

Oberirdische Speicher in Segmentbauweise für Wärmeversorgungssysteme – OBSERW

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

Thorsten Urbanek, Fabian Findeisen, Jan Markus Mücke
Technische Universität Chemnitz
Fakultät für Maschinenbau
Professur Technische Thermodynamik

Stephan Lang, Markus Gensbaur, Dominik Bestenlehner, Harald Drück
Universität Stuttgart
Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)
vormals
Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW)
Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS)

Robert Beyer, Konrad Pieper
farmatic Anlagenbau GmbH
vertreten durch: farmatic tank systems,
Fechtelkord & Eggersmann GmbH

2014 – 2018

Auftraggeber
Forschungszentrum Jülich
Projekträger Jülich (PTJ)

Projekträger des
Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Förderkennzeichen: 03ET1230A/B/C

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

ENERGIESPEICHER
Forschungsinitiative der Bundesregierung



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Kurzreferat

Im Projekt wurde ein neuartiger oberirdischer Tankspeicher in Segmentbauweise entwickelt. Dieser Warmwasserspeicher kann mit einer maximalen Temperatur von 98 °C betrieben und in Netzen (z. B. Fernwärme mit Kraft-Wärme-Kopplung, große solarthermische Anlagen, Nutzung von industrieller Abwärme) eingesetzt werden. Zurzeit beträgt die maximale Größe ca. 6000 m³. Für die zugrunde liegende Entwicklung waren vielfältige Arbeiten notwendig (z. B. Konzeption, Tests von Werkstoffen und Konstruktionen im Labor, Strömungssimulationen, Berechnungen zum Wärmeübergang). Auf der Basis dieser Ergebnisse wurde ein Demonstrator (100 m³ Testspeicher) entwickelt und Tests zum Funktionsnachweis durchgeführt. Die Arbeiten bestätigen den gewählten Ansatz und die praktizierte Vorgehensweise. Dieser Bericht dokumentiert die durchgeführten Arbeiten und die daraus resultierenden Ergebnisse.

Schlagwörter: Wärmespeicher, Warmwasser, thermischer Energiespeicher, Kraft-Wärme-Kopplung, Solarthermie, Forschung, Entwicklung, Optimierung, Simulation, Test, Experiment

Titel: Oberirdische Speicher in Segmentbauweise für Wärmeversorgungssysteme (OBSERW) – Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

Dokumententyp: Forschungsbericht; 200 Seiten, 177 Abbildungen, 50 Tabellen

Autoren: Thorsten Urbaneck, Fabian Findeisen, Jan Mücke, Stephan Lang, Markus Gensbaur, Dominik Bestenlehner, Harald Drück, Robert Beyer, Konrad Pieper

Herausgeber: Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Technische Thermodynamik, Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, farmatic tank systems

Erscheinungsjahr¹: 2018

ISBN-10: 3-9811424-8-9

ISBN-13: 978-3-9811424-8-8

Open Access: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-210713>

Rechte: Alle Rechte an dieser Publikation sind den Autoren vorbehalten.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie unter dem Kennzeichen 03ET1230A/B/C aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Besonderer Dank gilt auch dem Projektträger Jülich für die Unterstützung des Vorhabens. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

¹ Im Zuge der Zusammenführung des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) mit zwei weiteren Instituten der Universität Stuttgart zum 01.07.2018 erfolgte auch eine Umbenennung des ITW in Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE). Da die im Projekt OBSERW durchgeführten Arbeiten noch vor dem 01.07.2018 abgeschlossen wurden, sowie aus Kontinuitätsgründen wird jedoch in diesem Bericht ausschließlich die Bezeichnung ITW verwendet.

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat	ii
Symbolverzeichnis	v
Vorwort	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation und Ansatz	1
1.2 Lösungsansatz	3
1.3 Ziele und Vorgehen	4
1.4 Darstellung der Ergebnisse	6
1.5 Projektablauf	6
1.6 Öffentlichkeitsarbeit	6
2 Voruntersuchung von Werkstoffen	7
2.1 Anforderungen	7
2.2 Wärmedämmstoffe	9
2.3 Dichtstoffe	17
3 Entwicklung und Test von Wandaufbauten	29
3.1 Weitere Stoffuntersuchungen	29
3.2 Versuchsstand zum praxisnahen Test von mehrschichtigen Wandaufbauten ...	38
3.3 Einfluss der Feuchtigkeit	56
3.4 Weiterentwicklung der Konstruktionen	69
4 Be- und Entladung mit Radialdiffusoren	76
4.1 Numerische Untersuchungen mittels CFD	76
4.2 Experimentelle Untersuchungen im Labor	89
4.3 Fazit	99
5 Beladung mit einem Schichtenlader	100
6 Hydraulische Integration und Netz-Speicher-Schnittstelle	115
6.1 Zusammenfassung der Anforderungen	115
6.2 Vorstellung des Konzepts	116
7 Planung, Bau und Inbetriebnahme des Demonstrators	120
7.1 Konstruktive Umsetzung	120
7.2 Monitoring	128
7.3 Versuchsprogramm	131
8 Feldtests mit dem Demonstrator	135
8.1 Experimente mit dem Radialdiffusor	135
8.2 Experimente mit dem Schichtenlader	139
8.3 Werkstoffbeständigkeit der Wandsegmente und Dichtstoffe	147

8.4	Externe Wärmeverluste	150
8.5	Verbesserungsmaßnahmen am Demonstrator	168
9	Zusammenfassung und Ausblick	179
	Quellen	180
	Vorträge & Poster	185
A	Anhang A: Demonstratorzeichnung	187
B	Anhang B: Mantelabwicklung	188

Symbolverzeichnis

Lateinische Buchstaben

a	Temperaturleitfähigkeit	[m ² /s]
C_u	Ungleichförmigkeitszahl	[-]
d	Durchmesser	[mm]
d_m	mittlere Korngröße	[mm]
Da	Darcy-Zahl	[-]
Fr	Froude-Zahl	[-]
g	Erdbeschleunigung	[m ² /s]
\dot{G}	Globalstrahlung	[W/m ²]
$(\Delta\dot{G}/\dot{G})$	relative Unsicherheit der Globalstrahlungsmessung	[%]
Gr	Grashof-Zahl	[-]
Δh_E	vertikaler Abstand der Auslassebenen	[m]
h	Höhe	[m]
$H_{\bar{u}}$	Höhe der Übergangsschicht	[m]
$H_{\bar{u},m}$	mittlere Höhe der Übergangsschicht	[m]
k	Wärmedurchgangskoeffizient	[W/(m ² K)]
K	Permeabilität	[m ²]
l_{ch}	charakteristische Länge	[m]
\dot{m}	Massenstrom	[kg/s]
Nu	Nusselt-Zahl	[-]
p	Druck	[bar]
Pr	Prandtl-Zahl	[-]
\dot{q}	Wärmestromdichte	[W/m ²]
\dot{Q}	Wärmestrom	[W]
\dot{Q}_{ges}	Gesamtwärmeverluststrom des Speichers	[W]
r	Radius	[m]
Ra	Rayleigh-Zahl	[-]
Ra^*	Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl	[-]
Re	Reynolds-Zahl	[-]
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]
$\Delta T_{Sp,m}/\Delta t$	zeitliche Änderung der mittleren Speichertemperatur	[K/d]
T	Temperatur	[°C]

T_a	Außentemperatur Ringraumsimulation	[°C]
T_{Sp}	Speichertemperatur	[°C]
$T_{Sp,m}$	mittlere Speichertemperatur	[°C]
T_{amb}	Umgebungslufttemperatur	[°C]
$T_{Rückraum}$	Rückraumtemperatur der Wärmebildkamera	[°C]
T_{Mantel}	mittlere Speicheroberflächentemperatur	[°C]
T_N	Oberflächentemperatur Speicher-Nordseite	[°C]
T_{NW}	Oberflächentemperatur Speicher-Nordwestseite	[°C]
T_W	Oberflächentemperatur Speicher-Westseite	[°C]
T_{SW}	Oberflächentemperatur Speicher-Südwestseite	[°C]
T_S	Oberflächentemperatur Speicher-Südseite	[°C]
T_{SO}	Oberflächentemperatur Speicher-Südostseite	[°C]
T_O	Oberflächentemperatur Speicher-Ostseite	[°C]
T_{NO}	Oberflächentemperatur Speicher-Nordostseite	[°C]
t	Zeit	[h]
t^*	dimensionslose Zeit	[-]
u, v, w	Geschwindigkeit (Komponenten in x-, y- und z-Richtung)	[m/s]
U	Geschwindigkeit (Betrag)	[m/s]
$(UA)_B$	Wärmeverlustrate Speicherboden	[W/K]
$(UA)_D$	Wärmeverlustrate Speicherdecke	[W/K]
$(UA)_{ges}$	Wärmeverlustrate des gesamten Speichers	[W/K]
$(UA)_W$	Wärmeverlustrate Speicherwand	[W/K]
$(UA)_{W+D}$	Wärmeverlustrate Speicherwand und -decke	[W/K]
V	Volumen	[m ³]
\dot{V}	Volumenstrom	[m ³ /h]
w	Windgeschwindigkeit	[m/s]
y	Höhenkoordinate	[m]
y_s	Lage der Übergangsschicht	[m]
Griechische Buchstaben		
α	Wärmeübergangskoeffizient	[W/(m ² K)]
β	isobarer Wärmeausdehnungskoeffizient	[1/K]
ε	Konvektionsfaktor nach Michejew	[-]
ε^*	Emissionsgrad	[-]

η_G	Gütegrad der Schichtung	[-]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/(m K)]
λ	vertikale effektive Wärmeleitfähigkeit im Speichermedium Wasser	[W/(m K)]
ν	kinematische Viskosität	[m ² /s]
ρ	Dichte	[kg/m ³]
ρ^*_s	Reflexionsgrad im solaren Spektrum	[-]
ρ^*_l	Reflexionsgrad im langwelligen Spektrum	[-]
τ^*	Transmissionsgrad	[-]
ϕ	Ansaugverhältnis	[-]
ϕ	Porosität	[-]
ϕ	relative Luftfeuchte	[%]
ϕ_a	äußere Porosität	[-]
ϕ_i	innere Porosität	[-]

Abkürzungen

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
Ans	Ansaugung
AM1,5	Airmass 1,5
AKV	Auskühlversuch
AL	Anschlussleitung
bel	Beladekreis
BES	Be- und Entladesystem
CFD	Computational Fluid Dynamics
D	Diffusor
DAV	Deckenauskuhlversuch
DE	Druckerhöhung
DM	Druckminderung
ein	Eintritt
E	Wert für Auslassebene
Esolar	Solarstrahlungssensor
Fa	relative Luftfeuchte an der Wetterstation
FAB	farmatic Anlagenbau GmbH
FTS	farmatic tank systems
ges	gesamt

GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
HV	Heißversuch
i	Index Auslass
lsp	Füllstand des Demonstrators bzw. Höhe der Schwimmdecke bezogen auf den unteren Totpunkt
ITW	Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart
IGTE	Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung
KB	Konvektionsbremse
KG	Korngröße
KWK	Kraft-Wärme-Kopplung
LES	Large Eddy Simulation
max	maximaler Wert
min	minimaler Wert
mittel	mittlerer Wert
mwZ	mittlerer Wert in warmer Zone
MDP	mikroporöse Dämmplatte
MID	magnetisch-induktiver Durchflussmesser
MK	Motorklappen
MSR	Mess-, Steuer- und Regelungstechnik
MV	motorgesteuertes Ventil
NHN	Normalhöhennull
OBSERW	Oberirdische Speicher in Segmentbauweise für Wärmeversorgungssysteme
P	Pumpe
PHS	Phenolharzschaumplatte
PIR	Polyisocyanurat-Hartschaum
PUR	Polyurethan-Hartschaum
PP	Polypropylen
PPE	Polyphenylenether
R	Austrittsöffnung, Rohr
rel	relativer Wert
rd	Radialdiffusor
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes
RFE	repräsentatives Flächenelement
RL	Rücklauf
RP	Rathipur
sch	Schicht

SL	Schichtenlader
SLV	Schichtenladerversuch
Sp	Speicher
MEZ	Mitteleuropäische Zeit
therm	thermisch
T	Temperatur
TUC/TT	Technische Universität Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik
TV	Temperaturverlauf
Umg	Umgebung, außen
Ü	Übergangsbereich
VL	Vorlauf
VS	Versuchsstand
VS-WA	Versuchsstand zum praxisnahen Test mehrschichtiger Wandaufbauten
wd	Wärmedämmung
wW	Windgeschwindigkeit an der Wetterstation
wZ	warme Zone
WSP	Wärmestrommessplatte
WSP-AB	Wärmestrommessplatte Außenblech
WSP-WS	Wärmestrommessplatte Wandsegment
ZHT	Zeit-Höhen-Diagramm
ZPA	Zwei-Platten-Apparatur
XPS	extrudierter Polystyrol-Schaum

Vorwort

Wir bedanken uns bei den zuständigen Bearbeitern im Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) für die Förderung und das außerordentliche Interesse an unserem Verbundvorhaben. Besonderer Dank gilt auch dem Projektträger Jülich (PTJ) und Herrn vom Schloß für die wissenschaftliche Betreuung sowie das Projektmanagement. Für die administrative Betreuung bedanken wir uns außerordentlich bei Frau Wiebe.

