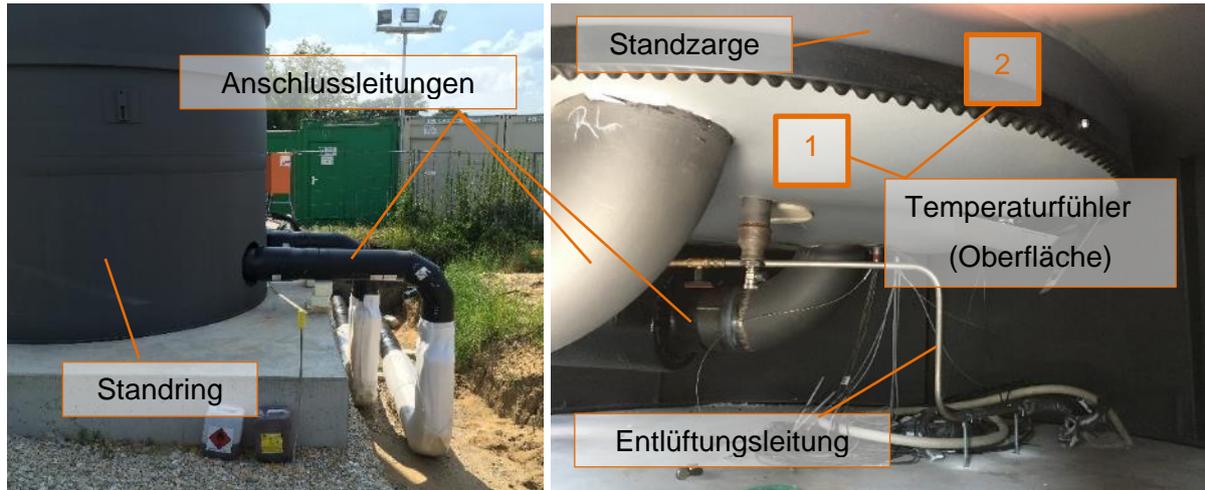


Abbildung 8-2: Links: Aufständering (Standring) und Anschlussleitungen, Rechts: Innenbereich des Standrings mit Temperaturfühler unterhalb der Wärmedämmung bzw. am äußeren Innenmantel (1) und auf der Innenseite der Standzarge (2, vgl. „1“ in Abbildung 2-1 Mitte) sowie Anschluss- und Entlüftungsleitungen des Speichers.

Zur Untersuchung des thermischen Verhaltens des Speichers werden sowohl die Volumenströme und die Temperaturen bei der Be- und Entladung des Speichers sowie die Speichertemperaturen im Inneren des Speichers und an unterschiedlichen Positionen der Aufständering und im Bodenbereich messtechnisch erfasst. Einige der Messpositionen sind in Abbildung 8-2 dargestellt. Das Messintervall beträgt einheitlich 3 Minuten.

Zur Untersuchung der Frostsicherheit wurden im Rahmen des Demonstrationsbetriebs einige Oberflächentemperaturen im unteren Speicherbereich gemessen. Die Ergebnisse sind in Abschnitt 2.2 dargestellt und beschrieben.

8.1.1 Wärmeverluste

Abkühlversuch (AKV) 1

Ende November 2021 wurde ein erster AKV zur genauen Bestimmung der Wärmeverluste bzw. der Wärmeverlustrate durchgeführt. Dabei wird der Speicher nach einer initialen Beladung für einen längeren Zeitraum weder aktiv be- noch entladen. Aus der Temperaturänderung im Speichermedium wird dann die Änderung der inneren Energie im Speicher und damit auch die vom Speicher an die Umgebung abgegebene Wärmemenge bestimmt. Eine Ermittlung der Wärmeverluste während des regulären Betriebs des Speichers ist insbesondere aufgrund der relativ hohen Messunsicherheit bei der Bestimmung der zu- und abgeführten Energieströme im Verhältnis zu den erwarteten Wärmeverlusten nicht sinnvoll möglich.

Die Durchführung des AKV war vor allem aufgrund der engen Zusammenarbeit mit den Stadtwerken Neumarkt und deren Partnern sowie deren hohem Interesse an der installierten Speichertechnologie möglich. Der Speicher wurde während der Zeit der Versuchsdurchführung noch nicht für die Wärmeversorgung bzw. den Betrieb in Kombination mit den beiden BHKWs genutzt.

Der Verlauf der Temperaturen im Speicher während des ersten AKV im Dezember 2021 ist in Abbildung 8-3 dargestellt. Die Temperaturfühler sind meist in äquidistanten Abständen von

0,85 m über die Höhe des Speichers angeordnet. Der unterste Temperaturfühler ist etwa auf der Höhe des Bodens und der oberste Temperaturfühler etwa auf der Höhe des Deckels des inneren Speicherbehälters positioniert. Über den betrachteten Zeitraum von einem Monat zeigt sich eine mittlere Abnahme der Temperatur von ca. 9 K. Dies entspricht einer Abnahme der Temperatur um ca. 0,3 K pro Tag. Dabei beträgt die zeitlich und örtlich gemittelte Temperatur im Speicher im Dezember 2021 ca. 70,5 °C und die mittlere Außen- bzw. Umgebungstemperatur ca. 4 °C. Das entspricht einer mittleren Temperaturdifferenz von ca. 66,5 K zwischen Speicherwasser- und Umgebungstemperatur. Für den betrachteten Zeitraum im Dezember 2021 ergibt sich für den oberen Teil des Speichers mit einem anteiligen Volumen von ca. 85 % eine mittlere Wärmeverlustrate von ca. 12 W/K am Speichermantel und Speicherdeckel.

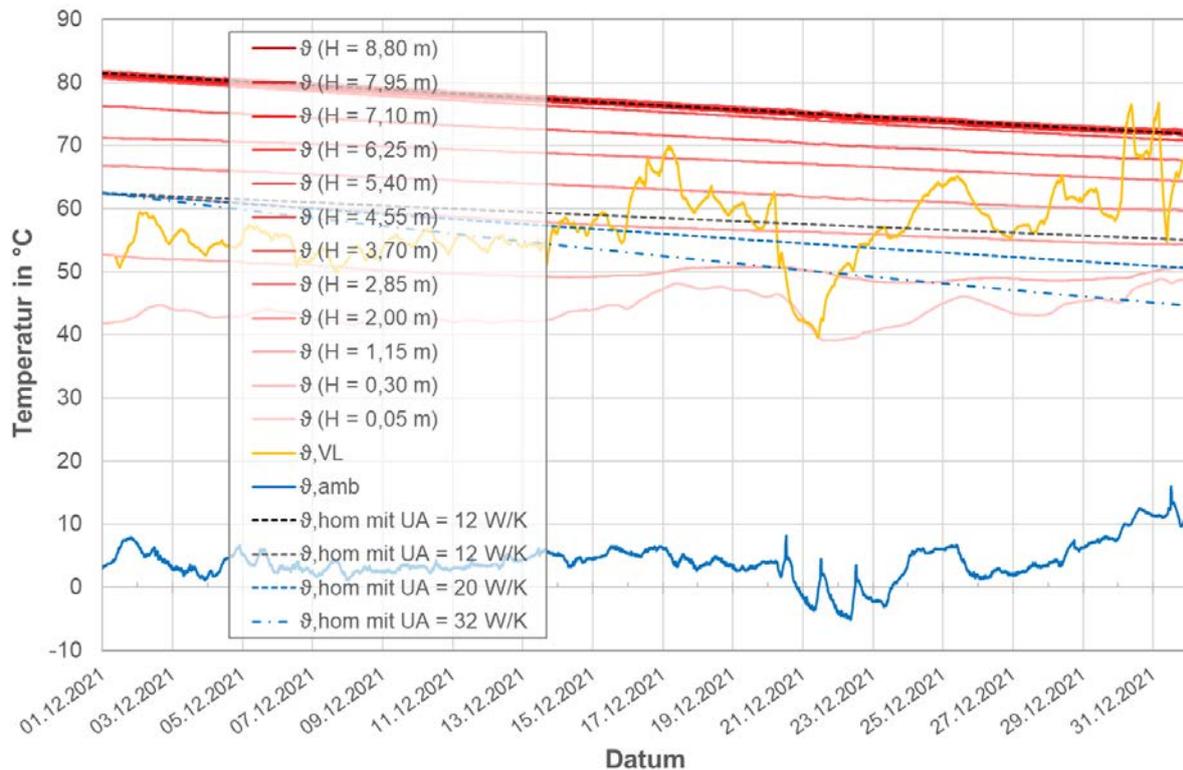


Abbildung 8-3: Speicherinnentemperaturen in unterschiedlichen Speicherhöhen im Wasserraum (Gesamthöhe 8,8 m) sowie die Umgebungs- und Vorlauftemperatur und die berechnete Speichertemperatur während der Abkühlung eines vollständig durchmischten Speichers (ϑ_{hom}) bei unterschiedlichen Wärmeverlustraten (UA) in W/K.

Im unteren Speicherbereich ist in Abbildung 8-3 zu bestimmten Zeiten ein Temperaturanstieg zu beobachten, obwohl der Speicher zu keiner Zeit aktiv be- oder entladen wird. Diese Anstiege der Temperatur kommen durch eine sogenannte Einrohrzirkulation zustande. Durch die unterhalb des Speichers befindliche Wärmeversorgungsanlage (vgl. Heizzentrale in Abb. 8-1) kommt es in der tiefer liegenden Verrohrung der Speichervorlauf- und Speicherrücklaufleitung zu Temperaturen, die höher sind als die Temperatur im unteren Speicherbereich (ϑ_{VL} in Abbildung 8-3). Durch die höhere Dichte des kälteren Wassers im unteren Bereich des Speichers sinkt das Speicherwasser aus diesem Bereich in der Rohrleitung ab und wärmeres Wasser mit geringerer Dichte steigt in einem anderen Bereich der gleichen Rohrleitung auf. Das in der Rohrleitung aufgestiegene Wasser wird dann von kälterem Wasser im Speicher abgekühlt und

sinkt wieder in der Rohrleitung ab. Durch diesen Effekt findet ein Wärmeeintrag in den unteren Bereich des Speichers statt. Aufgrund der hohen Temperaturen im oberen Teil des Speichers bleibt dieser Effekt aber fast ausschließlich auf den untersten Speicherbereich und damit das sogenannte Totvolumen mit einem relativ geringen Wasservolumen von ca. 3.000 Litern beschränkt. Die durch diesen Effekt tatsächlich in den Speicher eingetragene Wärmemenge lässt sich in-situ messtechnisch nicht quantifizieren. Der Einfluss der Wärmedämmung im unteren Speicherbereich wurde in [Ull 2021] an einem baugleichen Speicher im Labormaßstab mit einem Volumen von 1,5 m³ untersucht. Auf Basis dieser Ergebnisse wurde ein vereinfachtes Modell zur Berechnung der Wärmeverluste erstellt. Anhand dieses Modells konnte der Anteil der Wärmeverluste des Bodenbereichs an den gesamten Wärmeverlusten für den Laborspeicher auf ca. die Hälfte bestimmt werden. Für den hier untersuchten Speicher mit einem Volumen von 60,6 m³ ergibt sich auf Basis des vereinfachten Modells ein Anteil der Wärmeverluste des Bodenbereichs bei guter Wärmedämmung von ca. 15 %. Der geringere Anteil der Wärmeverluste des Bodenbereiches beim großvolumigeren Speicher ist dadurch begründet, dass die Größe der notwendigen Revisionsöffnung und damit der Standzarge, die zusammen hauptsächlich für die Wärmeverluste im unteren Speicherbereich verantwortlich sind, nicht proportional mit dem Speichervolumen bzw. der Speicheroberfläche ansteigt.