Weiterhin war eine positive Zusammenarbeit mit vielen Kolleginnen und Kollegen auf nationaler und internationaler Ebene möglich. Das Projekt wurde im Annex 30 *Thermal Energy Storage for Cost-Effective Energy Management and CO₂ Mitigation* der Internationalen Energieagentur (IEA) im Bereich *Energy Conversion through Energy Storage* (ECES) vorgestellt.

Weiterhin bedanken wir uns bei allen Mitwirkenden, die temporär Beiträge geliefert haben: Dr. Bauer, Dr. Marx, Herr Hoffmann, Herr Herrmann, Herr Leptien. Besonders sind die Firmen Rathi-Dämmsysteme und Faltsilo zu nennen, die über das normale Maß hinaus das Vorhaben unterstützt haben.

Wir haben im Verlauf des Projektes versucht, die umfangreichen Ergebnisse zeitnah zu veröffentlichen, um das Wissen und die Erfahrungen den Spezialisten zur Verfügung zu stellen. Dieser Abschlussbericht soll die vorangegangenen Publikationen abrunden und vor allem die finalen Ergebnisse zeigen. Die Projektergebnisse sollen dazu beitragen, dass in den nächsten Jahren diese Technik eine weitere Verbreitung findet.

Im Oktober 2018

Thorsten Urbaneck, Fabian Findeisen, Jan Mücke, Stephan Lang, Markus Gensbaur, Dominik Bestenlehner, Harald Drück, Robert Beyer, Konrad Pieper

1 Einleitung²

1.1 Motivation und Ansatz

Mit thermischen Energiespeichern kann man viele Vorteile in Wärmeversorgungssystemen (Nah- und Fernwärmenetze) erreichen. Abbildung 1 zeigt diesbezüglich eine Übersicht. Bemerkenswert ist, dass die Vorteile systemseitig und nicht direkt am Speicher entstehen. Das trifft besonders auf die Nutzung der erneuerbaren Energiequellen und Techniken mit Kraft-Wärme-Kopplung zu. Wird zunächst die Betrachtung auf Fernwärmesysteme mit Kraft-Wärme-Kopplung eingeschränkt, ergibt sich folgende interessante Konstellation. Der Speicher lässt sich direkt in den Heizkraftwerks-Prozess (Dampf- und Heißwasserspeicher) oder in das Wärmeverteilsystem (Fernwärmenetz) integrieren über[1], [2], [3], [4]. Bei Temperaturen über ca. 130 °C sind zwingend Druckbehälter³ (Abbildung 2b) oder andere Speicherstoffe notwendig (bspw. Salzschnmelzen bei solaren Kraftwerken). Die Heißwasserspeicher werden oft als schlanke Speicher (Abbildung 3, links) ausgeführt, die relativ teuer sind und aufgrund des höheren Oberflächen-Volumen-Verhältnisses höhere Wärmeverluste aufweisen.

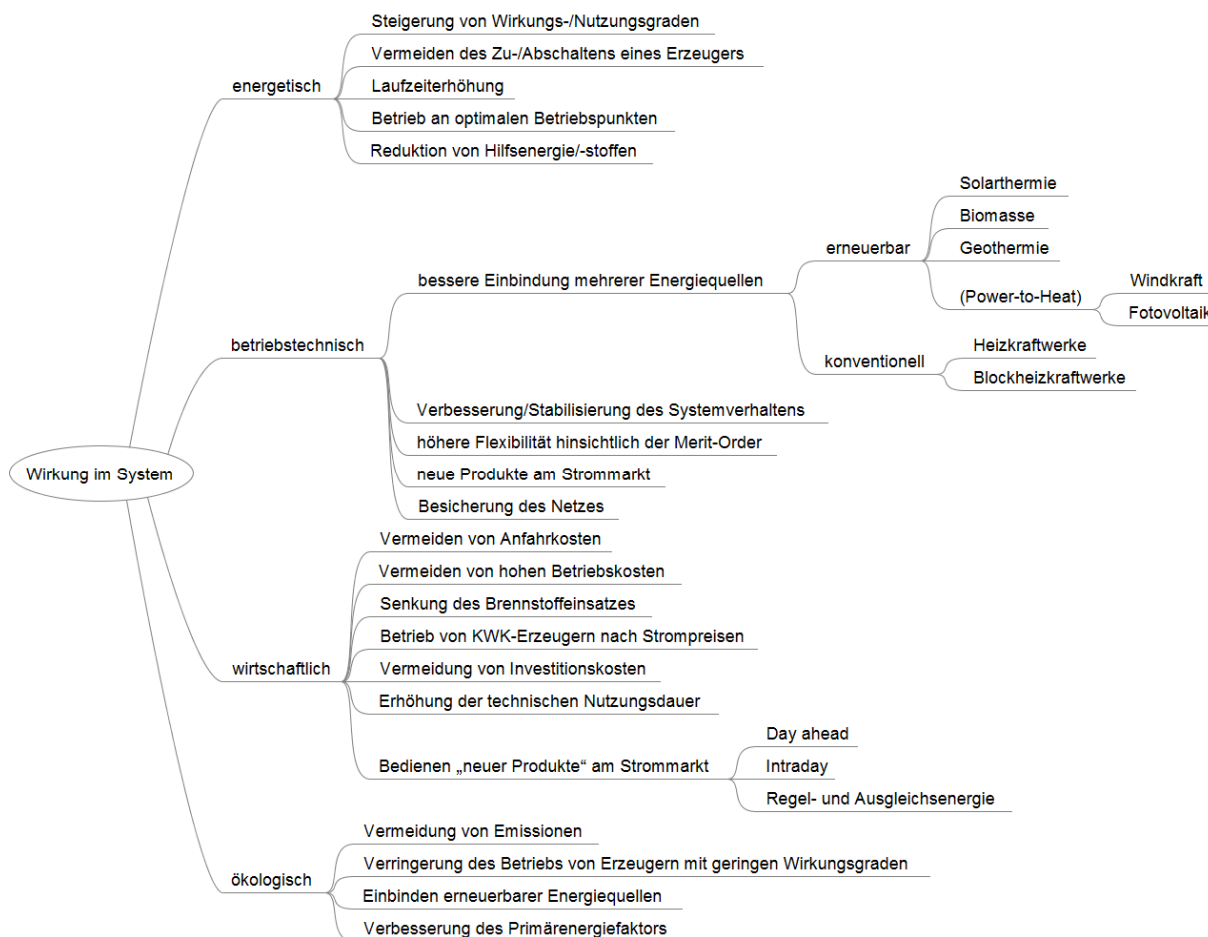


Abbildung 1: Übersicht zu möglichen Auswirkungen thermischer Energiespeicher in Wärmeversorgungssystemen⁴

² Autoren des Abschnittes: Thorsten Urbaneck, Fabian Findeisen, Jan Mücke

³ Der Dampfdruck von Wasser beeinflusst die mechanische Auslegung der Behälterkonstruktion.

⁴ Die Umwandlung von Strom in Wärme sehen die Autoren nicht unkritisch. Jedoch ist dieser Trend seitens der Fernwärmewirtschaft zurzeit existent und muss in der Abbildung aufgenommen werden.

Die Planung klassischer Fernwärmenetze sah in den letzten Jahrzehnten folgende Struktur und typische Parameter⁵ vor:

- Primärnetze (maximale Vorlauftemperatur ca. 160 °C),
- Sekundärnetze (maximale Vorlauftemperatur ca. 120 °C) und
- Terziärnetze (maximale Vorlauftemperatur ca. 90 °C).

Deswegen besteht die Möglichkeit, die oben genannte Problematik mit Druckbehältern zu umgehen und die Speicher im Netzgebiet anzuordnen. Die Behälterkonstruktion ist dann ein Flachbodentank (Abbildung 2a). Hier lassen sich sehr große und kompakte Speicher (Abbildung 3, rechts) herstellen, die niedrigere spezifische Investitionskosten und niedrigere Wärmeverluste aufweisen. Das geht mit den Anstrengungen vieler Fernwärmebetreiber einher, die die Netztemperaturen aus Effizienzgründen (Senkung der Wärmeverluste der Netze, Erhaltung hoher Volumenströme bei sinkenden Anschlussleistungen) absenken.

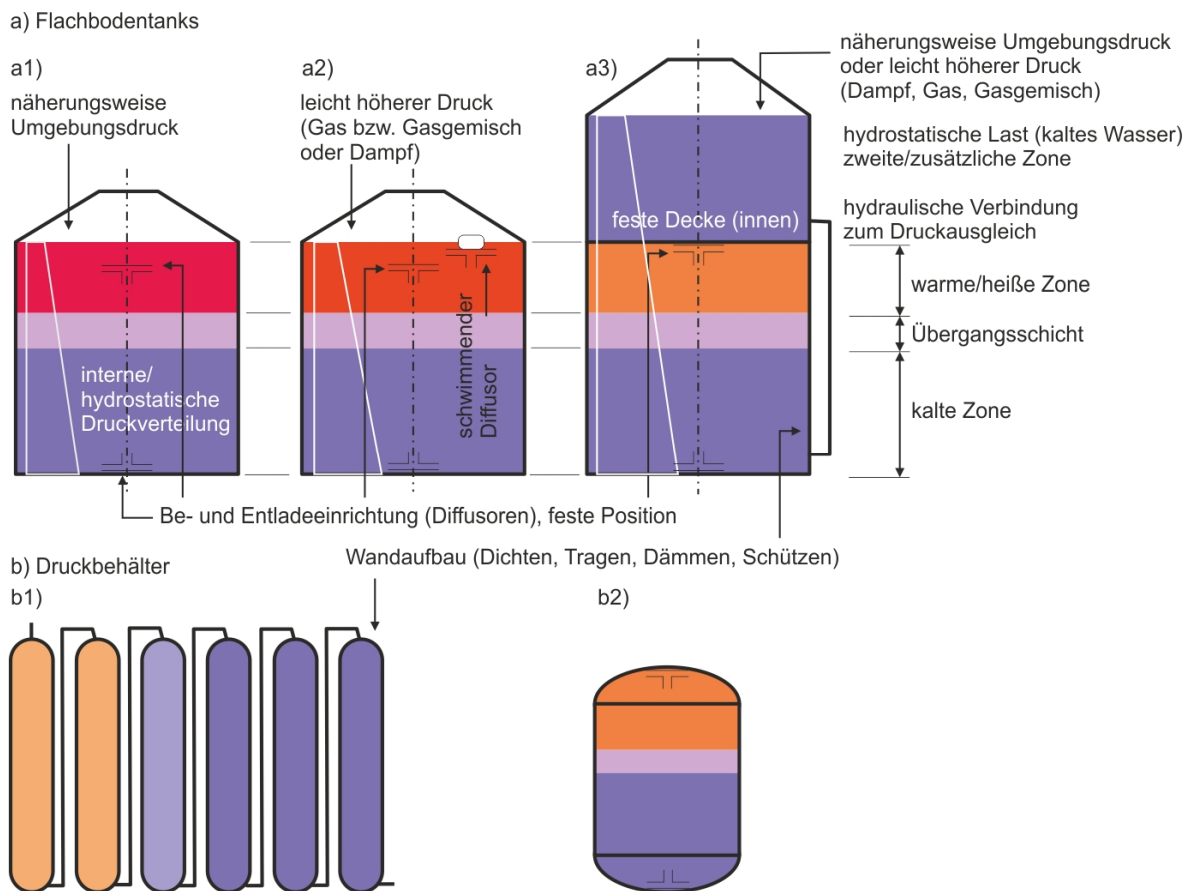


Abbildung 2: Systematisierung von Speicherkonstruktionen

Eine weitere Konstruktion ist der Zwei-Zonen-Speicher [6], [7], der ein zweites Wasservolumen als Auflastung verwendet, um höhere Temperaturen bis ca. 130 °C zu erreichen (Abbildung 2 a3). Dies erfordert aber einen zusätzlichen Bauraum und ist mit entsprechenden Mehrkosten verbunden.

⁵ Die Schwankungsbreite der maximalen Vorlauftemperaturen ist im klassischen Fernwärmesektor tatsächlich viel größer. Es wurden zumindest bis 1980 Systeme mit bis zu 350 °C ausgeführt [5].



Abbildung 3: Heißwasserspeicher 6480 m³ (links), Planung 160 °C, 22 bar, Integration in die Primärtrasse, Chemnitz, Fernwärme mit KWK, Betreiber inetz/eins [8], Warmwasserspeicher 2000 m³ (rechts), Ein-Zonen-Speicher, solares Nahwärmesystem Braedstrup (Dänemark), Betreiber Brædstrup Fjernvarme [9]

1.2 Lösungsansatz

Seit 2007 sind viele Projekte mit großen oberirdischen Kaltwasserspeichern in Deutschland umgesetzt worden [10]. Dabei hat sich im Gegensatz zu geschweißten Flachbodentanks die Speicherkonstruktion mit verschraubten und eingedichteten Segmenten (Abbildung 4) als vorteilhaft erwiesen [11]. Dafür stehen folgende Gründe:

- Einsatz von Tankspeichern auf Umgebungsdruck aus Kostengründen (Einsatz dünnwandiger Bleche, Materialminimierung) gegenüber Druckbehältern,
- dadurch Umgehung einer Einordnung in Druckbehälter-Richtlinien (Vermeidung von zyklischen Überprüfungen usw.), Speicher als Bauwerk mit einfacher Genehmigung,
- Entfall des Aushubs im Vergleich zu Erdbeckenspeichern (starke Kostenreduktion),
- deswegen starke Minimierung der Probleme hinsichtlich des Feuchteanfalls in der Wärmedämmung (Minderung der Dämmwirkung, Beeinträchtigung der Langzeitbeständigkeit),
- unproblematische Geometriegestaltung mit einer ausreichenden Speicherhöhe (wesentliche Voraussetzung für den Betrieb mit thermischer Schichtung),
- effizientere Bautechnologie und Logistik bzw. schnellere Fertigung,
- unproblematischer Einsatz an vielen Orten (z. B. keine Anforderungen an die geologische Situation) usw.

Prinzipiell ist diese Speicherkonstruktion auch für Warmwasserspeicher von Interesse. Diese Technologie lässt sich jedoch nicht ohne weitere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf hohe Betriebstemperaturen (bis 98 °C) bzw. den Einsatz in Nah- und Fernwärmesystemen übertragen.



Abbildung 4: Kaltwasserspeicher in Chemnitz, 3500 m³, Bauphase der Wand 2007 [11]

1.3 Ziele und Vorgehen

Das Verbundvorhaben hat die Entwicklung von Flachbodentank-Warmwasserspeichern in Segmentbauweise (Ein-Zonen-Speicher) zum Ziel. Der Speichertyp soll für folgende Anwendungsbereiche geeignet sein:

- Fernwärmenetze mit zentralen Heizkraftwerken und Kraft-Wärme-Kopplung, Einsatz im Netzgebiet (typischerweise als Kurzzeitspeicher),
- Nahwärmenetze mit dezentralen Blockheizkraftwerken, Einsatz als Bestandteil der Erzeugerzentrale (typischerweise als Kurzzeitspeicher),
- große solarthermische Anlagen (Kurz- und Langzeitspeicher),
- Systeme mit industrieller Abwärme.

Dabei mussten verschiedene Teilprobleme gelöst werden. An diesen orientierten sich die wesentlichen Aufgaben im Projekt:

- Entwicklung einer temperaturbeständigen und diffusionsdichten Dach- und Wandkonstruktion (Fokussierung auf die Abdichtung),
- Verbesserung der Wärmedämmung (Einsatz neuartiger Stoffe, Vermeidung von Wärmebrücken),
- Weiterentwicklung der Be- und Entladetechnik (Vermeidung von Kavitation, Anpassung der Lader an typische Betriebsfälle),
- Entwicklung einer Speicherschnittstelle (z. B. für eine leichtere Integration in Bestandsnetze),

- effizientere Gestaltung der Fertigung vor Ort bzw. der Vorfertigung und der Logistik bezüglich der Kostenreduktion.

Die Lösung der Aufgaben war im Projektverbund geplant (Abbildung 5). Die Abbildung zeigt weiterhin die Vorgehensweise. Nach der Festlegung der Anforderungen und drei typischer Speichergrößen folgen in einer ersten Stufe grundlegende Untersuchungen der Werkstoffe sowie der Entwurf und die Überprüfung der Speicherkonstruktion und Beladetechnik⁶. In einer zweiten Stufe wurde ein Wandsegment mit Dichtung bzw. ein praxisnaher Wandaufbau⁷ getestet. In der dritten Stufe erfolgte die Überführung der theoretischen und praktischen Ergebnisse auf den Pilotspeicher. Die vielen und verschiedenen Versuche dienten zur Absicherung des späteren Einsatzes bzw. des Nachweises der technischen Machbarkeit. Weiterhin waren flankierende Maßnahmen vorgesehen.

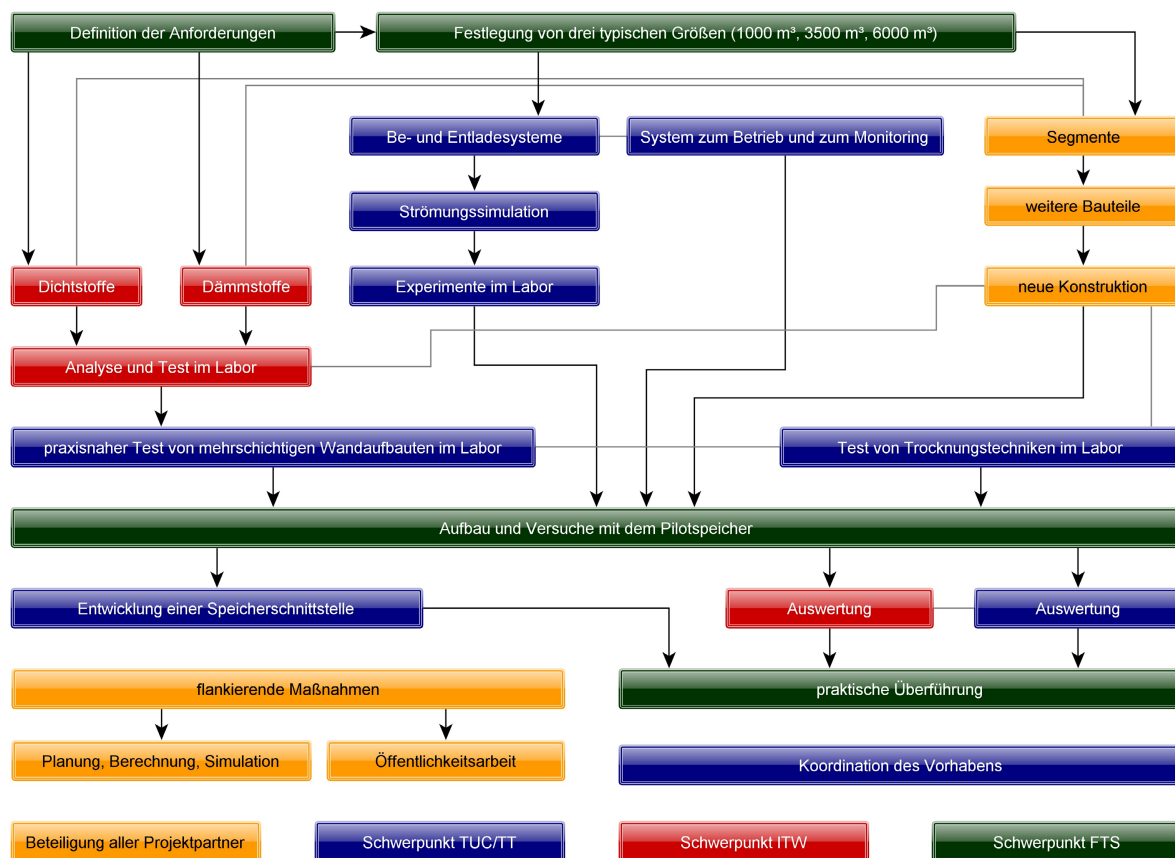


Abbildung 5: Übersicht zur Arbeitsteilung bzw. zur Vorgehensweise im Verbundvorhaben

⁶ Die Arbeiten wurden parallel weitergeführt und dienten zur sukzessiven Optimierung.

⁷ Zunächst finden Untersuchungen von kleinen Proben (Dicht- und Dämmstoffe) statt. Der praxisnahe Test von Wandaufbauten unterscheidet sich davon, dass ein kompletter Wandausschnitt mit Verkleidung, Wärmedämmung, Wandsegment inklusive Eindichtung realen Bedingungen ausgesetzt wurde. Dies dient zur Untersuchung der Wechselwirkungen zwischen den Stoffen bzw. Phänomene im Wandaufbau. Im Unterschied zum Pilotspeicher konnten hier leichter Umbauten vorgenommen werden und die messtechnische Erschließung gestaltete sich leichter.

1.4 Darstellung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projektes wurden entsprechend des Projektfortschrittes veröffentlicht [12] bis [29]. Eine Anmeldung [32] liegt im Bereich der Beladetechnik vor, die auf Entwicklungsarbeiten im Projekt zurückgehen. Die Darstellung im Internet [33] erfolgte kontinuierlich. Die Vorträge zum Projekt sind unter 1) bis 17) (Seite 185) aufgeführt.

Tabelle 1 liefert eine Übersicht zu den Veröffentlichungen bzw. zu den erreichten Ergebnissen, die in diesem Fall nach den Schwerpunkten geordnet sind. Im Mittelpunkt der Forschung und Entwicklung standen der Speicherbau, die Systemintegration, das Be- und Entladesystem, der Betrieb, das Monitoring und die Systemoptimierung.

Tabelle 1: Veröffentlichungen mit einer inhaltlichen Zuordnung

Schwerpunkt	Quelle
Übersicht zu Wärmespeichern, Anwendung	[12], [28], 1), 2), 7), 12)
Projektvorstellung	[12], [14], [16], 1), 2), 5), 9)
Dichtstoffe	[30], 6)
Aufbau und Funktion	[15], [16], [28], 16), 17)
Betriebserfahrung	[15], [19], [29], 8), 13), 16), 17)
Wärmedämmung	[13], [18], [19], [31], 3), 4), 11), 15)
Be- und Entladung	[15], [20], [21], [22], [23], [24], [25], [29], 10), 14)
Simulation	[20], [21], [22], [23], [24], [25], [29], [93], [100]
Auslegung, Planung, Optimierung	[15], [16], [19], [27], [36]

1.5 Projektablauf

Die Ziele und das gemeinsame Vorgehen im Projekt erläutert Abschnitt 1.3. Den grundlegenden Ablauf des Vorhabens beschreiben folgende Punkte:

- Ausführungsplanung (2014 bis 2016),
- Bau des Demonstrators (2016 bis 2017),
- Versuche mit dem Demonstrator (2017 bis 2018),
- Begleitforschung (2014 bis 2018).

Während der gesamten Projektlaufzeit von 2014 bis 2018 liefen CFD-Simulationen und Experimente in den Laboren begleitend zu den o. g. Punkten.