Für die Abschätzung der gesamten Wärmeverlustrate wurde der untere Speicherbereich genauer untersucht. Während der ersten Dezemberhälfte ist die Temperatur auf der Höhe von $H = 1,15$ m zu jeder Zeit größer als die Temperatur im Vorlauf (ϑ_{VL} linker Bereich in Abbildung 8-3 vom 01.12.2021 bis 13.12.2021) und es findet daher auch kein Wärmeeintrag durch Einrohrkonvektion in diesen Speicherbereich statt. Der Temperaturverlauf auf der Höhe 1,15 m zeigt dabei während dieses Zeitraums eine gute Übereinstimmung mit dem berechneten Temperaturverlauf für einen homogen durchmischten Speicher mit einer Wärmeverlustrate von 20 W/K. Die tatsächlichen Wärmeverluste des Speicherbereichs im Höhenbereich von $H = 0,3$ bis 1,15 m wären aber ohne Wärmeeintrag in diesen Bereich größer. Der Wärmestrom aus dem Speicherbereich von $H = 0,3$ bis 1,15 m in den Speicherbereich unterhalb einer Höhe von $H = 0,3$ m würde sich dadurch vergrößern und die Temperatur bei $H = 1,15$ m würde sich schneller verringern. Eine Wärmeverlustrate von 20 W/K stellt damit eine Abschätzung für die minimalen Wärmeverluste des Bodenbereichs dar. Damit lässt sich eine Abschätzung der minimalen Wärmeverlustrate des gesamten Speichers vornehmen. Diese setzt sich als Summe der volumengewichteten Wärmeverlustrate für den Mantel- und Deckelbereich sowie der volumengewichteten Wärmeverlustrate für den Bodenbereich zusammen. Dabei beträgt die volumengewichtete Wärmeverlustrate für den Mantel- und Deckelbereich 10,2 W/K (85 % Volumenanteil mit 12 W/K), die des Bodenbereichs 3 W/K (15 % Volumenanteil mit 20 W/K). Daraus ergibt sich eine Wärmeverlustrate des gesamten Speichers von 13,2 W/K. Die Aufteilung der Wärmeverluste zwischen Speichermantel und -boden entspricht dabei mit ca. 23 % in etwa den Ergebnissen, die anhand der Untersuchungen in [Ull 2021] ermittelt wurden.

Eine Abschätzung der maximalen Wärmeverlustrate kann mittels einer sehr hoch gewählten Wärmeverlustrate für den Bodenbereich vorgenommen werden. Wird hierfür ein Wert von 32 W/K (vgl. Abbildung 8-3) für den Bodenbereich, auf den 15 % des Volumens entfallen, gewählt, ergibt sich eine Wärmeverlustrate von 15 W/K für den gesamten Speicher. Der Anteil

der Wärmeverlustrate von 4,8 W/K für den Bodenbereich an der Wärmeverlustrate des gesamten Speichers würde dann ca. 1/3 betragen. Im Vergleich zu der in [Ger 2016] ermittelten Wärmeverlustrate von ca. 4 W/K für den Bodenbereich eines ähnlich aufgebauten Funktionsmusters mit 12 m³ Speichervolumen (Abbildung 2-1, links) wird die hier abgeschätzte Wärmeverlustrate von 15 W/K daher als plausibel betrachtet.

Die Wärmeverlustrate kann daher, trotz des nicht zu ermittelnden Wärmeeintrags in den unteren Speicherbereich, für den gesamten Speicher mit < 15 W/K abgeschätzt werden. Dabei ist die geringfügig größere Wärmeverlustrate im unteren Speicherbereich während des realen Speicherbetriebs aufgrund der dort herrschenden geringeren Temperaturen von untergeordneter Relevanz.

Abkühlversuch (AKV) 2

Am 17.01.2022 wurde der Speicher zur Durchführung eines zweiten AKV erneut vollständig beladen. Die Temperaturen über der Speicherhöhe sowie die Ein- und Austrittstemperaturen und der Volumenstrom während der Beladung sind in Abbildung 8-4 dargestellt. Der Speicher wurde hierbei vollständig auf eine Temperatur von 90 °C aufgeheizt. Die geringeren Temperaturen bis auf eine Höhe von 0,3 m sind auf ein entsprechendes Totvolumen von ca. 5 % bzw. 3.000 Liter im unteren Speicherbereich zurückzuführen. Für den thermisch weitgehend vollständig beladenen Speicher ergibt sich eine volumengewichtete, mittlere Speichertemperatur von 89,5 °C.

Die Speicherinnentemperaturen über den Verlauf des zweiten AKV (Zeitraum 6 Wochen vom 18.01.2022 ist zum 01.03.2022) sind in Abbildung 8-5 dargestellt. Auch hier tritt im unteren Speicherbereich ein geringer Wärmeeintrag auf. Der Wärmeeintrag beschränkt sich aber auch hier weitgehend auf den Bereich des Totvolumens. Analog zum ersten AKV ergibt sich auch hier für den gesamten Speicher eine Wärmeverlustrate von 12 - 15 W/K. Dabei beträgt die mittlere Speichertemperatur 79,9 °C und die mittlere Umgebungstemperatur 2,8 °C.

Die sich aus den Abkühlversuchen ergebende Wärmeverlustrate von ca. 12-15 W/K ist im Vergleich zu anderen Speichern vergleichbarer Größe sehr gering. Andere Speicher ähnlicher Größenordnung mit einer konventionellen Wärmedämmung weisen teils eine um den Faktor 2 bis 8 größere Wärmeverlustrate auf [Ein 2015] [Urb 2018].

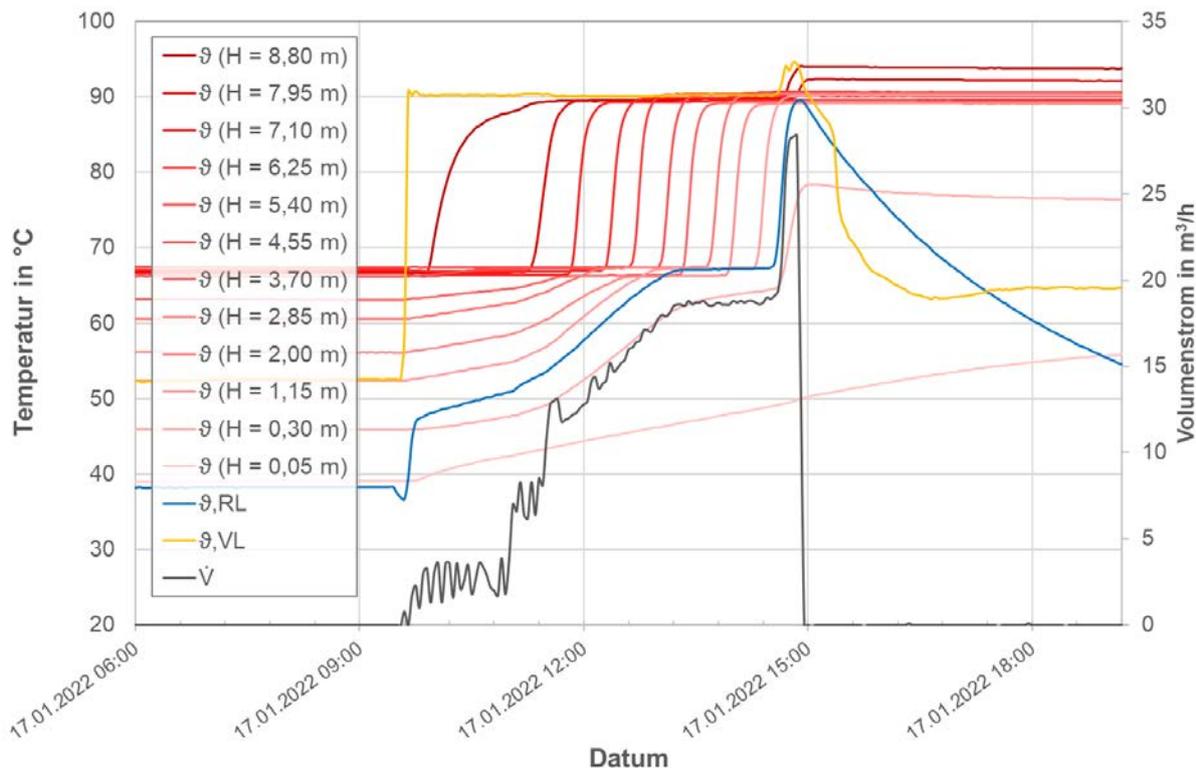


Abbildung 8-4: Speicherinnentemperaturen in unterschiedlichen Speicherhöhen sowie Vor- und Rücklauftemperatur und Volumenstrom während der Beladung am 17.01.2022.

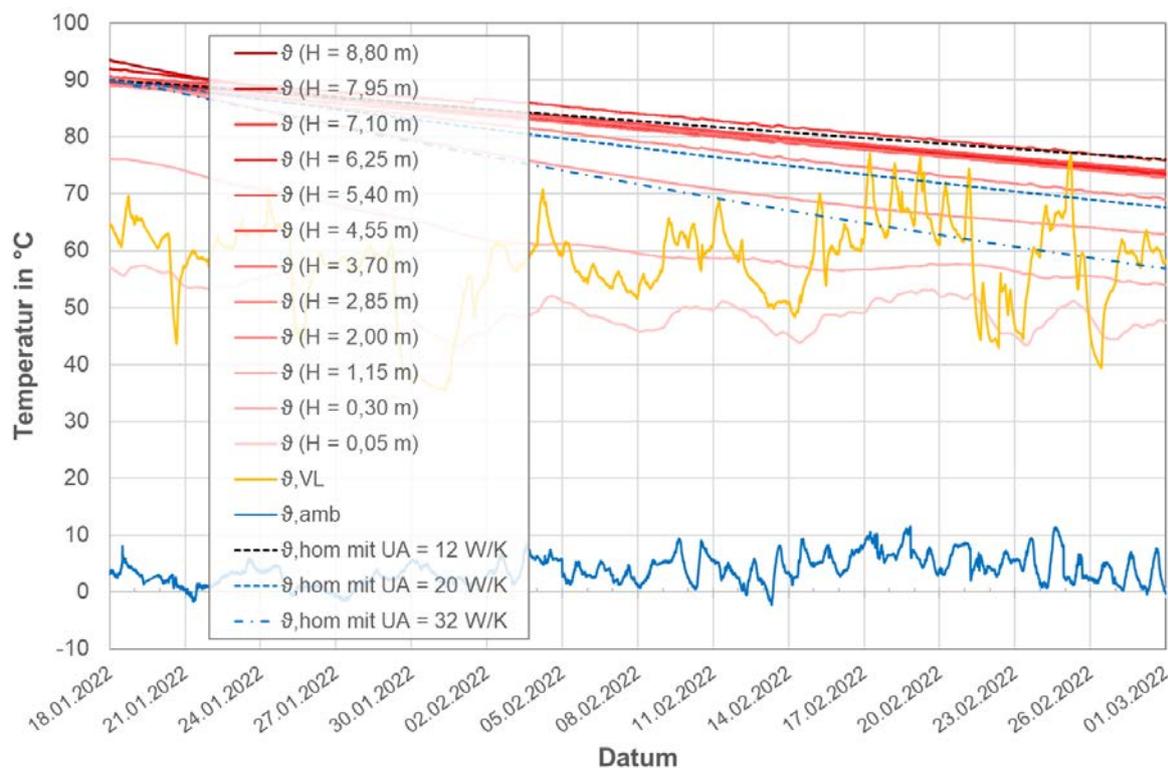


Abbildung 8-5: Speicherinnentemperaturen in unterschiedlichen Speicherhöhen im Wasserraum (Gesamthöhe 8,8 m) sowie die Umgebungs- und Vorlauftemperatur (θ,VL) und die berechnete Speichertemperatur während der Abkühlung eines vollständig durchmischten Speichers (θ,hom) bei unterschiedlichen Wärmeverlustraten (UA) in W/K.

8.1.2 Speichernutzungsgrad

Für den Zeitraum vom 27.05.2022 bis zum 04.12.2022 wurde der Nutzungsgrad des Speichers bestimmt. Dabei wurden 2 unterschiedliche Ansätze verglichen. Beim ersten Ansatz wurde der Speichernutzungsgrad als Quotient der gesamten entnommenen Wärmemenge und der gesamten zugeführten Wärmemenge bestimmt. Bei diesem Ansatz ergibt sich ein Speichernutzungsgrad von ca. 90 %. Aufgrund des relativ großen Messintervalls von 3 Minuten bei stark schwankenden Volumenströmen sind die zu- und abgeführten Wärmemengen aber mit einer vergleichsweise großen Messunsicherheit behaftet. So ergeben sich für die Jahre 2023 und 2024 analog Speichernutzungsgrade von 88,6 % und 88,5 % bei relativen Messfehlern⁶ von ca. 6 %. Es wird davon ausgegangen, dass der Messfehler hier vor allem auf die abgeführte Wärmemenge zurückzuführen ist, da der Volumenstrom besonders bei der Entladung teils sehr starke Schwankungen aufweist.