1.6 Öffentlichkeitsarbeit

Im Rahmen des Projektes erfolgte eine Reihe von Maßnahmen zur Öffentlichkeitsarbeit. Dazu gehören:

- eine Internetseite [33],
- Demonstration der Technik vor Ort in Nortorf,
- Fachpublikation in Zeitschriften und bei Tagungen [18] bis [31] und 1) bis 17),
- Information von Fachverbänden, Betreibern und Planern.

2 Voruntersuchung von Werkstoffen

2.1 Anforderungen⁸

2.1.1 Generelle Anforderungen

Folgende Anforderungen ergeben sich aus den Betriebsparametern und der geplanten Bautechnologie:

- dauerhafte Temperaturbeständigkeit bis 95...98 °C,
- chemische und physikalische Stabilität über lange Zeiträume und
- Verträglichkeit der Werkstoffe untereinander,
 - keine Korrosion,
 - geringe Brennbarkeit,
 - kein biologisches Wachstum,
- Erhalt der Wasserqualität (Anforderung der Fernwärmewirtschaft),
- keine gesundheitsschädlichen Emissionen während der Verarbeitung,
- eine einfache, zweckmäßige und kostengünstige Montage,
- ökologische Gesichtspunkte,
- möglichst geringe Material-, Verarbeitungs- und Folgekosten.

2.1.2 Lastenheft Wärmedämmung

Folgende allgemeine Anforderungen können für Dämmstoffe formuliert werden:

- möglichst geringe Wärmeleitfähigkeit,
 - mit steigender Temperatur,
 - mit steigender Feuchte,
- großer Bereich bzgl. der Anwendungstemperatur (minimal -20 °C, maximal 98 °C),
- geringe Wärmeausdehnung,
- Erhalt von Form und Lage,
- hoher Widerstand gegen Wasserdampfdiffusion oder gute Entfernung des Wassers aus der Dämmung,
- geringes Wasseraufnahmevermögen des Basismaterials,
- keine Beeinträchtigung bzw. kein biologischer Befall in Verbindung mit Feuchtigkeit,
- möglichst nicht brennbar, keine Entwicklung von Rauch oder Freisetzung schädlicher Substanzen bei sehr hohen, außerplanmäßigen Temperaturen,
- geeignete Form zur Verarbeitung,
 - Schüttgut,
 - Plattenmaterial mit passender Montage (Spannen, Kleben, Klemmen, etc.),
 - Schaum usw.,
- Lieferbarkeit notwendiger Zusatzstoffen (z. B. Kleber, Haftvermittler).

Wand und Decke

Gegenüber geschweißten Flachbodentanks ist der Wandbereich mit vielen Schrauben durchdrungen. Weitere Elemente wie Abstandshalter für das Verkleidungsblech und Profile zur Sta-

⁸ Autoren des Abschnittes: Jan Mücke, Fabian Findeisen, Thorsten Urbaneck

bilisierung erschweren eine einfache Montage von Plattenmaterial. Die geplante Schwimmdecke erfordert ein sehr leichtes Dämmmaterial (sehr geringe Dichte), wovon auch der Wandaufbau profitiert.

Boden

Im Bodenbereich ist besonders die Druckfestigkeit (bis 20 m Wassersäule) von besonderer Bedeutung. Es kann auch zur Biegebeanspruchung kommen.

2.1.3 Lastenheft Dichtung

Fugen- und Flächendichtungen müssen folgende Kriterien erfüllen:

- hohes Haftvermögen,
- Feuchtigkeitsbeständigkeit,
- wasserdicht/hohes Wassereindringwiderstand,
- hoher Wasserdampf-Diffusionswiderstand,
- hinreichende Druckfestigkeit (Wassersäule bis 20 m),
- thermische Dehnung je nach umgebender Struktur,
- keine Auslösung von Stoffen (Erhalt der Wasserqualität).

Fuge

Bei Fugen kommen folgende spezielle Anforderungen hinzu:

- gute Haftung an den Beschichtungen der Platten wie Emaille, Epoxidharz, Zink, Edelstahl und dem Beton,
- Einsatz bei vielen potenziellen Fugen,
 - Platte-Platte (Wand- und Deckenaufbau),
 - Platte-Betonfundament (Kehlnaht),
 - Platte und Einbauteile (z. B. Kabel- und Rohrdurchführungen) usw.,
- elastisch verformbar,
- Verarbeitbarkeit über mehrere Stunden,
- nach Verarbeitung kurze Zeit für Aushärtung,
- hoher Temperaturbereich zur Verarbeitung und Aushärtung,
- Verarbeitbarkeit der Gebindegröße vor Ort.

Fläche

Für die Bodenplatte aus Stahlbeton werden folgende zusätzliche Anforderungen gestellt:

- gute Haftung auf Betonoberflächen,
- Reißfestigkeit,
- zulässige Wärmeausdehnung,
- geeignete Anbringung (z. B. Kleben, Spritzen, Streichen).

2.2 Wärmedämmstoffe^{9, 10}

Anhand der oben definierten Kriterien galt es geeignete Wärmedämmstoffe zu identifizieren und qualifiziert zu bewerten. Generell reicht dafür eine alleinige theoretische Überprüfung der Herstellerangaben nicht aus. Zum einen sind nicht sämtliche für den Anwendungszweck benötigten Eigenschaftswerte vorhanden und zum anderen sind die Prüfbedingungen für die unterschiedlichen Wärmedämmstoffe oft nicht untereinander vergleichbar.

Nach einer umfangreichen Recherche geeigneter Wärmedämmstoffe wurde zunächst anhand der Herstellerangaben eine Vorauswahl getroffen (siehe Tabelle 2). Die Wärmedämmstoffe sind klassifiziert als druckfeste Materialien für den Fundamentbereich (Boden) und kostengünstigere Materialien für den Wand- und Deckenbereich des Speichers. Für den Bodenbereich gelten bisher Schaumglasplatten (SGP) als erprobte, zuverlässige Wärmedämmung. Diese sind jedoch vergleichsweise teuer. Daher war es ein Ziel dieser Voruntersuchung von Materialien, kostengünstigere Wärmedämmstoffe zu identifizieren, die bei Temperaturen bis 100 °C eine ausreichende Druckfestigkeit aufweisen. Sämtliche vorausgewählten Wärmedämmstoffe wurden in den Laboren des ITW bzgl. der relevanten Eigenschaften untersucht.

Tabelle 2: Vorauswahl an Wärmedämmstoffen. In Klammern sind die jeweiligen Handelsnamen der Hersteller genannt

Wärmedämmstoff	Handelsname	Einsatzbereich	Preis*) [€/m ³]
PUR-Recycling-Granulat	Rathipur, GranuPUR	Wand; Decke	60 - 85
Glaswolle-Matten	N.N.	Wand; Decke	50 - 210
Steinwolleflocken	ProtectFill	Wand; Decke	96 - 144
Schaumglasplatten (SGP)	Floorboards T4+	Boden	500
extrudierter Polystyrolschaum (XPS)	Styrodur 5000CS	Boden	320
Polyisocyanurat-Hartschaumplatten (PIR)	E 40, E 80, B2 145	Boden	260 - 740
Phenolharzschaumplatten (PHS)	Kooltherm 1200	Boden	480
Mikroporöse Dämmplatte (MDP)	WDS® Ultra	Boden	2500

*) Preise sind den Preislisten und Angeboten der Hersteller entnommen. In den Preisen ist keine Umsatzsteuer enthalten.

Für alle in Tabelle 2 aufgelisteten Wärmedämmstoffe wurde die Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt. Die für den Boden bestimmten Wärmedämmstoffe wurden zudem hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit bei erhöhten Temperaturen geprüft. Die Methodik und die Ergebnisse der Untersuchungen sind in den folgenden Unterkapiteln aufgeführt.

2.2.1 Wärmeleitfähigkeitsuntersuchungen

Die Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmstoffe erfolgten in einer Zwei-Platten-Apparatur (ZPA) in Anlehnung an DIN EN 12667 und DIN EN 12664 (siehe Abbildung 6). Die dargestellten Probenbehälter wurden für die Aufnahme von schüttfähigen Dämmstoffen verwendet. Für formstabile Probenkörper wurden diese nicht benötigt. Um so-

⁹ Autoren des Abschnittes: Stephan Lang, Dominik Bestenlehner, Harald Drück.

¹⁰ Die im Projekt OBSERW durchgeführten Untersuchungen von Wärmedämmstoffen basieren teilweise auf Erkenntnissen und Ergebnissen, die aus dem EU-Projekt „EINSTEIN“ resultieren [34].

wohl den Messbereich als auch den Schutzheizbereich der ZPA mit dem zu untersuchen- den Material bestücken zu können, werden Proben mit einer Fläche von 900 mm x 900 mm benötigt. Die Stärke der Proben sollte zwischen 40 mm und 150 mm liegen, um eine hohe Genauigkeit der Messergebnisse (maximale Abweichung: $\pm 5\%$) zu gewährleisten. Die Pro- ben der Dämmstoffe wurden vor der Messung mindestens 48 Stunden bei einer Temperatur von ca. 23 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von ca. 50 % gelagert.

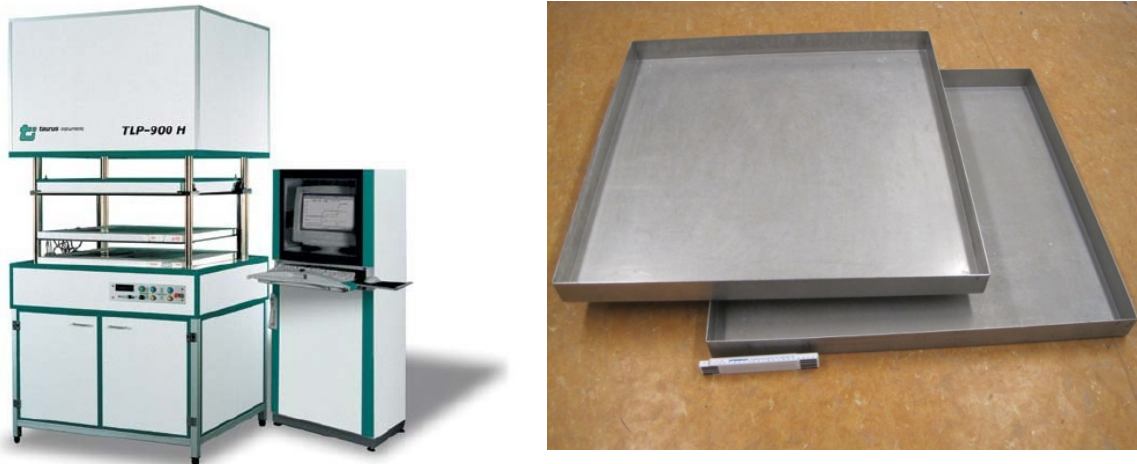


Abbildung 6: Zwei-Platten-Apparatur des Herstellers Taurus Instruments am ITW (links) Probenbehälter (rechts)

In Abbildung 7 sind die Ergebnisse der Wärmeleitfähigkeitsmessungen dargestellt. Wie bei hochporösen Materialien zu erwarten ist, steigt die Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmstoffe mit der Temperatur. Die geringsten Wärmeleitfähigkeiten der Wärmedämmstoffe für den Bodenbereich besitzen das PIR mit einer Dichte von 40 kg/m³ und die MDP. Die höchste Wärmeleitfähigkeit wurde für die SGP gemessen. Bei den Wärmedämmstoffen für den Wand- und Deckenbereich besitzt das PUR-Granulat die geringste Wärmeleitfähigkeit.

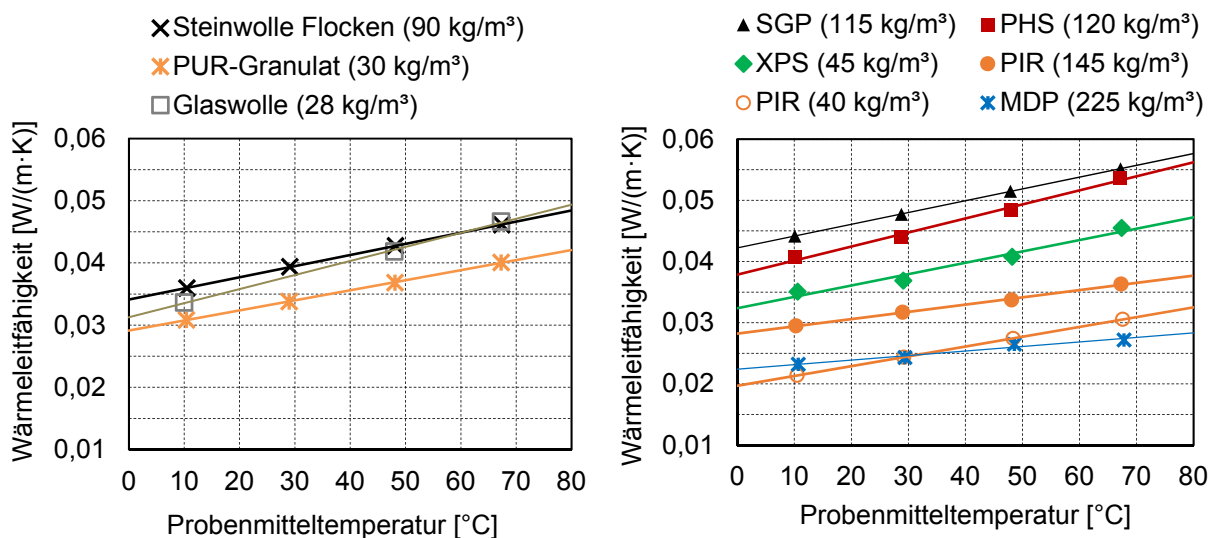


Abbildung 7: Effektive Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur, links für Wärmedämmstoffe für den Wand- und Deckenbereich, rechts für den Bodenbereich (in Klammern die Dichte der Wärmedämmstoffe; Abkürzungen s. Tabelle 2)

Je geringer die Wärmeleitfähigkeit ist, desto weniger Material muss eingesetzt werden, um einen vorgegebenen Wärmedurchgangskoeffizienten zu erreichen. Um die benötigten Kosten der Wärmedämmstoffe miteinander vergleichen zu können, wurde der Preis je Quadratmeter zu dämmender Fläche berechnet, mit der ein Wärmedurchgangskoeffizient¹¹ von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ bei einer Dämmstoff-Mitteltemperatur von 50 °C erreicht wird. Dabei wurde die vereinfachte Annahme einer ebenen zu dämmenden Wand getroffen.

Die benötigte Dämmdicke ergibt sich aus einer Division der Wärmeleitfähigkeit bei 50 °C mit dem Wärmedurchgangskoeffizient von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Die Multiplikation der benötigten Dämmdicke mit den in Tabelle 2 angegebenen Preisen in $\text{€}/\text{m}^3$ ergibt die Dämmstoff-Kosten je Quadratmeter zu dämmender Fläche. Die Ergebnisse sind Tabelle 3 zu entnehmen.

Tabelle 3: Flächenbezogene Dämmstoff-Kosten bei Vorgabe eines Wärmedurchgangskoeffizienten von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ und einer Dämmstoff-Mitteltemperatur von 50 °C

Wärmedämmstoff	Handelsname	Einsatzbereich	Kosten [$\text{€}/\text{m}^2$]
PUR-Recycling-Granulat	Rathipur, GranuPUR	Wand; Decke	4,4 – 6,3
Glaswolle-Matten	N.N.	Wand; Decke	4,2 – 17,6
Steinwolleflocken	ProtectFill	Wand; Decke	8,3 – 12,4
Schaumglasplatten (SGP)	Floorboards T4+	Boden	52
extrudierter Polystyrolschaum (XPS)	Styrodur 5000CS	Boden	26
Polyisocyanurat-Hartschaumplatten (PIR)	E 40, E 80, B2 145	Boden	14 – 50
Phenolharzschaumplatten (PHS)	Kooltherm 1200	Boden	47
Mikroporöse Dämmplatte (MDP)	WDS® Ultra	Boden	130
Mikroporöse Dämmplatte im Vakuum	WDS® Ultra	Boden	35

Für den Wand- und Deckenbereich können mit Glaswolle-Matten (ab $4,2 \text{ €}/\text{m}^2$) und PUR-Recycling-Granulat (ab $4,4 \text{ €}/\text{m}^2$) die geringsten flächenbezogenen Kosten erreicht werden. Die Wärmedämmstoffe für den Bodenbereich, die als Alternative für Schaumglasplatten ausgewählt wurden, erreichen günstigere flächenbezogene Kosten als Schaumglasplatten. Eine Ausnahme hiervon ist die mikroporöse Dämmplatte. Diese Art von Dämmplatten wird aufgrund ihrer kleinen Poren häufig in Vakuumdämmpaneelen eingesetzt. Durch das Evakuieren der Luft aus den Poren kann die effektive Wärmeleitfähigkeit des Materials stark abgesenkt werden. Es konnten keine Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit der mikroporösen Dämmplatte WDS® Ultra im Vakuum durchgeführt werden, jedoch stehen Herstellerangaben für vergleichbare Materialien zur Verfügung. So erreicht das Material Vacupor® NT (Hersteller ist wie bei WDS® Ultra die Firma Morgan Advanced Materials) nach Datenblatt [37] im Vakuum eine Wärmeleitfähigkeit von $0,0043 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ bei 50 °C . Da WDS® Ultra nicht für den Einsatz in einem Vakuumdämmpaneel optimiert ist¹² und um Wärmebrücken zu berücksichtigen, die sich aufgrund der vakuumdichten Umhüllung des Materials zwangsläufig ergeben, wurde für die Wärmeleitfähigkeit im Vakuum ein konservativer Wert von $0,007 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ angenommen. Damit werden mit $35 \text{ €}/\text{m}^2$ geringere flächenbezogene Dämmstoff-Kosten erreicht als für Schaumglasplatten ($52 \text{ €}/\text{m}^2$). Allerdings sind hierbei Kosten für eine vakuumdichte Umhüllung, wie z. B. für einen Behälter aus dünnwandigem Blech mit Anschluss für die Evakuierung,

¹¹ Beispielhafte Annahme.

¹² WDS® Ultra wurde aufgrund seiner höheren angegebenen Druckfestigkeit gegenüber Vacupor® NT ausgewählt.

nicht berücksichtigt. Treten im Bodenbereich Temperaturen $< 80\text{ °C}$ auf und ist die Druckfestigkeit für die Wassersäule des Speichers ausreichend, können auch marktverfügbare Vakuumdämmpaneele verwendet werden, die mit einer Kunststoff-Verbundfolie umhüllt sind.

2.2.2 Druckfestigkeitsuntersuchungen

Die im Rahmen des Projekts OBSERW entwickelten Warmwasserspeicher können eine Wassersäule bis maximal 20 m erreichen, was einem Druck im Bodenbereich von ca. 0,2 MPa (2 bar) entspricht. Außerdem können im Bodenbereich Temperaturen bis 98 °C erreicht werden. Die Wärmedämmstoffe im Bodenbereich müssen also bei diesen Bedingungen möglichst geringe Stauchungen aufweisen. Hohe Stauchungen können durch das daraus resultierende Absinken der Bodenplatte zu einem Versagen der Dichtstoff-Kehlnaht führen, die den Speicher im Bodenbereich abdichtet. Die Konstruktion ist in den Abschnitten 3.4 und 7.1 dargestellt.

Kurzzeit-Druckversuche

Zunächst wurden die Wärmedämmstoffe für den Bodenbereich in Kurzzeit-Druckversuchen (Belastungsdauer: 1 h) bei Raumtemperatur ($23 \pm 5\text{ °C}$), 70 °C und 100 °C geprüft. Der Prüfstand ist in Abbildung 8 dargestellt. Zuerst fand dafür die Herstellung von würfelförmigen Proben mit einer Kantenlänge von 30 mm aus den Wärmedämmstoffen statt. Diese wurden in den Hohlzylinder platziert (siehe Abbildung 9). Im Falle einer Temperaturbeaufschlagung von über Raumtemperatur erfolgte das Anbringen eines Temperatursensors seitlich an der Probe. Auf die Probe wurde dann als Vorlast der Druckstempel mit einem Gewicht von 2,4 kg aufgelegt und der Abstand der Druckstempel-Oberkante zur Oberkante des Hohlzylinders gemessen. Daraufhin findet eine zusätzliche Belastung der Probe über den Druckstempel statt, um die gewünschte Drucklast einzustellen. Nach einer Belastungsdauer von 1 h erfolgt eine erneute Messung des Abstands der Druckstempel-Oberkante zur Oberkante des Hohlzylinders. Zur Berechnung der prozentualen Stauchung wurde die Differenz der beiden Messungen ins Verhältnis zur Anfangshöhe der Probe gesetzt. Dieses Vorgehen erfolgt bei unterschiedlichen Lasten (Gewichten) und den oben genannten Temperaturen. Diese Versuchsdurchführung wurde für jedes Material bei jeder Belastungsart an mindestens drei Proben durchgeführt. Der Mittelwert der daraus resultierenden Messungen bildete jeweils einen Messpunkt. Anschließend erfolgte eine detaillierte Überprüfung der Wärmedämmstoffe, die bei diesen Kurzzeit-Druckversuchen die besten Ergebnisse zeigten.

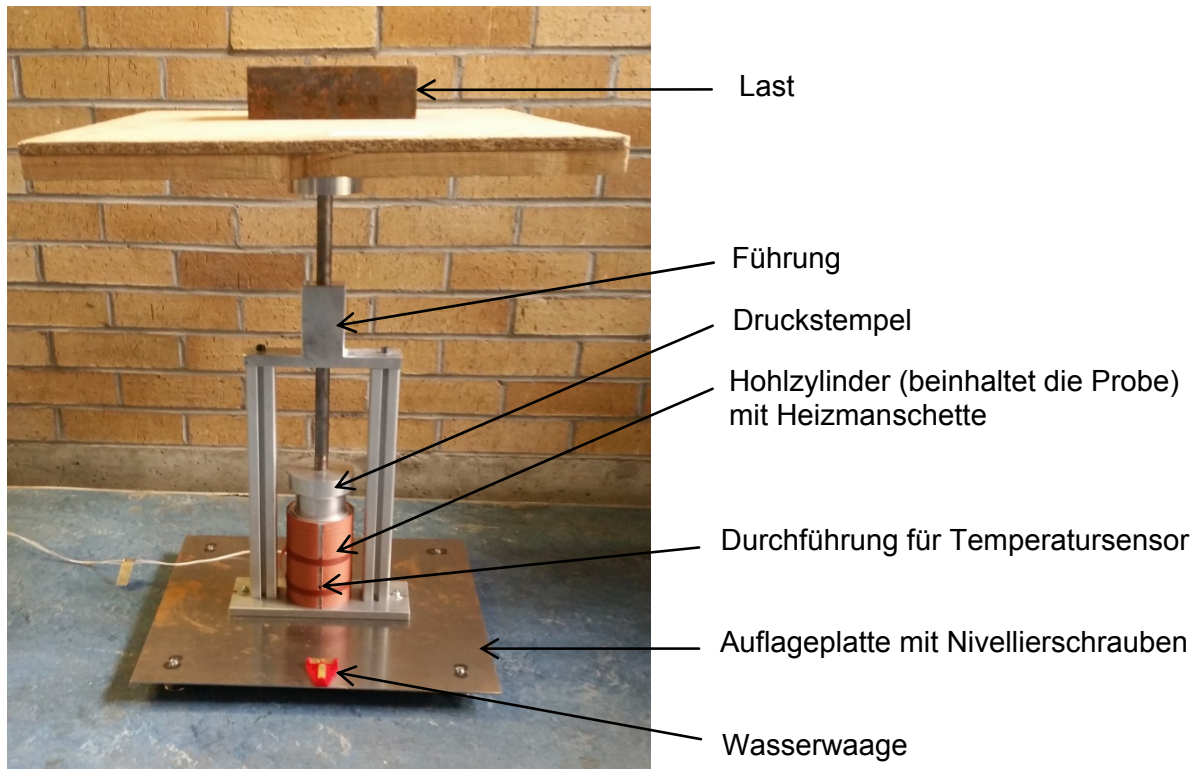


Abbildung 8: Kurzzeit-Druckfestigkeits-Prüfstand

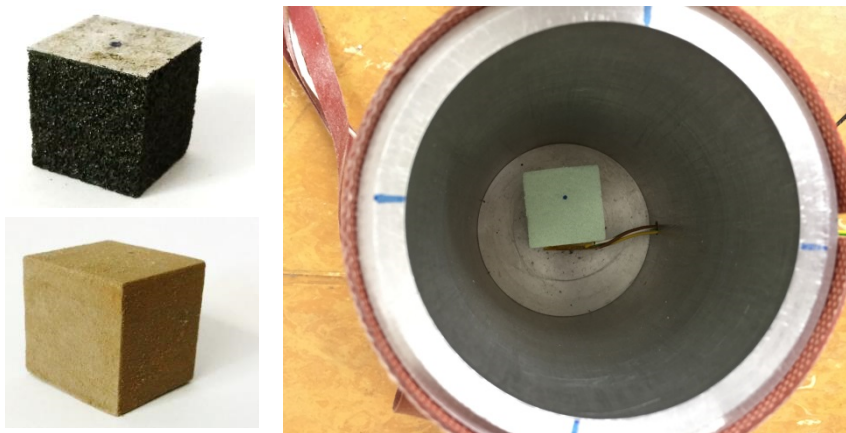


Abbildung 9: oben links: Probe aus Schaumglasplatte mit Deckschicht aus Bitumen und Vlies; unten links: Probe aus Phenolharzschäum; rechts: Probe aus extrudiertem Polystyrolhartschaum im Hohlzylinder des Kurzzeit-Druckfestigkeits-Prüfstands