Daher wurde auch ein zweiter Ansatz zur Bestimmung des Speichernutzungsgrads verfolgt. Hierbei wird die abgeführte Wärmemenge berechnet als zugeführte Wärmemenge bzw. Beladewärmemenge abzüglich der Wärmeverluste des Speichers. Die Wärmeverluste wurden während der Abkühlversuche auf Basis der gemessenen Speichertemperaturen bestimmt, die deutlich geringere Schwankungen aufweisen sind als die Volumenströme. Der Speichernutzungsgrad ergibt sich beim zweiten Ansatz daher als Quotient aus der Beladewärmemenge abzüglich der Wärmeverluste im Zähler und der Beladewärmemenge im Nenner. Bei Verwendung des zweiten Ansatzes ergibt sich ein Speichernutzungsgrad von ca. 95 %. Aufgrund der oben beschriebene höheren Messunsicherheiten bei er Bestimmung der zu- und abgeführten Wärmemengen im Vergleich zur Bestimmung der Wärmeverluste ist der mittels des zweiten Ansatzes bestimmte Speichernutzungsgrad als der genauere und damit realistischere anzusehen. Der bestimmte Speichernutzungsgrad von 95 % stellt vor allem bei der mittleren herrschenden Temperaturdifferenz von 50 K zwischen Speicher und Umgebung einen sehr guten Wert dar.

8.1.3 Thermische Schichtung

Ausdehnung der Temperaturmischzone

In Abbildung 8-6 ist die thermische Schichtung im Wasserraum des Speichers über seiner Höhe und einen Zeitraum von 27 Tagen dargestellt. Der Zeitraum entspricht dem Zeitraum ab dem 01.12.2021 und somit dem in Abbildung 8-3 dargestellten. Der weitgehend lineare Temperaturverlauf der thermischen Schichtung über den Höhenbereich von 0 m bis 5 m im unteren Speicherbereich ist hier wahrscheinlich auf eine Beladung mit schwankender Vorlauftemperatur und schwankendem Volumenstrom, sowie auf daraus resultierende Vermischungsvorgänge zwischen dem bereits im Speicher befindlichen Wasser und dem bei der Beladung zugeführten Wasser zurückzuführen. Detaillierte Messdaten der Be- und Entladevolumenströme stehen für diese Beladung nicht zur Verfügung.

⁶ Differenz zwischen der be- und entladenen Wärmemenge bezogen auf die insgesamt umgesetzte Wärmemenge. Die Differenz zwischen be- und entladener Wärmemenge ist dabei ca. um den Faktor 5-6 größer als die Wärmeverluste des Speichers.

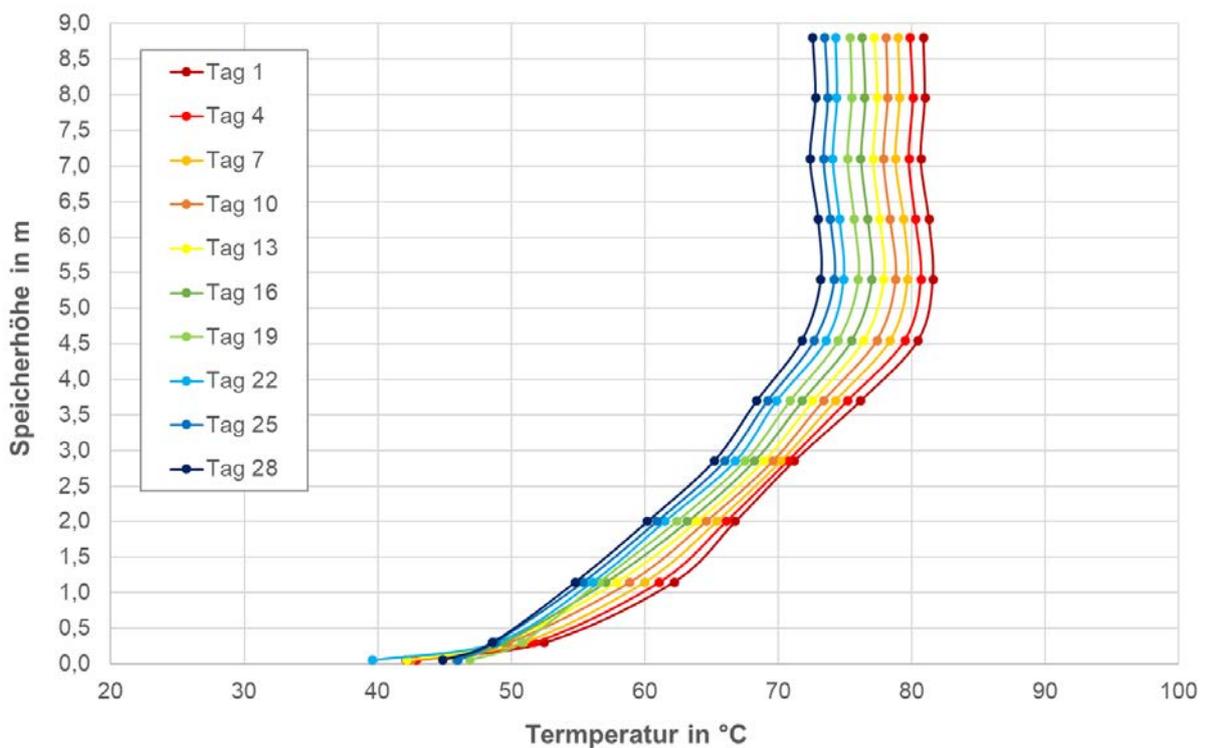


Abbildung 8-6: Thermische Schichtung auf Basis der Speicherinnentemperaturen in unterschiedlichen Speicherhöhen am 01.12.2021 (Tag 1) sowie 3 bis 27 Tage später.

In Abbildung 8-7 ist die thermische Schichtung des Speichers für einen Zeitraum von 27 Tagen, d. h. vom 18.01.2022 bis zum 14.02.2022 im Verlauf des 2. Abkühlversuchs dargestellt. Vor dem Beginn der Abkühlung bzw. der Stillstandszeit wurde der Speicher dadurch thermisch beladen, dass er von oben nach unten mit Wasser mit einer Temperatur von 90 °C durchströmt wurde, wie in Abbildung 8-4 dargestellt. Die Temperaturmischzone erstreckt sich an Tag 1 über eine Höhe von ca. 1 m und ist weitestgehend auf das Totvolumen im unteren Speicherbereich zurückzuführen. Die im Vergleich zum ersten AKV deutlich geringere Höhe der Temperaturmischzone (siehe Abbildung 8-6) ist auf die vollständige Beladung mit Wasser mit einer Temperatur von 90 °C und einem anfangs relativ geringen Beladevolumenstrom zurückzuführen. Die Temperaturmischzone breitet sich im Verlauf des dargestellten Zeitraums von ca. 4 Wochen um weniger als 2 m nach oben aus. Diese geringe Ausbreitung ist auf die wenigen Einbauten im Speicher und die damit verbundene geringe vertikale Wärmeleitfähigkeit zurückzuführen. Ursächlich für die Ausdehnung der Temperaturmischzone sind die Wärmeverluste im Bereich des Speicherbodens, die im Vergleich zum Mantel und Deckel des Speichers deutlich höher sind sowie die vertikale Wärmeleitung des inneren Speichermantels.

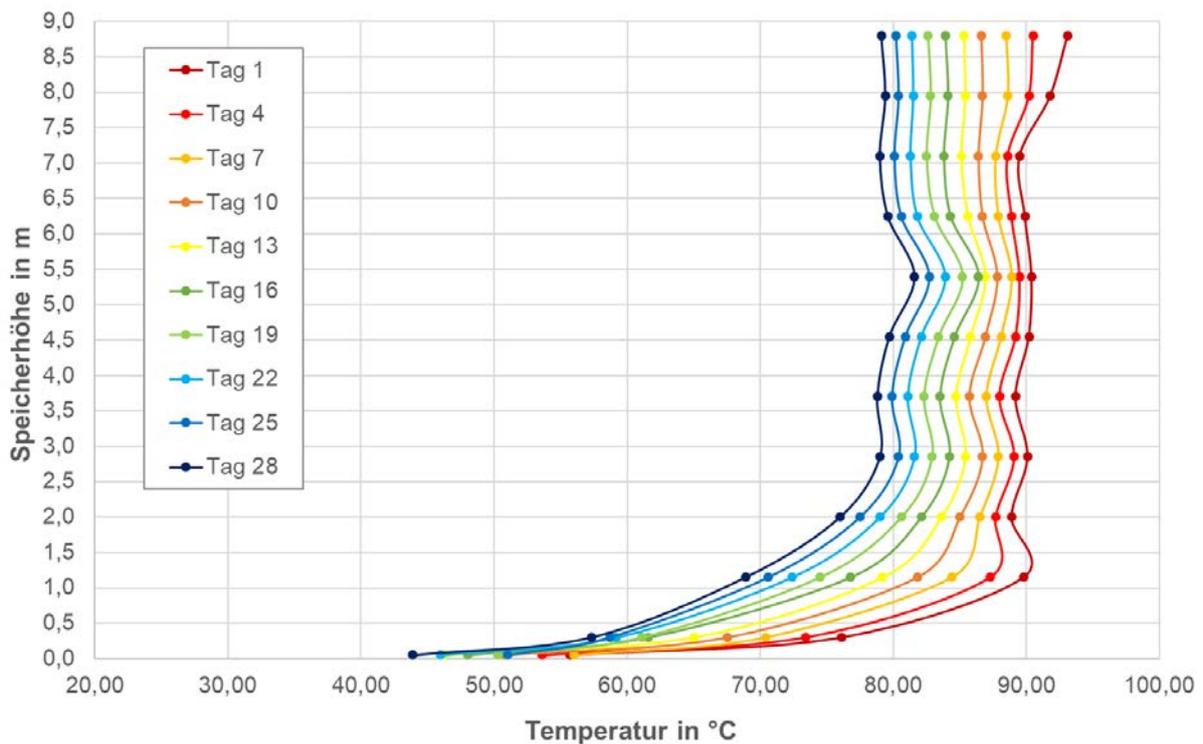


Abbildung 8-7: Thermische Schichtung auf Basis der Speicherinnentemperaturen in unterschiedlichen Speicherhöhen am 18.01.2022 (Tag 1) sowie 3 bis 27 Tage später.

Exergetische Betrachtung der thermischen Schichtung

Zur Beurteilung des thermischen Schichtungsverhaltens des Warmwasserspeichers wurde neben der Untersuchung der vertikalen Ausdehnung der Temperaturmischzone eine exergetische Betrachtung durchgeführt. Bei dieser exergetischen Betrachtung wird zusätzlich zum Energieinhalt des Speichers das bestehende Temperaturniveau und damit die Nutzbarkeit der Energiemenge innerhalb des Speichers betrachtet. Die hier verwendete Methode ermöglicht die Bestimmung einer Kennzahl zur Bewertung der thermischen Schichtung während des Speicherbetriebs und basiert auf der Bilanzierung der Entropieproduktion [Per 2015].

Bei dieser Kennzahl, der sogenannten Schichtungseffizienz (ζ_{Str}), wird die Entropieproduktion des Speichers während einer Prüfsequenz ($\Delta S_{irr,exp}$ [J/K]) mittels messtechnisch bestimmter Größen ins Verhältnis gesetzt zur Entropieproduktion des vollständig durchmischten Speichers ($\Delta S_{irr,mix}$ [J/K]). Dabei werden im Folgenden Ausschnitte aus dem realen Betrieb des Pilotspeichers in Neumarkt als Prüfsequenzen verwendet. Die Definition der Kennzahl für die Schichtungseffizienz ist in Gl. 8-1 dargestellt.

$$\zeta_{Str} = 1 - \frac{\Delta S_{irr,exp}}{\Delta S_{irr,mix}} \quad \text{Gl. 8-1}$$

Die Entropieproduktion aufgrund von Irreversibilitäten $\Delta S_{irr,i}$ [J/K] für den Speicher ergibt sich sowohl für die Prüfsequenz (i=exp) als auch für den durchmischten Speicher (i=mix) aus der Entropiebilanz nach Gl. 8-2:

$$\Delta S_{irr,i} = \Delta S_{ein,i} + \Delta S_{aus,i} + \Delta S_{Verlust,i} + \Delta S_{Speicher,i} \quad \text{Gl. 8-2}$$

Die ein- bzw. austretenden Entropiemengen des Speichers ergeben sich während der Prüfsequenz bzw. des realen Betriebs zu:

$$\Delta S_{ein \text{ bzw. } aus,exp} = m_{ein \text{ bzw. } aus} \cdot c_W \cdot \ln\left(\frac{T_{ein}}{T_{aus}}\right) \quad \text{Gl. 8-3}$$

Dabei ist T_{ein} [K] die Temperatur des in den Speicher eintretenden Fluids und T_{aus} [K] die Temperatur des aus dem Speicher austretenden Fluids. Die Masse des ein bzw. austretenden Fluids ist mit $m_{ein \text{ bzw. } aus}$ [kg] und dessen spezifische Wärmekapazität mit c_W [J/(kg K)] bezeichnet. Der obere Speicheranschluss stellt im Fall der Beladung den Eintritt und im Fall der Entladung den Austritt dar. Für den Referenzfall, d. h. den vollständig durchmischten Speicher wird in [Per 2015] davon ausgegangen, dass die zu- und abgeführten Energiemengen $Q_{ein \text{ bzw. } aus}$ [J] auf dem jeweils benötigten Temperaturniveau $T_{ein \text{ bzw. } aus,ref}$ [K] zur Verfügung gestellt werden müssen. Die Entropiemengen werden dann gemäß Gl. 8-4 berechnet zu:

$$\Delta S_{ein \text{ bzw. } aus,mix} = \frac{Q_{ein \text{ bzw. } aus}}{T_{ein \text{ bzw. } aus,ref}} \quad \text{Gl. 8-4}$$

Da im betrachteten Fall die Be- und Entladung während des Betriebs auf einem konstanten Temperaturniveau von ca. 92 °C stattfinden wird diese Temperatur als Referenztemperatur verwendet.

Für die Wärmeverluste des Speichers ergibt sich der Entropieverlust als Verhältnis von Wärmeverlust $Q_{Verlust,i}$ [J] und mittlerer gewichteter Speichertemperatur $T_{Speicher,mittel}$ [K] zu:

$$\Delta S_{Verlust,i} = \frac{Q_{Verlust,i}}{T_{Speicher,mittel,i}} \quad \text{Gl. 8-5}$$

In [Per 2015] sind an die Prüfsequenz bestimmte Anforderungen spezifiziert. Die Prüfsequenz soll u. a. repräsentativ für den Betrieb des Speichers sein und der Speicherzustand vor und nach der Prüfsequenz hinsichtlich der im Speicher enthaltenen Energie und Exergie möglichst identisch sein. Bei exaktem Erreichen des Ausgangszustands würde sich eine Entropieänderung innerhalb des Speichers von $\Delta S_{Speicher,i} = 0$ ergeben. Da eine kontrollierte Entladung bis zum Erreichen des Ausgangszustands während des Realbetriebs aber nicht erfolgt, wird die Entropieänderung im Speichermedium ggf. berechnet zu:

$$\Delta S_{Speicher,i} = m_{Speicher} \cdot c_W \cdot \ln\left(\frac{T_{Ende}}{T_{Anfang}}\right) \quad \text{Gl. 8-6}$$

m_{Speicher} [kg] bezeichnet dabei die Masse des Speichermediums, T_{Anfang} [K] und T_{Ende} [K] sind die Temperaturen im Speicher am Anfang und am Ende der Prüfsequenz.

Die Abbildung 8-8 stellt einen Zeitraum aus dem Betrieb des Pilotspeichers in Neumarkt dar, der im Folgenden beispielhaft als Prüfsequenz dient. Während dieser Zeit wird der Speicher zeitweise nur teilweise aber einmal vollständig von ca. 60 °C auf ca. 92 °C beladen und wieder auf ca. 60 °C entladen. Der Speicherzustand vor und nach dieser Betriebssequenz ist sehr ähnlich, die mittlere gewichtete Speichertemperatur am Ende der Prüfsequenz ist um ca. 1,5 K höher als am Anfang der Prüfsequenz. Für die betrachtete Prüfsequenz in Abbildung 8-8 ergibt sich die Kennzahl für die Schichtungseffizienz zu ca. 0,95 bzw. 95 %.

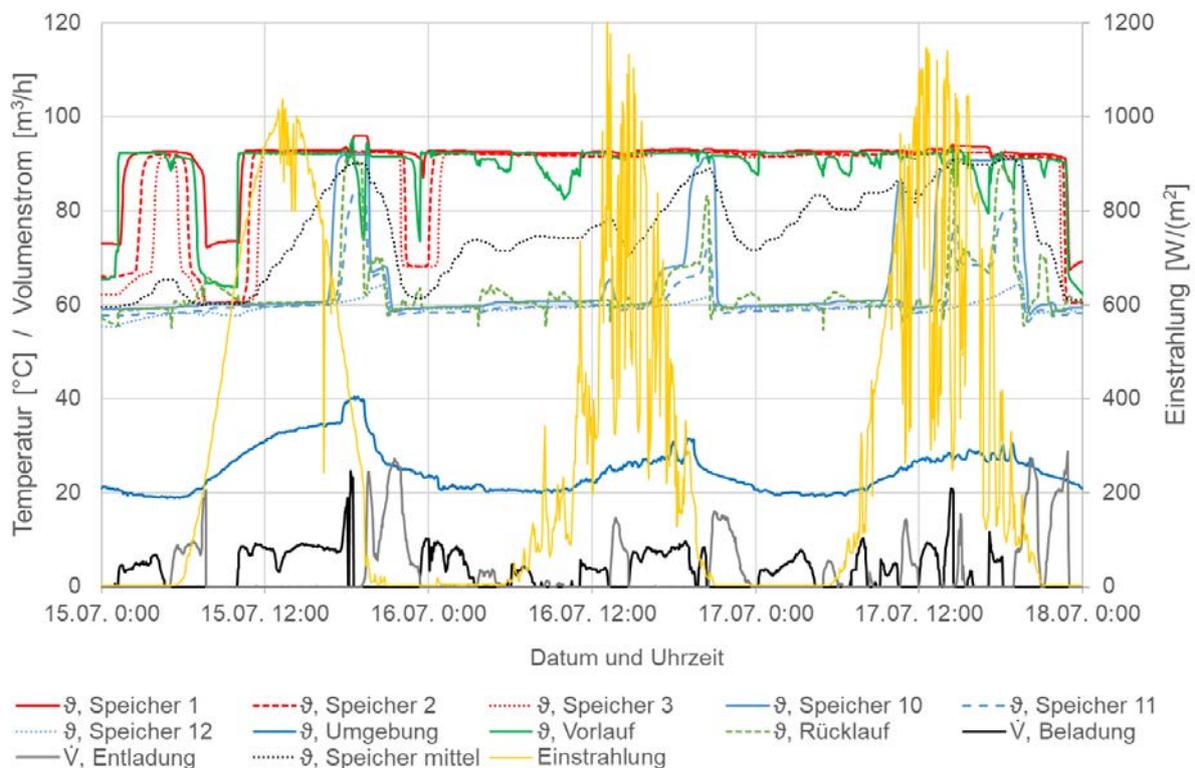


Abbildung 8-8: Temperaturen im Pilotspeicher „Neumarkt“ sowie Be- und Entladevolumenstrom und Einstrahlung während eines als „Prüfsequenz“ für die Schichtungseffizienz betrachteten Betriebszeitraums.

Zur Bewertung auch größerer und damit repräsentativerer Zeiträume wurde die Kennzahl für die Schichtungseffizienz ebenfalls für die vollständigen Jahre 2022 und 2023 zu 90,8 % und 90,7 % bestimmt.

8.2 Pilotspeicher 2

Die messtechnische Begleitung des zweiten für den Demonstrationsbetrieb gefertigten Speichers konnte nicht wie ursprünglich geplant stattfinden (siehe Abschnitt 1.3.6).

Für die messtechnische Untersuchung eines zweiten Speichers wurde daher ein Speicher gleicher Bauweise ausgewählt. Dieser Speicher mit einem Speichervolumen von ca. 26 m³ wurde von der Firma Sirch im Jahr 2016 im botanischen Garten in Augsburg installiert und ist in Abbildung 8-9 dargestellt. Der Wasserraum hat einen Durchmesser von 2,6 m und eine Höhe von ca. 4,8 m. Der Dämmraum hat eine Stärke von 200 mm. Die der hier durchgeführten Untersuchung zugrundeliegenden Messdaten wurden von den Stadtwerken Augsburg zur Verfügung gestellt.



Abbildung 8-9: Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung der Firma Sirch im botanischen Garten in Augsburg (Höhe gesamt 7 m, Durchmesser außen 3 m, Speichervolumen ca. 26 m³).

Die verwendeten Messdaten entsprechen dem Zeitraum einer Revision der Anlage aus dem Jahr 2022. Während dieser Revision wurde der Speicher nicht aktiv thermisch be- oder entladen. Dies entspricht einem Abkühlversuch zur Bestimmung der Wärmeverlustrate analog Abschnitt 8.1.1. Die Speicherinnentemperaturen sowie die Umgebungstemperatur für den Zeitraum der Revision vom 09.08.2022 bis zum 18.08.2022 sind in Abbildung 8-10 dargestellt.

Aufgrund der fehlenden Aufzeichnungen über die genaue Positionierung der Temperaturfühler über die Speicherhöhe wird im Folgenden von einer äquidistanten Positionierung der Temperaturfühler über der Speicherhöhe ausgegangen. Dies entspricht der meist üblichen Positionierung von derartigen Temperaturfühlern. Unter dieser Annahme ergibt sich für den in Abbildung 8-10 dargestellten Abkühlversuch eine Wärmeverlustrate von 19,8 W/K für den gesamten Speicher.

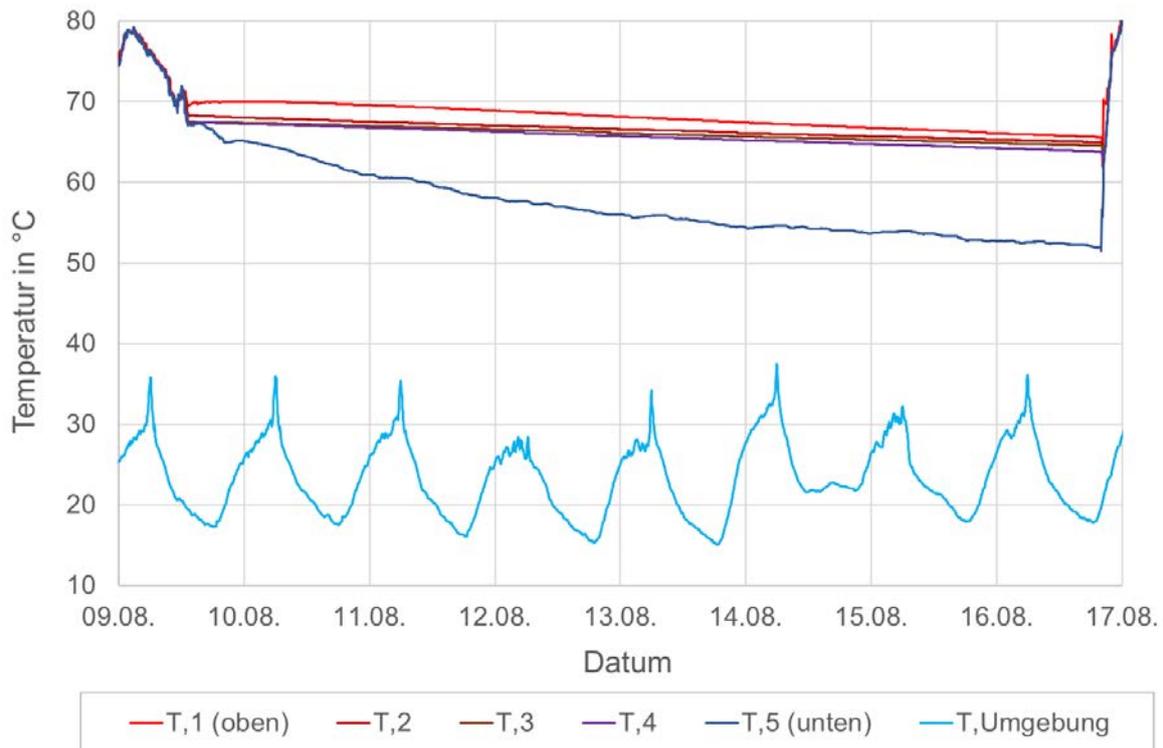


Abbildung 8-10: Speicherinnentemperaturen während des Abkühlversuchs des zweiten Pilotspeichers in Augsburg im August 2022.