Die Kurzzeit-Druckversuche konnten zeigen, dass sämtliche kunststoffbasierten Wärmedämmstoffe für die höchsten zu erwartenden Belastungen (0,2 MPa Druck bei einer Temperatur von 100 °C) nicht geeignet sind. Somit wurden XPS, PIR und PHS für die Anwendung im entsprechend belasteten Fundamentbereich ausgeschlossen. Die Wärmedämmstoffe MDP und SGP erschienen geeignet und wurden daraufhin in Langzeit-Druckversuchen geprüft.

Langzeit-Druckversuche

Hierzu wurde ein Prüfstand zur Messung des Langzeit-Kriechverhaltens von Wärmedämmstoffen bei Druckbeanspruchung (hier auch als Langzeit-Druckfestigkeit bezeichnet) in Anlehnung an EN 1606 aufgebaut. Aufgrund der notwendigen langen Messdauer besteht der Prüfstand aus mehreren einzelnen Prüfeinrichtungen, wodurch das gleichzeitige Messen mehrerer

Proben stattfinden kann. Die Prüfeinrichtungen wurden in einen Wärmeschrank eingebracht, um eine simultan zur Druckbeanspruchung wirkende Temperaturbeanspruchung zu untersuchen. Um zu gewährleisten, dass sowohl keine signifikante Durchbiegung der Auflageplatten stattfindet als auch diese orthogonal zur Schwerkraftrichtung orientiert sind, erfolgte die Platzierung der Auflageplatten auf biegesteifen Stahl-Profilen, die wiederum auf die Gitter des Wärmeschanks gelegt wurden. Nach EN 1606 ist eine Extrapolation des Kriechverhaltens für eine bis zu 30-fache Zeit der Prüfdauer zulässig. Nach der Mindestmessdauer von 90 Tagen ist somit beispielsweise eine Aussage über das Kriechverhalten für einen Zeitraum von 7,4 Jahren zulässig. Der Prüfstand ist in Abbildung 10 dargestellt.

Es erfolgt das Platzieren der würfelförmigen Dämmstoff-Probe auf einer Auflageplatte aus Aluminium oder Stahl. Als Last dient ein Stahlquader auf der Probe. Dieser wird an den vier vertikalen Seiten durch Profile geführt, um ein Verkippen zu verhindern. Auf zwei der vier Führungsprofile sind Maßstäbe in Millimeter-Unterteilung befestigt und direkt daneben parallel dazu ist jeweils eine Noniuskala auf dem Stahlquader angebracht. Somit lassen sich Stauungen über das Absinken der Stahlquader mit einer Auflösung von 0,1 mm bestimmen. Die Messungen fanden bei 100 °C im Wärmeschrank statt. SGP wurde bei einem Druck von 0,2 MPa geprüft, was ca. der maximalen Wassersäulenhöhe der Speicherbaureihe von 20 m entspricht. MDP wurde bei 0,3 MPa geprüft, mit der Annahme eines Einsatzes im Vakuum in einer flexiblen Außenhülle. Dadurch resultiert aufgrund des Luftdrucks bereits ein Vordruck von ca. 0,1 MPa. Die Ergebnisse der Messungen und der Extrapolation nach EN 1606 sind in Abbildung 11 und Abbildung 12 dargestellt.

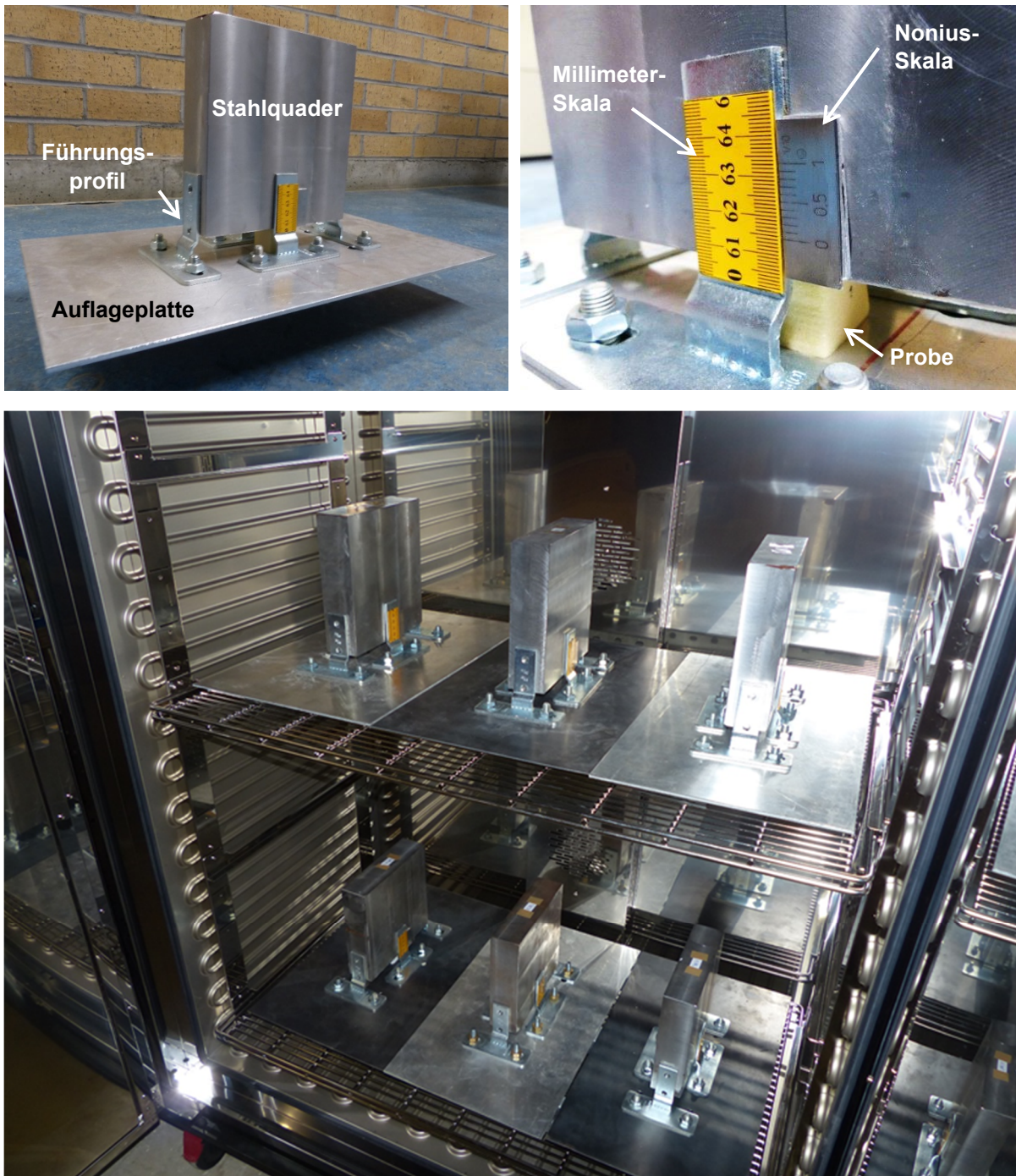


Abbildung 10: Langzeit-Druckfestigkeits-Prüfstand

Nach den Messergebnissen und den daraus in Anlehnung an EN 1606 durchgeführten Extrapolationen¹³ wären bei den oben angegebenen Belastungsarten nach einer Belastungsdauer von 8 Jahren Stauchungen von 3,25 % für SGP und 13,81 % für eine evakuierte MDP zu erwarten. Aufgrund der deutlich geringeren Wärmeleitfähigkeit von evakuierter MDP gegenüber SGP, würde jedoch eine deutlich geringere Dämmdicke benötigt. Für die reale Anwendung ist letztlich die absolute zu erwartende Stauchung entscheidend.

Um einen Wärmedurchgangskoeffizient von $0,5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ zu erreichen, wird eine Dämmdicke von 86 mm SGP oder von 14 mm evakuierter MDP benötigt. Damit ergäbe sich nach 8 Jahren

¹³ Die Berechnung wurde anhand der sogenannten Findley-Gleichung durchgeführt [42].

eine absolute Stauchung von 3,38 mm für SGP und von 1,93 mm für die evakuierte MDP. Dabei ist außerdem zu beachten, dass ein Vordruck von 0,1 MPa und damit eine gewisse Vorstauchung bei der evakuierten MDP bereits vor dem Befüllen des Speichers anliegen würde, so dass eine noch geringere Reststauchung zu erwarten ist.

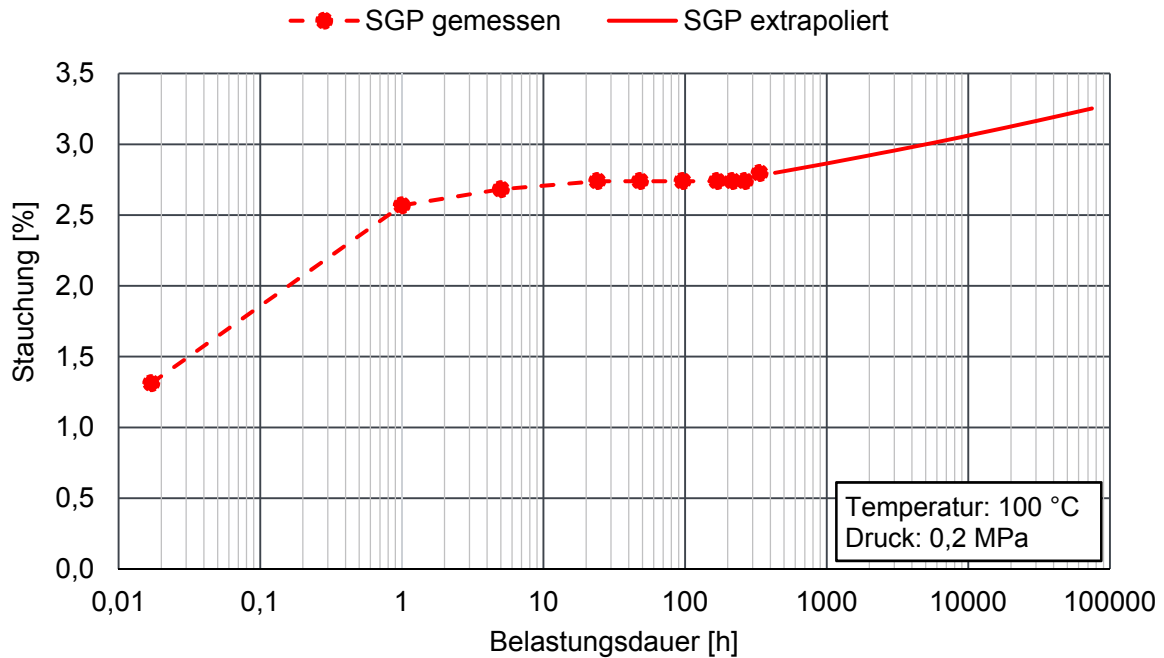


Abbildung 11: Langzeit-Druckfestigkeit einer Schaumglasplatte (SGP)