8.3 Leckagebestimmung am Funktionsmusterspeicher StoEx

Aufgrund der geringen Standzeit der Pilotspeicher aus dem Projekt StoEx2, eignen diese sich nicht zur Langzeituntersuchung der Dichtigkeit der Vakuumwärmedämmung. Diese wurde daher am Funktionsmusterspeicher im Realmaßstab aus dem Vorgängerprojekt StoEx untersucht, siehe Abbildung 2-1 links und Mitte.

Während der Laufzeit des Projekts StoEx wurde an diesem Speicher über 7 Monate ein Druckanstieg von 0,19 mbar/a bestimmt, wobei die mittlere Dämmraumtemperatur am Ende des Messzeitraums um ca. 4 K höher lag als zum Beginn [Ger 2016]. Zum Ende der Messung Mitte April 2016 lag der Gasdruck im Dämmraum bei 0,49 mbar bei einer mittleren Dämmraumtemperatur von 19,0 °C.

Ende Februar 2024 und damit 7,83 a später wurde ein Gasdruck von 0,77 mbar gemessen bei einer mittleren Dämmraumtemperatur von 18,75 °C. Die Druckerhöhung lag also bei 0,29 mbar bei einer um nur 0,25 K geringeren Temperatur als zum Auswertungsbeginn. Durch den Anschluss einer Zeolithfalle wurde zwischenzeitlich der Gasdruck um 0,02 mbar abgesenkt, siehe Abschnitt 4.3.5.2. Dieser Wert muss der Druckdifferenz zugeschlagen werden um

den Druckanstieg durch Leckage zu ermitteln. Der Druckanstieg durch Leckage betrug also 0,31 mbar in 7,83 a und damit 0,039 mbar/a. Dieser Wert liegt um den Faktor 4,9 niedriger als die im Projekt StoEx bestimmte Leckage von 0,19 mbar/a.

Ursächlich für diesen Unterschied ist vermutlich die Tatsache, dass es direkt nach der Evakuierung zu vergleichsweise starken Desorptionen von an den Oberflächen des Wärmedämmstoffs gebundenen flüchtigen Substanzen in die Gasphase kommen kann, darunter zum größten Teil Wasser. Diese Desorptionen sorgen für einen signifikanten Druckanstieg und verfälschen die Leckagemessung. Im zweiten Betrachtungszeitraum von 7,83 a wurde daher bewusst auf die ersten 7 Monate der Messung verzichtet. Dadurch lässt sich der deutlich geringere Druckanstieg im zweiten Betrachtungszeitraum erklären.

Um den Druckanstieg am Funktionsmusterspeicher von 0,039 mbar/a zum Vergleich mit Leckagen von Dämmräumen mit anderen Volumina verwenden zu können, muss eine allgemeine Leckagerate bestimmt werden. Dazu wird der Druckanstieg mit dem Gasvolumen der Vakuumkammer multipliziert. Bei der auf Basis der Stoffwerte und der Dämmstoffdichte berechneten Porosität des Wärmedämmstoffs von 97,3 % ergibt sich ein Gasvolumen von ca. 7,78 m³ und damit eine Leckagerate von $9,07 \cdot 10^{-6}$ mbar·L/s.

Für den Funktionsmusterspeicher würde sich der Gasdruck in 10 Jahren um 0,39 mbar und in 50 Jahren um 1,95 mbar erhöhen. Es würde sich demnach eine Nachevakuiertung höchstens alle ca. 10 Jahre empfehlen, um die Wärmeverluste gering zu halten. Bei einem Speicher mit einem Dämmraumvolumen von 20 m³, wie beispielsweise dem Pilotspeicher Neumarkt, würde sich der Gasdruck in 10 a um 0,14 mbar und in 50 Jahren um 0,7 mbar erhöhen. Hierbei könnte eine Evakuierung alle 20 Jahre ausreichen.

Je geringer die mittlere Porengröße des gewählten Wärmedämmstoffs, desto weniger sensitiv ist seine effektive Wärmeleitfähigkeit und damit die Wärmeverluste des Speichers bzgl. des Gasdrucks in der Vakuumwärmedämmung, siehe Abschnitt 4.3.7 und [Lan 2022].

Beim Funktionsmusterspeicher wurde zur nachträglichen Begutachtung ein Flansch mit Dichterring am Speicherdeckel angeschweißt. Bei Speichern für reale Anwendungen wird auf diese potentielle Leckagestelle verzichtet. Dieser Flansch mit Dichterring führt beim Funktionsmusterspeicher zu einer höheren Leckagerate als sie im Realfall zu erwarten wäre. Demnach ist zu erwarten, dass die gemessene Leckagerate von $9,07 \cdot 10^{-6}$ mbar·L/s im Realfall deutlich unterschritten werden kann.

8.4 Zusammenfassung

Die beiden untersuchten Pilotspeicher mit Vakuumwärmedämmung weisen im Vergleich zu konventionell wärmegeämmten Speichern mit Speichervolumina zwischen 116 m³ und 4.500 m³ um den Faktor 2 - 8 geringere Wärmeverluste auf [Ein 2015] [Urb 2018]. Ein typischer Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 1 m³ darf für die Energieeffizienzklasse B, d. h. eine gute Standardwärmedämmung, gemäß Verordnung (EU) Nr. 812/2013, Anhang II, eine maximale Wärmeverlustrate von 2,36 W/K aufweisen. Der hocheffiziente, außenaufgestellte Speicher mit Vakuumwärmedämmung hat bei einem ca. 60-fachen Speichervolumen also nur etwa die 6-fache Wärmeverlustrate. Diese vergleichsweise sehr niedrige Wärmeverlustrate ist dabei nur zu einem geringen Teil auf das kleinere Oberflächen-Volumenverhältnis

zurückzuführen, dass sich durch das größere Speichervolumen ergibt. Die Hauptursachen für die sehr geringen Wärmeverluste sind die Vakuumwärmedämmung sowie der konstruktive Aufbau zur Vermeidung von Wärmebrücken. Dies wird bei einem Vergleich der Wärmedurchgangskoeffizienten des oben erwähnten 1 m³ Speichers der Energieeffizienzklasse B deutlich. Für den WWS mit VWD ergibt sich für die gemessene Wärmeverlustrate von 12 - 15 W/K und eine Speicher Oberfläche von 94,25 m² ein mittlerer Wärmedurchgangskoeffizient der gesamten Speicher Oberfläche von 0,127 - 0,159 W/(m² K). Für den oben beschriebenen 1 m³ Speicher mit einer Wärmeverlustrate von 2,36 W/K ergibt sich bei einem angenommenen Durchmesser von 0,85 m und einer Speicherhöhe von 1,8 m ein Wärmedurchgangskoeffizient von ca. 0,4 W/(m² K). Durch die beschriebene Technologie kann der Wärmedurchgang im Vergleich zu bereits gut wärmedämmten Speichern also nochmals um den Faktor 2,5 reduziert werden.

Aufgrund der Einbindung des ersten Pilotspeichers in die Wärmeversorgungsanlage über nur zwei hydraulische Anschlüsse müssen beide Anschlüsse für die Be- und Entladung auch in beiden Richtungen durchströmt werden. Dies verhindert den Einbau von Rückschlagklappen zur Vermeidung von Einrohrzirkulation. Gerade bei einer Außenaufstellung des Speichers ist dieser häufig geodätisch höher positioniert als die Wärmeversorgungsanlage bzw. die hydraulischen Anschlussleitungen. Dadurch kann, wie auch im vorliegenden Fall, in den hydraulischen Leitungen die sich im unteren Bereich des Speichers befinden und teilweise auch im Inneren des Speichers nach oben geführt werden, eine sogenannte Einrohrzirkulation auftreten. Das kann zu einem unerwünschten Wärmetransport in den Speicher sowie zu zusätzlichen Wärmeverluste in den Leitungen führen. Durch die Installation eines Thermosiphons kann dieser Effekt ggf. verhindert werden.

Die Frage der Frostsicherheit konnte im Rahmen des Vorhabens nicht vollständig geklärt werden. Unter den oben untersuchten Betriebsbedingungen traten keine Temperaturen unterhalb von 0 °C an den messtechnisch untersuchten Speicherbereichen auf. Aufgrund der Daten des ersten Pilotspeichers kann davon ausgegangen werden, dass bei geeigneten Dämmmaßnahmen auch für geringere Umgebungstemperaturen Frostsicherheit hergestellt werden kann (siehe Abschnitt 2.2).

Die im Rahmen des Monitorings der Demonstrationsanlage im Schlossbad in Neumarkt erzielten Ergebnisse zeigen deutlich, dass auch bei einer Außenaufstellung von Warmwasserspeichern sehr geringe Wärmeverluste erzielt werden können, wenn die Speicher über eine sehr effektive Wärmedämmung verfügen.

9. Projektkoordination und Öffentlichkeitsarbeit (AP8)

Die inhaltliche Bearbeitung des Forschungsvorhabens wurde von der Firma Sirch koordiniert. Das IGTE unterstützte die Firma Sirch bei der Koordination.

Über das Forschungsprojekt wurde in zahlreichen nationalen Zeitschriften berichtet. Die Forschungsergebnisse wurden auf 4 nationalen Konferenzen vorgestellt. Außerdem erfolgte ein Technologietransfer durch Teilnahme an nationalen und internationalen Konferenzen sowie an diversen Arbeitskreisen.

Nach dem formalen Abschluss des Vorhabens ist anlässlich des „34. Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme“ im Mai 2024 die Teilnahme mit einer Präsentation der Ergebnisse des Forschungsvorhabens StoEx2 geplant.

9.1 Projektkoordination

Während der Projektlaufzeit wurden insgesamt 9 Projekttreffen durchgeführt. Neben den Projekttreffen fanden zur Abstimmung der laufenden Arbeiten zahlreiche Koordinierungstreffen statt, die online durchgeführt wurden. Weiterhin wurden die entsprechenden Arbeiten zur Installation der Pilotspeicher koordiniert sowie die Durchführung der Versuche zur Verbesserung des Fertigungsprozesses zwischen den Partnern abgestimmt.

Während der Projektlaufzeit wurden insgesamt 8 Zwischenberichte angefertigt.

9.2 Öffentlichkeitsarbeit

Im Folgenden sind die im Rahmen der Öffentlichkeitsarbeit durchgeführten Aktivitäten aufgelistet. Dazu gehören die Teilnahme an Konferenzen und Tagungen, die Erstellung von Veröffentlichungen und Vorträge sowie die Mitarbeit in Forschungsnetzwerken und Arbeitskreisen.

9.2.1 Teilnahme an Konferenzen und Tagungen

- Teilnahme Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme 2020 durch Markus Gensbaur und Harald Drück.
- Teilnahme Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme 2021 durch Harald Drück.
- Teilnahme Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme 2022 durch Harald Drück.
- Teilnahme Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme 2023 durch Jens Ullmann und Harald Drück.
- Teilnahme Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme 2024 durch Jens Ullmann und Harald Drück.

9.2.2 Veröffentlichungen und Vorträge

- Gensbaur, M., Ullmann, J., Drück, H.: Untersuchung des thermischen Verhaltens einer transparenten Wärmedämmung für außenaufgestellte Warmwasserspeicher, Online-Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme 2020, Tagungsband, ISBN 978-3-948176-11-2.
- Gensbaur, M., et. al., „Investigation of the thermal behaviour of a transparent thermal insulation for outdoor installed hot water stores“, 14th International Renewable Energy Storage Conference (IRES2020, 10. - 12. März 2020, Düsseldorf), proceedings ISBN 978-94-6239-327-1.
- Zeitungsartikel in „Neumarkter Nachrichten“ vom 21./22.11.20 mit dem Titel „Innovativer Speicher“.
- Zeitungsartikel „Neumarkt Stadt & Land“ / Nordbayern vom 23.11.20 mit dem Titel „17,5 Tonnen Stahl schweben ein“.
- Zeitungsartikel in „Mittelbayrische“ vom 21.11.20 mit dem Titel „Speicher neben der Liegewiese“.
- Vortrag beim Treffen der Energiewende-Plattform „Forschung und Innovation“ des BMWi am 20. April 2021 (online) von Dr. Harald Drück.
- Gensbaur, M., Ullmann, J., Drück, H.: Untersuchung des thermischen Verhaltens einer transparenten Wärmedämmung für außenaufgestellte Warmwasserspeicher, Online-Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 12.-14. Mai 2020, Tagungsband ISBN 978-3-948176-11-2, S. 328-337.
- Ullmann, J., Lang, S., Gensbaur, M., Drück, H., Jüngert, A.: Technologische Optimierung eines vakuumwärmegeprägten Warmwasserspeichers, 31. Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme, 27. – 30. April 2021, Tagungsband, ISBN 978-3-948176-13-6.
- Ullmann, J., Lang, S., Drück, H., Gensbaur, M., Röder, G., Sirch, M.: Feldtest eines großvolumigen und vakuumwärmegeprägten Warmwasserspeichers, 32. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 03. – 05. Mai 2022, Kloster Banz, Bad Staffelstein, ISBN 978-3-948176-17-4.
- Veröffentlichung im Jahrbuch Solarthermie 2022 mit dem Titel „Der Wärmespeicher kann draußen bleiben“ zum Thema großer Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenaufstellung - Funktionsweise, Demonstration und architektonische Integration.
- Veröffentlichung eines Beitrags in der Kundenzeitschrift der Stadtwerke Neumarkt (Ausgabe 1/2022, Seite 16 und 17) mit dem Titel „Größte Thermoskanne Neumarkt“, Die Kundenzeitschrift ist über folgenden Link verfügbar (Stand 11.04.2024): https://swneumarkt.de/wp-content/uploads/2022/06/MAGAZIN_Lebensqualitaet_Ma-erz22.pdf.

- Große außenaufgestellte Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung, Blätter des HLK-Briefs 2023, Vereins der Förderer der Forschung im Bereich HLK Stuttgart e.V., https://vdf.hlk-stuttgart.de/fileadmin/Redaktion/HLK-Briefe/HLK-Brief_2023.pdf.
- Erstellung eines Beitrags zum Projekt „StoEx2“ für das Fachportal EnergieWendeBauen durch Herrn Selig und Herrn Georg Röder.
- Ullmann, J., Lang, S., Drück, H., Scholl-Haaf, C., Gensbaur, M., Röder, G., Sirch, M.: Ergebnisse der Weiterentwicklung kostengünstiger vakuumwärmedämmter Warmwasserspeicher zur Außenaufstellung, 34. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 14. – 16. Mai 2024, Kloster Banz, Bad Staffelstein, ISBN 978-3-948176-26-6.

Zusätzlich zu den oben dargestellten Veröffentlichungen und Vorträgen wurden ausgewählte Ergebnisse der Forschungsvorhaben StoEx und StoEx2 im Rahmen der folgenden Vorlesungen an der Universität Stuttgart durch Dr. Harald Drück präsentiert:

- „Solarthermie“
- „Einführung in die erneuerbaren Energien“

9.2.3 Teilnahme Treffen Forschungsnetzwerke und Arbeitskreise

- Teilnahme an der Klausurtagung der AG 10 (Solarthermietechnologie) des BMWi Forschungsnetzwerks Energie-WendeBauen bzw. der Deutschen Solarthermie-Technologie Plattform (DSTTP) am 25.-26.11.19 beim ISFH in Hameln-Emmerthal durch Harald Drück (IGTE).
- Teilnahme am Fachgespräch "Quartierskonzepte" am 04.12.19 in Aschaffenburg durch Harald Drück (IGTE).
- Teilnahme am Projektleitertreffen EnergieWendeBauen, 14.-15.Mai 2020 (Online) durch Dominik Bestenlehner und Dr. Harald Drück.
- Teilnahme an der Vorstellung der „neuen wissenschaftlichen Begleitforschung EnergieWendeBauen“ am 17.11.2020 (online) durch Harald Drück und Dominik Bestenlehner (beide IGTE).
- Teilnahme an der Sitzung des Arbeitskreises Langzeitwärmespeicher am 25.11.2020 (online) durch Dominik Bestenlehner (IGTE).
- Teilnahme am Projektleitungstreffen EnergieWendeBauen, 15. April 2021 (Online) von Dr. Harald Drück.
- Teilnahme am Treffen des Arbeitskreises „Langzeit-Wärmespeicher“ am 16. Juni 2021 (Online) von Dr. Harald Drück und Dominik Bestenlehner.
- Teilnahme bzw. Leitung Sitzungen der AG 10 (Solarthermie-Technologie) des Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen des BMWi bzw. des Beirats der DSTTP (Deutsche Solarthermie-Technologie Plattform am 25.01.21; 18.03.21; 10.05.21; 28.05.21 und 21.06.21 durch Dr. Harald Drück.

- Teilnahme am „Monitoring-Forum“ EnergieWendeBauen am 07. Oktober 2021 (Online) durch Mitarbeitende des IGTE.
- Teilnahme am Projektleitungstreffen EnergieWendeBauen, 23. November 2021 (Online) durch Dr. Harald Drück.
- Teilnahme bzw. Leitung Sitzungen der AG 10 (Solarthermie-Technologie) des Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen des BMWi bzw. des Beirats der DSTTP (Deutsche Solarthermie-Technologie Plattform) am 04.10.21 und 08.12.21 durch Dr. Harald Drück.
- Teilnahme am Treffen des „Arbeitskreis Langzeit-Wärmespeicher“ am 16.02.22 (online) durch Mitarbeitende des IGTE.
- Teilnahme am Projekttreffen „EnergieWendeBauen am 09 und 10. Juni 2022 (Online und in Wuppertal) durch Dr. Harald Drück.
- Teilnahme bzw. Leitung Sitzungen der AG 10 (Solarthermie-Technologie) des Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen des BMWi bzw. des Beirats der DSTTP (Deutsche Solarthermie-Technologie Plattform) am 16.02.22, 04.04.22 und 03.05.22 durch Dr. Harald Drück.
- Teilnahme am Projektleitungstreffen Energiewende Bauen am 10.11.22 in Petershagen und Online; und Vorstellung des Projekts „StoEx2“ mittels eines Vortrags von Dr. Harald Drück.
- Teilnahme bzw. Leitung des Treffens der der AG 10 (Solarthermie-Technologie) des Forschungsnetzwerks EnergieWendeBauen des BMWK bzw. des Beirats der DSTTP (Deutsche Solarthermie-Technologie Plattform) am 12.09.22 (online) und der Klausurtagung am 4. und 5. Oktober 2022 in Kassel durch Dr. Harald Drück.
- Teilnahme an der Veranstaltung "Energieforschung vernetzt – 1. Symposium der Forschungsnetzwerke" am 13.06.23 (online) durch Dr. Harald Drück.

10. Verwertung der Ergebnisse

Im Folgenden werden die wissenschaftlichen, technischen und wirtschaftlichen Erfolgsaussichten bzw. Verwertungsmöglichkeiten der Projektergebnisse erläutert. Da sich die Verwertung der Ergebnisse für die beiden am Vorhaben beteiligten Projektpartner, d. h. der Firma Sirch und des IGTE der Universität Stuttgart, teilweise signifikant unterscheidet, werden die einzelnen Aspekte der Verwertung für jeden Partner in einem separaten Abschnitt beschrieben.

10.1 Wissenschaftliche Verwertung

10.1.1 Wissenschaftliche Verwertung Firma Sirch

Durch die Arbeiten zu AP 1 (Kostenreduktion und Technologieoptimierung) wurden wesentliche Erkenntnisse gewonnen, die die Fertigung der vakuumwärmedämmten Speicher deutlich vereinfachen und die Kosten deutlich reduzieren. Hier sind vor allem der mögliche Verzicht auf die Verwendung einer Standzarge aus Edelstahl sowie die Befüllung des schüttfähigen Wärmedämmstoffs in den horizontal liegenden Speicher zu nennen. Durch den Verzicht der Standzarge aus Edelstahl ergibt sich eine erhebliche Vereinfachung der Schweißarbeiten die zu einer deutlichen Kostenreduktion führt. Die Befüllung des Speichers in horizontaler Lage bedeutet eine erhebliche Reduzierung des Zeit- und Kostenaufwands. Für die Befüllung in vertikaler Lage ist auch bereits für Speicher kleinerer Größe die Verwendung eines Krans notwendig, die bei liegender Befüllung entfallen kann. Die Kostenreduzierung kann mit ca. 2.500 € je Speicher beziffert werden.

Die horizontale Befüllung sowie die anderen in AP 1 gewonnenen Erkenntnisse leisten daher einen großen Beitrag dazu, dass das vor Projektanfang formulierte Ziel, schneller größere Stückzahlen kostengünstig fertigen zu können, erreicht wurde.

Im Rahmen der Fertigung der Pilotspeicher konnten Ansatzpunkte für weitere Optimierungsmaßnahmen identifiziert werden, die ggf. in zukünftigen Vorhaben umgesetzt werden können. Insgesamt kann somit von einer Erreichung der aus Sicht der Firma Sirch zentralen wissenschaftlich-technischen Ziele ausgegangen werden.

10.1.2 Wissenschaftliche Verwertung IGTE

Für die Begleitforschung zur Vakuumwärmedämmung zur Optimierung des Herstellungsprozesses sind aus wissenschaftlicher Hinsicht insbesondere die Erkenntnisse aus den Untersuchungen zur beschleunigten Evakuierung von hoher Bedeutung. Hierbei bietet vor allem die Untersuchung zur drucksenkenden und vakuumstabilisierenden Wirkung von Zeolith weitere Verwertungsmöglichkeiten – beispielsweise bei Vakuumisulationspaneelen. Von hoher wissenschaftlicher Bedeutung kann in Zukunft auch eine mögliche Gasanalyse des Restgases in den Vakuumwärmedämmungen von Warmwasserspeichern werden. Die Art der Gase kann einen hohen Einfluss auf die Wärmeleitfähigkeit der Vakuumwärmedämmung haben und damit auf die Wärmeverluste des Warmwasserspeichers. Entsprechende Analysen hierzu sind für diesen Anwendungsfall bisher nicht aus der Literatur bekannt.

Zur Hohlraumdetektion in Vakuumwärmedämmungen wurden mit der Laser-Doppler-Vibrometrie und einem Röntgenverfahren vielversprechende Verfahren untersucht. Diese Untersuchungen gilt es in Zukunft zu intensivieren, die Kenntnisse auf diesem Gebiet zu erweitern und diese auch für weitere Anwendungen wissenschaftlich auszuwerten. Auch die Untersuchungen zur notwendigen Vibrationsstärke zur Verdichtung einer Dämmstoffschüttung zur Vermeidung von späteren Setzungen sind auf viele Anwendungen mit anderen Schüttungen übertragbar.

Mit der beschleunigten Dämmstoffbefüllung durch Einsaugung in den Dämmraum eines liegenden Speichers wurde im Projekt StoEx2 durchgeführte wissenschaftliche Forschung hierzu erfolgreich umgesetzt. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse können auch für weitere Untersuchungen zum Stofftransport von dispersen Systemen verwendet werden. Gleiches gilt für die Erkenntnisse zur Dämmstoffeinsaugung und -verteilung in den stehenden Behälter, welche untersucht, aber für die vakuumwärmedämmten Warmwasserspeicher bisher nicht umgesetzt wurden.