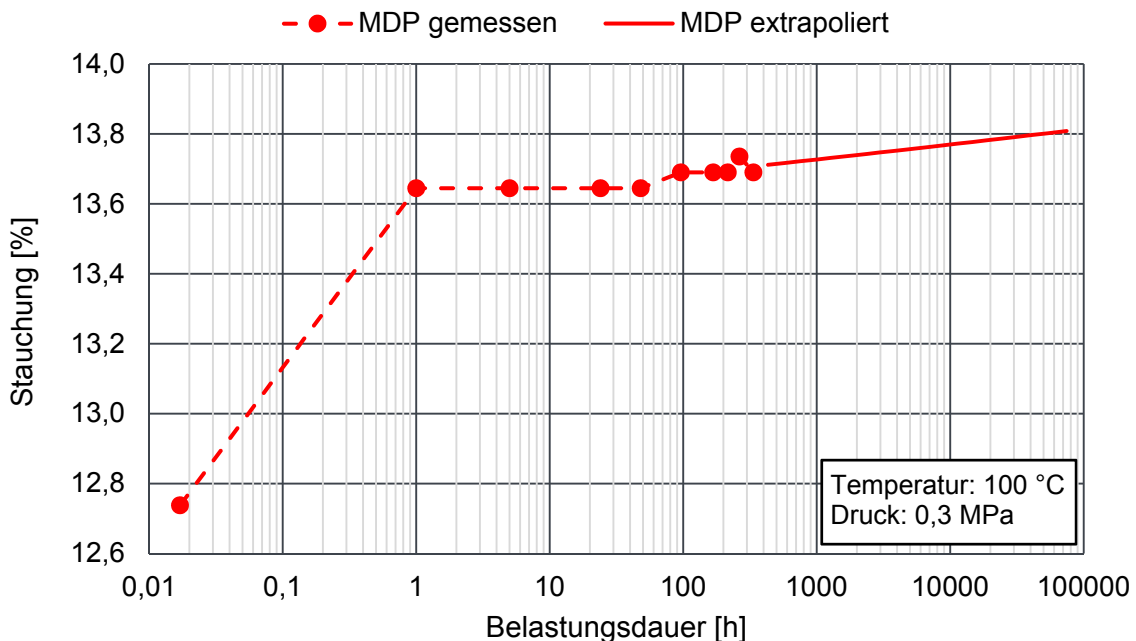


Abbildung 12: Langzeit-Druckfestigkeit einer evakuierten mikroporösen Dämmplatte (MDP)

2.2.3 Auswahl der Wärmedämmstoffe für den OBSERW-Demonstrator

Als Wärmedämmstoff für den Boden des Demonstrators wurden die Schaumglasplatten Floorboards T4+ ausgewählt. Diese gelten bisher als sicherste Variante für die gewählte Konstruktion der OBSERW-Baureihe. Mit evakuierten mikroporösen Dämmplatten sind zwar geringere

Dämmstoffkosten und geringere absolute Stauchungen zu erwarten, jedoch sind vor dessen Einsatz weitere Untersuchungen beispielsweise bezüglich der vakuumdichten Hülle notwendig. Diese waren im Bearbeitungszeitraum des Projekts nicht mehr möglich. Es konnte jedoch das Potential von evakuierten mikroporöse Dämmplatten wie Vakuumdämmpaneelen als Alternative zu Schaumglasplatten für diesen Anwendungszweck gezeigt werden.

Für den Wand und Deckenbereich erfolgte die Auswahl des PUR-Recycling-Granulats Rathipur. Zwar sind mit Glaswolleplatten geringfügig niedrigere Dämmstoffkosten zu erreichen (vgl. Tabelle 3), jedoch sind diese aufwendiger an der Speicherhülle zu befestigen als ein Dämmstoffgranulat wie Rathipur. Letzteres kann innerhalb weniger Stunden in den Zwischenraum aus Verkleidung und Speicherwand (Konstruktion siehe Abschnitt 7.1) eingeblasen werden. Zudem handelt es sich bei Rathipur um ein Recycling-Material. Somit kann mit dieser Auswahl ein nachhaltiges und innovatives Produkt untersucht und verwendet werden.

Weitere umfangreiche Untersuchungen zu Rathipur sind in Abschnitt 3.1 dokumentiert.

2.3 Dichtstoffe¹⁴

Die innere Speicherwand, die das Speichermedium Wasser fasst, ist aus beschichteten, miteinander verschraubten und gegeneinander abgedichteten Wandsegmenten aus Stahl aufgebaut (siehe Abschnitt 7.1). Die Beständigkeit der eingesetzten Dichtstoffe sowie die Haftung der Dichtstoffe an den Speicherwandsegment-Oberflächen sind essentiell für die Funktionsfähigkeit des Speichers. Ein Versagen der Dichtung ist gleichbedeutend mit einem Versagen des Speichers.

Die Speicherbauart hat sich mit dafür geeigneten Dichtstoffen bereits bei Kältespeichern bewährt (siehe Abschnitt 1.2). Im Falle von Warmwasserspeichern ist der Dichtstoff jedoch höheren Temperaturen bis 98 °C ausgesetzt. In diesem Temperaturbereich ist der Dichtstoff, der bisher bei den Kaltwasserspeichern zum Einsatz kam, nicht anwendbar. Es mussten also neue Dichtstoffe identifiziert und geprüft werden.

Die Firma farmatic Anlagenbau GmbH (FAB) hat die in Tabelle 4 aufgelisteten Dichtstoffe als potentiell für den Warmwasserspeicher geeignet identifiziert. Diese wurden vom ITW der Universität Stuttgart hinsichtlich ihrer Beständigkeit gegenüber Temperatur- und Druckbelastung nach künstlicher Alterung und hinsichtlich der Haftung auf unterschiedlichen Oberflächenbeschichtungen von Speicherwandsegmenten untersucht.

Tabelle 4: Für Untersuchungen ausgewählte Dichtstoffe [38], [39], [40]

Herstellerbezeichnung	Hersteller	Dichtstoffart	max. Einsatztemperatur ^{**})
3M 760	3M	k. A.	100 °C
Dow Corning® 732	Dow Corning	1-K Silikon [*])	180 °C (kurzzeitig 205 °C)
Dow Corning® 7091	Dow Corning	1-K Silikon [*])	180 °C
Dow Corning® 7093	Dow Corning	1-K Silikon [*])	180 °C
Sealer MB-T	SABA Dinxperlo BV	Polysulfide (u. a.)	120 °C
Sikasil® AS-70	Sika Deutschland GmbH	1-K Silikon [*])	180 °C

^{*}) einkomponentige, kondensationsvernetzende Silikone

^{**}) Herstellerangaben

¹⁴ Autoren des Abschnittes: Stephan Lang, Dominik Bestenlehner, Harald Drück.

2.3.1 Alterungsuntersuchungen

Die gewünschte lange Lebensdauer des Warmwasserspeichers erfordert eine Langzeitbeständigkeit der Dichtstoffverbindungen. Im Laufe der Zeit treten in allen Materialien wie in den Dichtstoffen Alterungserscheinungen auf. Versuche, die mehrere Jahre dauern, sind nicht praktikabel. Eine längere Gebrauchsdauer kann jedoch durch künstliche Alterung simuliert werden. Eine Möglichkeit ist die Wärmealterung. Sie ist relativ einfach zu realisieren. Die Proben werden für eine bestimmte Zeit einer höheren Temperatur, als sie unter normalen Gebrauchsbedingungen erfahren, ausgesetzt. Dafür müssen die Proben für eine definierte Dauer in einem Wärmeschrank thermisch behandelt werden. Die Temperaturen und Dauern wurden in Anlehnung an die Norm „DIN 53508 – Prüfung von Kautschuk und Elastomeren – Künstliche Alterung“ gewählt. In Tabelle 5 sind die gewählten Alterungsbedingungen dargestellt. Die Anzahl der Proben gilt jeweils für jeden Dichtstoff. Die Temperatur der Wärmealterung ist dadurch nach oben begrenzt, dass dabei noch keine anderen Veränderungen wie z. B. chemische Reaktionen auftreten dürfen als unter normalen Gebrauchsbedingungen.

Tabelle 5: Alterungsbedingungen der untersuchten Dichtstoffe

Alterungstemperatur	Alterungsdauer in Tagen			Anzahl der Proben
Raumtemperatur	ungealtert			9
100 °C	3	7	14	27
120 °C	3	7	14	27
200 °C	3	7	14	27
220 °C	3	7	14	27
				Σ117

Die Dichtstoffe sind neben der Temperaturbelastung unterschiedlichen mechanischen Belastungsarten ausgesetzt. Die Belastung durch Dehnung oder Stauchung, wie in Abbildung 13 dargestellt, kann auftreten, wenn der Behälter sich durch einen Lasteintrag (Innendruck des Behälters) und aufgrund nicht vollkommen kreissegmentförmiger Platten verformt. Am Rand der Platte findet dabei entweder ein Aufspannen oder Zusammendrücken der Platten statt. Durch die mehrreihigen Schraubenverbindungen wird dieser Effekt allerdings reduziert, da diese den Hauptanteil der Last abtragen. Somit ist dieser Belastungsfall für die Dichtstoffe von untergeordneter Rolle und wird im nachfolgenden Versuchsaufbau nicht weiter berücksichtigt.

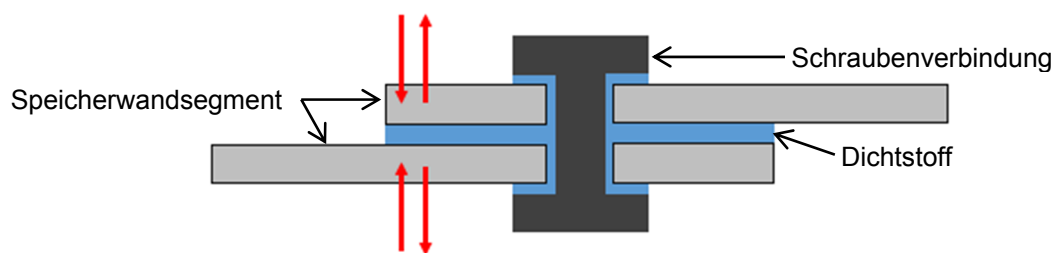


Abbildung 13: Belastungszustände Dehnung und Stauchung. Die roten Pfeile zeigen die Richtung der wirkenden Kraft

Nach der Befüllung des Behälters mit Wasser, werden die Platten durch den hydrostatischen Druck auf Scherung belastet (Abbildung 14). Auch diese Belastung wird von den wirkenden Kräften der Schraubenverbindung aufgenommen. Allerdings wirkt auf die Dichtfläche eine Scherbelastung, wenn die Vorspannung der Schraube nachlässt. Möglicherweise kann es aber durch die Scherbelastung zu Leckagen im Bereich der Schrauben kommen. Die Scherbelastung ist allerdings begrenzt, da die Bewegung der Platten auf den Spielraum zwischen

Schrauben-Schaft-Durchmesser und Loch-Durchmesser in der Platte beschränkt ist. Deshalb ist auch diese Belastung für die Dichtungsmasse von geringer Bedeutung und wird im nachfolgenden Versuchsaufbau nicht weiter berücksichtigt.

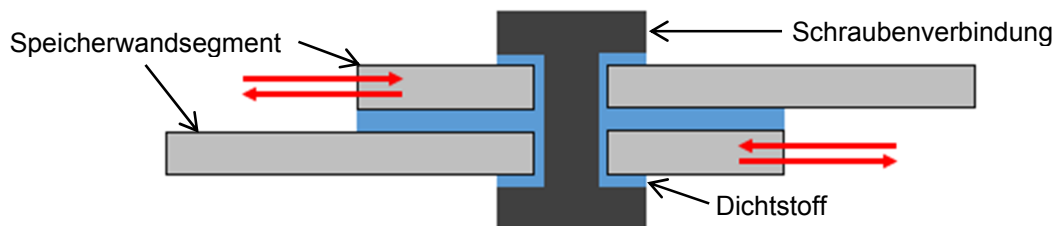


Abbildung 14: Belastungszustand Scherung. Die roten Pfeile zeigen die Richtung der wirkenden Kraft

Durch den hydrostatischen Druck des Wassers wirkt auf den Dichtstoff an der Innenseite des Behälters ein höherer Druck als an der Außenseite. Dieser ist im unteren Bereich des Behälters am größten. Diese Druckbelastung wirkt auf den Dichtstoff wie in Abbildung 15 dargestellt. Es wird angenommen, dass diese Belastung maßgeblich für das Versagen der Dichtung ist. Deshalb wird im geplanten Prüfstand die Druckbelastung untersucht.