Weiterhin konnten neue Erkenntnisse zu den Wärmetransportphänomenen innerhalb von transparenten Wärmedämmungen erarbeitet werden. Damit konnte ein numerische Modell zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens der TWD in Kombination mit einem Warmwasserspeicher erstellt werden. In der Kombination mit dem ebenfalls im Vorhaben erarbeiteten Parameteridentifikationsverfahren ermöglicht dies eine deutliche Verbesserung der Vorhersage des thermischen Verhaltens von WWS mit TWD mithilfe von Simulationen.

Die oben genannten Aspekte zeigen jeweils Potential für weitere wissenschaftliche Untersuchungen auf.

Insgesamt kann somit festgestellt werden, dass die aus Sicht des IGTE zentralen wissenschaftlichen Ziele erreicht wurden.

10.2 Technische Verwertung

10.2.1 Technische Verwertung Firma Sirch

Die Firma Sirch konnte dank der im Rahmen des Forschungsvorhabens erarbeiteten Erkenntnisse ihre Produkte im Bereich vakuumwärmedämmte Warmwasserspeicher weiter entwickeln und kann hierdurch preiswerte und ästhetisch anspruchsvolle, technologisch überlegene und zugleich nachhaltige Alternativen zu konventionellen Speicherkonzepten am Markt anbieten.

Durch die messtechnische Untersuchung der Pilotspeicher konnten wichtige Erkenntnisse hinsichtlich der Langzeitstabilität der schüttfähigen Wärmedämmung gewonnen werden. Diese erlauben eine verlässlichere ökonomische Bewertung des Langzeitverhalten des Speichers und fördern dadurch das Vertrauen und somit eine größere Marktdurchdringung dieser Technologie.

Insgesamt kann somit von einer Erreichung der aus Sicht der Firma Sirch zentralen technischen Ziele ausgegangen werden.

10.2.2 Technische Verwertung IGTE

Durch die kontinuierliche Bearbeitung von Forschungsprojekten zu thermischen Energiespeichern konnten gleichzeitig Versuchseinrichtungen, Labore und Software sowie die kontinuierlich erworbene Langzeiterfahrung für das Vorhaben StoEx2 synergetisch genutzt werden. Somit konnte ein effektiver Einsatz der Fördermittel gewährleistet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse und Erfahrungen stärken das IGTE für weitere Forschungsvorhaben im Bereich der Wärmespeicherung und insbesondere auch der Vakuumwärmedämmung.

Sämtliche wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens sind Herstellern, Forschern und Verbrauchern durch entsprechende Veröffentlichungen in Zeitungen, auf Konferenzen bzw. bei Vorträgen zugänglich gemacht worden. Durch die Mitarbeit im Arbeitskreis Langzeitwärmespeicher bzw. im Rahmen der DSTTP u. a. (siehe Abschnitt 9.2.3) wurden Projektergebnisse bereits während der Projektlaufzeit zusätzlich anderen Forschungsinstitutionen und Interessierten aus der Solarthermie- und Heizungsbranche zur Verfügung gestellt. Durch die Untersuchungen der Speichertechnologie für andere Anwendungsgebiete über die der solarthermischen Gebäudeenergieversorgung hinaus, können die Projektergebnisse z. B. auch in Bereichen der KWK- und Prozesswärmeanwendungen genutzt werden.

Insgesamt sind die aus Sicht des IGTE zentralen technischen Ziele vollständig erreicht worden.

10.3 Wirtschaftliche Verwertung

10.3.1 Wirtschaftliche Verwertung Firma Sirch

Durch die Ergebnisse des Forschungsvorhabens ist es gelungen die Fertigungskosten für vakuumwärmegedämmte Warmwasserspeicher deutlich zu reduzieren. Die neu entwickelten Technologien im Rahmen der Fertigung wurden weitestgehend in die Fertigung übernommen und sind damit am Markt verfügbar. Durch die marktkonforme Überführung konnte für die weitere Marktentwicklung dieser Speichertechnologie ein entscheidender Beitrag geleistet werden. Durch die begleitenden Untersuchungen der Pilotspeicher und aus dem Forschungsvorhaben gewonnenen Langzeiterfahrungen konnte die technische Überlegenheit dieser Speichertechnologie gegenüber herkömmlichen Wärmespeichern deutlich aufgezeigt und das Vertrauen in diese Technologie im Markt gestärkt werden. Mittelfristig ist das Ziel der Fr. Sirch bis zum Jahr 2030 ein Speichervolumen von 2.000.000 Litern dieser neuartigen und hocheffizienten Speicher zu verkaufen und damit einen zusätzlichen Umsatz von 1,5 Mio Euro zu erzielen. Durch die im Projekt StoEx2 erarbeiteten innovativen Neuerungen kann die Technologieführerschaft Deutschlands im Bereich der Solarthermie- und Wärmespeicherindustrie gestärkt werden. Zusätzlich stellt dies auch einen wesentlichen Beitrag zum Ausbau der Kraft-Wärme-Kopplung und der stärkeren Nutzung erneuerbarer Energien im Wärmemarkt dar. Somit leistet das Projekt StoEx2 auch einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz und zur Ressourcenschonung.

Durch die Öffentlichkeitsarbeit konnte sowohl die Bekanntheit der Firma Sirch als auch der Technologie großvolumiger, hocheffizienter außenaufgestellter Warmwasserspeicher am

Markt ausgebaut werden. Durch den nun vorhandenen Katalog für architektonische Integrationsmöglichkeiten konnten neue Märkte und Einsatzgebiete für außenaufgestellte Warmwasserspeicher erschlossen werden.

Insgesamt kann somit davon ausgegangen werden, dass die aus Sicht der Firma Sirch zentralen wirtschaftlichen Ziele erreicht wurden.

10.3.2 Wirtschaftliche Verwertung IGTE

Das IGTE verfolgt mit dem angestrebten Verbundvorhaben keine eigenen wirtschaftlichen Ziele, sondern leistet primär Beiträge zum Erreichen der wirtschaftlichen Ziele der Firma Sirch. Die Erfolgsaussichten der wirtschaftlichen Ziele der Firma Sirch sind in vorangegangenen Abschnitt 10.3.1 erläutert.

11. Zusammenfassung und Ausblick

11.1 Zusammenfassung

Von der Firma Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau GmbH aus Kaufbeuren und dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE, ehemals ITW) der Universität Stuttgart wurde die im Vorgänger-Projekt „StoEx“ entwickelte Technologien zur Realisierung von außenaufgestellten großvolumigen Warmwasserspeichern mit Vakuumwärmedämmung hin zu einem marktreifen Produkt mit kostengünstigerer Fertigung weiterentwickelt. Dabei wurde vor allem zu den folgenden Punkten weiterführende Arbeit geleistet:

- Optimierung des Herstellungsprozesses bzgl. der Vakuumwärmedämmung zur Reduzierung der Fertigungskosten und -dauer sowie Verbesserung der Langzeitstabilität
- Erweiterung des Wissens bzgl. der Wärmetransportphänomene in transparenten Wärmedämmungen sowie deren Modellierung und Erarbeitung eines Parameteridentifikationsverfahrens zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens von außenaufgestellten und mit einer Transparenten Wärmedämmung versehenen Warmwasserspeichern
- Funktionsprüfung der Speichertechnologie anhand von Demonstrationsanlagen unter realen Betriebsbedingungen
- Erarbeitung von architektonische Integrationsmöglichkeiten zur Steigerung der Marktakzeptanz und -durchdringung

Zwei Pilotspeicher wurden von der Firma Sirch gefertigt. Bei einem der Pilotspeicher wurde erfolgreich die eigens entwickelte neuartige horizontale Befüllung mit schüttfähigen Wärmedämmstoffen realisiert.

Der erste Pilotspeicher wurde im neuen Schlossbad in Neumarkt i. d. Oberpfalz im realen Betrieb messtechnisch untersucht. Die Ergebnisse aus zwei Abkühlversuchen zeigten für diesen Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung und einem Volumen von 60,6 m³ eine Wärmeverlustrate von maximal 15 W/K. Diese Wärmeverlustrate ist im Vergleich zu außenaufgestellten Wärmespeichern mit herkömmlichen Wärmedämmungen um den Faktor 2 - 8 geringer und stellt somit eine erhebliche Verbesserung der nun zur Verfügung stehenden Speichertechnologie dar.

Durch die Forschung hinsichtlich der Optimierung des Herstellungsprozesses der Vakuumwärmedämmung konnten neue Erkenntnisse gewonnen und erhebliche Beschleunigungen und Kostensenkungen des Herstellungsprozesses erreicht werden. Die größte Verringerung von Fertigungskosten konnte durch die Befüllung der Speicher mit Wärmedämmstoff im liegenden Zustand realisiert werden. Bisher mussten vakuumwärmedämmte Warmwassern mit Speichervolumina größer als 5 m³ nach der Fertigung zur Dämmstoffbefüllung mittels zweier angemieteter mobiler Kräne aufgestellt und für den Transport wieder abgelegt werden. Der damit zusammenhängende große Zeit- und Kostenaufwand entfällt durch die neue Dämmstoffbefüllung mittels Einsaugung in den Dämmraum des liegenden Speichers. Damit können Fertigungskosten von ca. 2.500 € pro Speicher eingespart werden.

Insbesondere durch die neue Methode zur Dämmstoffbefüllung bleibt die Sicherstellung einer qualitativ hochwertigen Vakuumwärmedämmung ohne starke Setzungen und große Hohlraumbildungen im schüttfähigen Wärmedämmstoff wichtig, da solche Setzungen und Hohlraumbildungen die Wärmeverluste des Speichers erhöhen können. Um derartige Setzungen zu vermeiden wurden stets mechanische Rüttler eingesetzt um die Dämmstoffschüttung durch Vibrationen zu verdichten, was die Wahrscheinlichkeit für spätere Setzungen verringert. Mittels der durchgeführten Forschungsarbeiten konnte erstmals ermittelt werden, welche Vibrationsstärke nötig ist, um den Wärmedämmstoff stark genug zu verdichten um Setzungen nach der Fertigstellung zu vermeiden. Diese Setzungen können insbesondere durch die Vibrationen beim Speichertransport zum Kunden entstehen. Damit ist ein wichtiger Fortschritt in der Qualitätssicherung von vakuumwärmedämmten Warmwasserspeichern gelungen.

Zur Verringerung der Evakuierungsdauer der Vakuumwärmedämmung wurden mehrere verschiedene Methoden in Labor-, Technikums- und Realmaßstab untersucht. Als wichtigste und am einfachsten umzusetzende Maßnahme hat sich die Verwendung von frisch produziertem Wärmedämmstoff gezeigt, der über einen geringen Feuchtegehalt verfügt. Der Feuchtegehalt ist der größte Einflussfaktor auf die Evakuierungsdauer. Daneben haben sich insbesondere die Ausheizung der Wärmedämmung zur Verringerung des Feuchtegehalts und die Verwendung des Trocknungsmittels Zeolith als effektiv erwiesen. Es konnte auch gezeigt werden, dass der Zeolith den Druckanstieg durch einen Temperaturanstieg deutlich verringern kann. Dieser Druckanstieg wird vor allem getrieben durch die Desorptionen von am Wärmedämmstoff gebundener Feuchtigkeit. Damit ist zu erwarten, dass sämtliche Maßnahmen, welche den Feuchtegehalt des Wärmedämmstoffs reduzieren einen Effekt bezüglich der Verkürzung der Evakuierungsdauer haben.

Weiter konnte durch messtechnische Untersuchungen eine Abschätzung der Wärmeverluste im unteren Speicherbereich vorgenommen werden. Auf Basis der Ergebnisse konnte die Materialauswahl für ein wichtiges Konstruktionselement von Edelstahl auf einfachen Stahl geändert werden. Dies senkt insbesondere den Aufwand der Schweißarbeiten deutlich.

Die im Projekt erzielten Ergebnisse zeigen insgesamt deutlich, dass auch bei einer Außenaufstellung von Warmwasserspeichern sehr geringe Wärmeverluste erzielt werden können, wenn die Speicher über eine weitgehend wärmebrückenfreie Konstruktion und eine sehr effiziente Wärmedämmung verfügen. Die Funktionsweise der Technologie außenaufgestellter vakuumwärmedämmter Warmwasserspeicher konnte unter realen Betriebsbedingungen nachgewiesen werden. Aufgrund der begleitenden Forschung können Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung zur Außenaufstellung nun kostengünstiger am Markt angeboten werden.

11.2 Ausblick

Bezüglich der Optimierung des Herstellungsprozesses der Vakuumwärmedämmung gilt es eine möglichst günstige Kombination aus Sauger und Dämmstofffilter zu identifizieren, wodurch eine noch schnellere, staubfreie Befüllung gelingt. Ein weiteres Potential zur Beschleunigung des Befüllprozesses liegt in einer Positionierung des Dämmstoffbeutels bzw. „BigBags“ oberhalb des Befüllungsanschlusses in Zusammenhang mit einer Verbindung des

sich unten am BigBag befindlichen Entleerungsschlauchs mit dem Befüllungsanschluss. Damit wäre ein schwerkraftbetriebenes Abrieseln möglich und der BigBag muss nicht händisch durch ständige Bedienung eines Einsaugschlauchs geleert werden.

Zur Qualitätssicherung einer hohlraumfreien Vakuumwärmedämmung wird der zukünftige Einsatz von Beschleunigungssensoren an den Speichern während der Dämmstoffbefüllung empfohlen, um eine für die Dämmstoffverdichtung ausreichende Rüttelstärke sicherzustellen.

Zur weiteren Verringerung der Evakuierungsdauer könnte in Zukunft noch die Vorevakuierung eines leeren Dämmraums bei gleichzeitiger Ausheizung untersucht werden. Ohne Erhöhung der Temperatur hatte eine solche Vorevakuierung bisher keinen Nutzen gezeigt. Zudem gilt es die Untersuchungen zur Ausheizung während der Evakuierung des mit Wärmedämmstoff gefüllten Dämmraums auszuweiten, um eine Beschleunigung in Abhängigkeit von der Dämmraumtemperatur zu ermitteln, die auch auf den Realfall übertragbar ist. Die Untersuchungen zur Wirkung von Zeolith auf die Temperaturabhängigkeit des Gasdrucks am Pilotspeicher Neu- markt lieferten aufgrund von hoher Leckage an den Verrohrungen zwischen Zeolithfalle und Speicherdämmraum keine eindeutigen Ergebnisse. Die Lecksuche und -behebung konnte innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr abgeschlossen werden. Diese könnte nach Abschluss des Projekts noch vorgenommen und die Untersuchungen dann wiederholt werden.

Von besonderem Interesse ist auch eine Gasanalyse des Restgases des Pilotspeichers Neu- markt und des Speichers in Mengen. Dort haben sich bei der Druckmessung Effekte gezeigt, die auf das Vorhandensein von Wasserstoff hindeuten könnten. Falls sich dies durch eine Gasanalyse bestätigen sollte, gilt es die Ursache für dieses Phänomen zu ermitteln und Gegenmaßnahmen zu ergreifen.

12. Danksagung

Das Verbundprojekt „StoEx2“ (Weiterentwicklung, Prüfung und Demonstration großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenaufstellung, Fkz: 03ET1667 A/B) wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch den Projektträger Jülich (PTJ) gefördert. Das Verbundprojekt wurde gemeinsam von der Firma Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau GmbH und dem IGTE (vormals ITW) der Universität Stuttgart durchgeführt. Die Autoren danken für die gewährte Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts.

Außerdem danken wir den Stadtwerken Neumarkt und Augsburg, der Firma Kleiner Biogas GmbH aus Mengen sowie der Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart, dem Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart und dem Institut für Biomedizinische Technik (BMT) der Universität Stuttgart für ihre Unterstützung sowie die gute und vertrauensvolle Zusammenarbeit.

13. Literaturverzeichnis

- [Alt 2011] *ALTENBURGER, F., et al.*: "Theoretische Untersuchungen zur Entwicklung eines Wasserwärmespeichers mit Vakuumdämmung", Tagungsband zum 21. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, 2011.
- [BAS 2024] *BASF*: "Product Data Sheet BASF 13XBF Molecular Sieve", Ludwigshafen, 2024.
- [Bei 2013] *Beikircher, T. et al.*: „Abschlussbericht Superisolierter Heißwasser-Langzeitwärmespeicher: Fkz: 0325964A“, ZAE Bayern, Garching, 2013.
- [Bür 2017] *Bürger, V. et al.*: "Klimaneutraler Gebäudebestand 2050 – Energieeffizienzpotenziale und die Auswirkungen des Klimawandels auf den Gebäudebestand", Abschlussbericht, Umweltbundesamt, ISSN 1862-4359.
- [Drü 2006] *Drück H.*: "Mathematische Modellierung und experimentelle Prüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen.", Dissertation, Shaker-Verlag, Aachen, 2006. ISBN: 978-3-8322-6215-0.
- [Drü 2017] *Drück H.*: "Multiport Store-Model for TRNSYS - Stratified fluid storage tank with four internal heat exchangers, ten connections for direct charge and discharge and an internal electrical heater.", TRNSYS Description Type 340, V1.99F., 2017.
- [Ein 2015] *EINSTEIN project*: "EFFECTIVE INTEGRATION OF SEASONAL THERMAL ENERGY STORAGE SYSTEMS IN EXISTING BUILDINGS ", January 2012 – December 2015, EU- Grant agreement no.: 284932, Publishable report: Seasonal thermal energy storage in existing buildings., <https://cordis.europa.eu/docs/results/284/284932/final1-einstein-final-publishable-v2.pdf>.
- [Eng 2021] *Engelmann, P. et al.*: "Systemische Herausforderung der Wärmewende", Abschlussbericht, Umweltbundesamt, ISSN 1862-4359.
- [Fis 2011] *Fischer S.*: "Dynamische Prüfung von Sonnenkollektoren unter besonderer Berücksichtigung der Einfallswinkelkorrektur und der Reduzierung der Prüfdauer.", Dissertation. Shaker-Verlag, Aachen, 2011. ISBN: 978-3-8440-0610-0.
- [Fis 2012] *Fischer S., Frey P., Drück H.*: "A comparison between state-of-the-art and neural network modeling of solar collectors.", Solar Energy, Volume 86, Issue 11, November 2012, Pages 3268-3277.
- [Fre 2014] *Frey P., Fischer S., Drück H.*: "Artificial Neural Network modeling of sorption chillers.", Solar Energy, Volume 108, October 2014, Pages 525-537.

-
- [Ger 2014] *Gerschitzka M., Bonk S., Bauer D., Drück H.:* "Transparente Wärmedämmung für Langzeit-Wärmespeicher zur Außenaufstellung - Experimentelle Untersuchungen", 11th International Conference on Solar Heating and Cooling, Gleisdorf Solar 2014, Österreich.
- [Ger 2015] *Gerschitzka M., Lang S., Bauer D., Drück H.:* "Development of a high-efficient long-term thermal energy store for outdoor installation.", Proceedings of 9th International Renewable Energy Storage Conference IRES 2015, Düsseldorf, Deutschland.
- [Ger 2016] *Gerschitzka, M.; Lang, S.; Sirch, M. et al.:* "Entwicklung großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Dämmung zur Außenaufstellung", Abschlussbericht des Verbundvorhabens (FKZ: 0325992A+B. Universität Stuttgart Ausgabe 2016.
- [Ger 2017] *Gerschitzka M., Schmidt D., Bestenlehner D., Marx R., Drück H.:* "Thermal performance testing of outdoor hot water stores for long-term thermal energy storage.", Proceedings of 5th International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry (SHC 2017), Abu Dhabi, UEA, 2017.
- [Gen 2020] *Gensbaur, M., Ullmann, J., Drück, H.:* "Untersuchung des thermischen Verhaltens einer transparenten Wärmedämmung für außenaufgestellte Warmwasserspeicher", Online-Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 12.-14. Mai 2020, Tagungsband ISBN 978-3-948176-11-2, S. 328-337.
- [Gen 2021] *Gensbaur, M.:* "Modellgestützte Untersuchung außenaufgestellter, großvolumiger Warmwasserspeicher mit transparenter Wärmedämmung", Stuttgart, 2021, Universität Stuttgart, Dissertation, Konrad Signatur: Diss. 2021/ 317.
- [IKT 2024] *Institut für Kunststofftechnik (IKT) der Universität Stuttgart:* "Zerstörungsfreie Prüfung" [online], Stuttgart, [Zugriff am 28.03.2024]. Verfügbar unter: https://www.ikt.uni-stuttgart.de/dienstleistungen/zerstoerungsfreie_pruefung
- [Lan 2016] *Lang S., Gerschitzka M., Bauer D., Drück H.:* "Thermal conductivity of vacuum insulation materials for thermal energy stores in solar thermal systems.", Energy Procedia, 91 (2016) 172-181.
- [Lan 2022] *Lang, S.:* „Messung und Modellierung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffschüttungen für vakuumwärmegedämmte Warmwasserspeicher“, Dissertation, Universität Stuttgart, Stuttgart, 2022
- [Lin 2024] *T. VAN DER LINDE:* „Big Bag 2 m³“ [online], Emmeloord (NL), 2024 [Zugriff am: 28. März 2024]. Verfügbar unter: <https://www.bigbagstore.de/big-bag-2m3>

- [May 2013] *MAYER W. (Hrsg.), FUCHS B., et al. (2013): "FORETA – Ergebnisse des Forschungsverbundes Energieeffiziente Technologien und Anwendungen."*, pp. I-1 – I-36. ISBN: 978-3-942742-34-4.
- [MPA 2024] *Materialprüfungsanstalt (MPA) der Universität Stuttgart: "Abteilung ZfP und Materialcharakterisierung"*, [online], Stuttgart, [Zugriff am 28.03.2024].
Verfügbar unter: <https://www.mpa.uni-stuttgart.de/institut/abteilungen/zfp-und-materialcharakterisierung>.
- [PCE 2024] *PCE Instruments: "Vibrationsmessgerät PCE-VD 3"* [online], Meschede, [Zugriff am: 28. März 2024]. Verfügbar unter: https://www.pce-instruments.com/deutsch/messtechnik/messgeraete-fuer-alle-parameter/vibrationsmessgeraet-vibrationsmesser-pce-instruments-vibrationsmessgeraet-pce-vd-3-det_23124.htm.
- [Per 2015] *Persdorf, P., Haberl, R., Haller, M.Y.: "Experimentelle Untersuchung der Schichtungseffizienz – Entwicklung einer Testmethode"*, 25. OTTI Symposium Thermische Solarenergie, 6.-8. Mai 2015, Kloster Banz, Bad Staffelstein, ISBN 978-3-943891-51-5.
- [Pfe 2024-1] *Pfeiffer Vacuum: "Pascal 2021, SD Version, 1-Phasenmotor, 180 – 254 V, 50/60 Hz, CE/UL/CSA"*, [online], Asslar, [Zugriff am: 28. März 2024].
Verfügbar unter: <https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/de/shop/products/221SDMHM>.
- [Pfe 2024-2] *Pfeiffer Vacuum: "Okta 250, Wälzkolbenpumpe, 230/400 V, 50 Hz | 265/460 V, 60 Hz"*, [online], Asslar, [Zugriff am: 28. März 2024]. Verfügbar unter: https://www.pfeiffer-vacuum.com/global/de/shop/products/PP_W21_000_F
- [Ruw 2016] *Ruwac Industriesauger GmbH: Datenblatt „Wechselstromsauger Typ WS 2, WS 3“*, Melle-Riemsloh, 2016.
- [Ull 2021] *Ullmann J., Lang S., Gensbaur M., Drück H., Jüngert A.: "Technologische Optimierung eines vakuumwärmegedämmten Warmwasserspeichers."*, Tagungsband zum 31. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme, 27. – 30. April 2021, Webkonferenz, ISBN 978-3-948176-13-6, Seiten 427 – 440.
- [Urb 2018] *Urbanek, T.; Findeisen, F.; Mücke, J.M. et al.: "Oberirdische Speicher in Segmentbauweise für Wärmeversorgungs-systeme."*, Abschlussbericht zur Forschungsprojekt OBSERW (Fkz. 03ET1230A/B/C), 2018.
- [Wac 2012] *Wacker Chemie AG: „Technical data sheet for HDK® T30“*, München, 28. Feb. 2012.