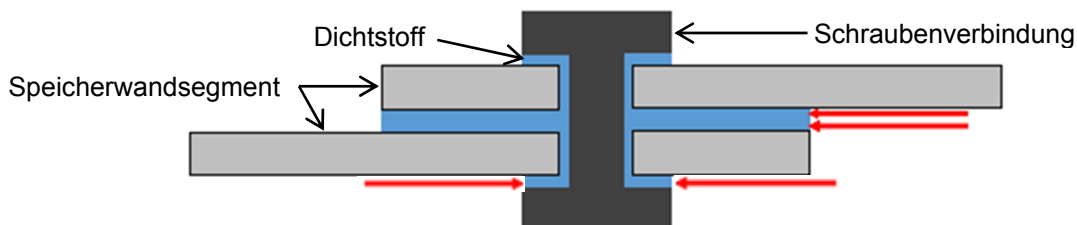


Abbildung 15: Belastungszustand Druck. Die roten Pfeile zeigen die Richtung der wirkenden Kraft. Der untere Teil befindet sich an der Speicherinnenseite, der obere Teil an der Speicheraußenseite

Der Prüfstand besteht aus einem temperierten Wasserbad, der Messdatenerfassung und Rohren als Versuchskörper zur Aufnahme der Dichtstoffproben. Der Aufbau des Prüfstandes ist in Abbildung 16 und Abbildung 17 dargestellt. Im Prüfstand können drei Versuchskörper-Rohre gleichzeitig eingebaut werden. An einer Seite der Rohre wird ein Probenträger mit der Dichtstoffprobe angebracht. Diese Seite wird im Wasserbad fixiert. Die andere Seite der Rohre wird an eine Druckluftleitung angeschlossen. So kann der Dichtstoff einseitig mit Druck beaufschlagt werden. Auf einem Manometer kann der auf die Dichtung wirkende Druck im Rohr abgelesen werden. Der Druck wurde mit Hilfe eines Druckminderers stufenlos eingestellt. Durch das temperierte Wasserbad können unterschiedliche Temperaturen bis hin zum Sieden eingestellt werden.

Die Probenträger des Prüfstandes bestehen aus Verschlussstopfen, in welchen mittig eine Bohrung gesetzt wurde. In die Bohrung kann der zu untersuchende Dichtstoff eingebracht werden (siehe Abbildung 18).

Zuerst wurden die Proben hergestellt und entsprechend der Herstellerangaben ausgehärtet. Alle Proben wurden dabei unter den gleichen Bedingungen gelagert. Die Druckbelastungsprüfung wurde sowohl mit gealterten als auch mit nicht gealterten Proben durchgeführt, um einen Vergleich zu ermöglichen.

Das temperierte Wasserbad wies für den Versuch eine konstante Temperatur von 95 °C auf. Nach zehnminütiger Temperaturhaltung wurde die Probe mit Druck beaufschlagt. Es wurde mit einem Überdruck von 0,2 bar begonnen. Der Druck wurde im Laufe des Versuchs in Zeitschritten von jeweils 5 min in Schritten von 0,2 bar bis zum Versagen der Probe gesteigert.

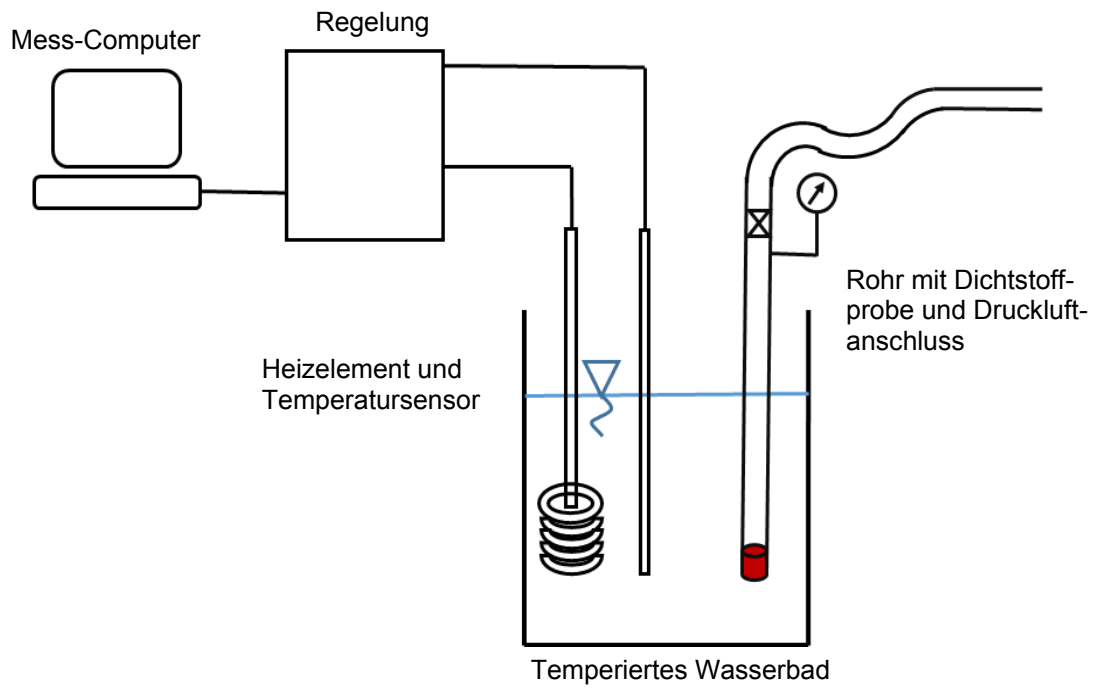


Abbildung 16: Schematische Darstellung des Prüfstands zur Untersuchung gealterter Dichtstoffe

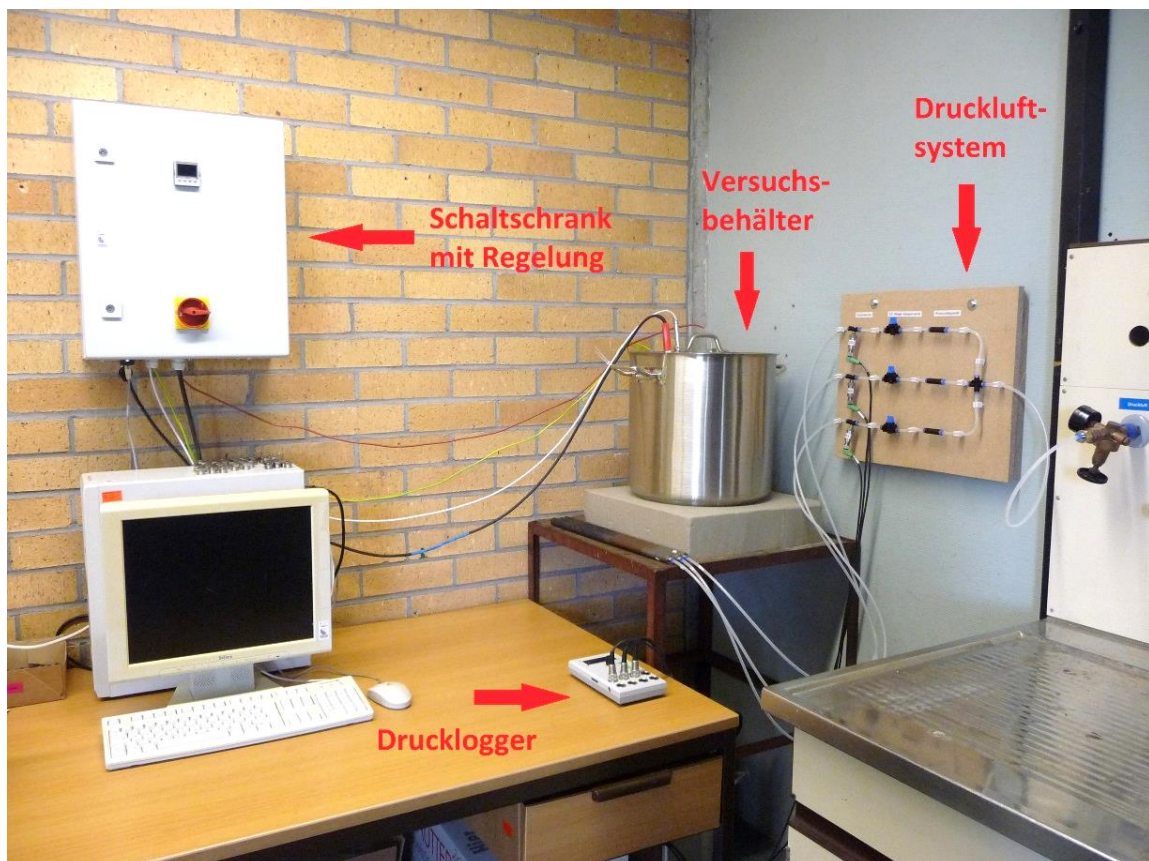


Abbildung 17: Foto des Prüfstands zur Untersuchung gealterter Dichtstoffe

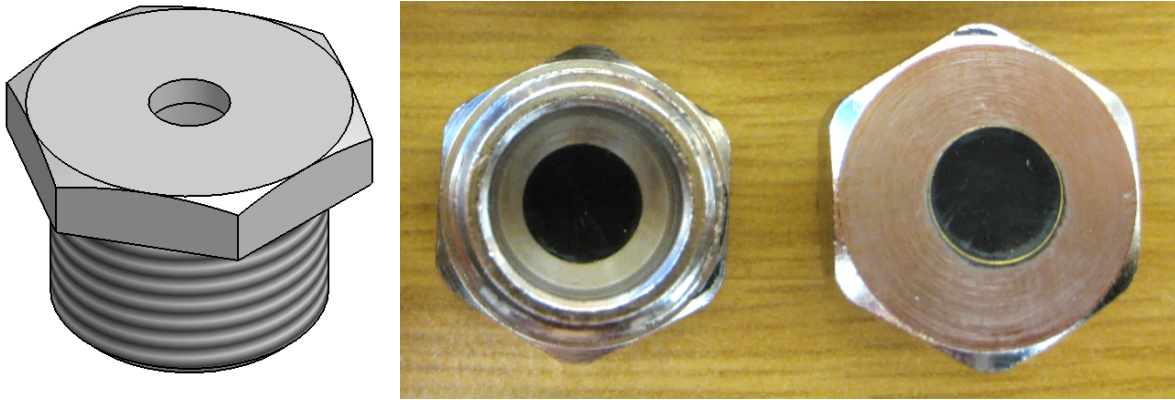


Abbildung 18: Links: Probenträger (Verschlussstopfen); rechts: Dichtstoffprobe (Unter- und Oberseite)

Die Dichtstoffproben zeigten zwei Versagensarten. Entweder löste sich der Dichtstoff vom Probenträger (adhäsives Versagen) oder es entstand ein Bruch innerhalb des Dichtstoffes (kohäsives Versagen). In Abbildung 19 sind die Bruchbilder beider Versagensarten beispielhaft dargestellt.



Abbildung 19: Bruchbilder von Dichtstoffproben; links: adhäsives Versagen; rechts: kohäsives Versagen

Bei adhäsivem Versagen kann nicht eindeutig auf die Eigenschaften des Dichtstoffs rückgeschlossen werden. Es kann sich dabei um Grenzflächeneffekte zwischen dem Dichtstoff und dem Probenträger handeln. Im realen Anwendungsfall kommen jedoch anderen Oberflächen zum Einsatz als die des Probenträgers. Daher wurden für die Auswertung der Ergebnisse nur die kohäsiv versagten Proben berücksichtigt. Um Aussagen zu den Haftungseigenschaften der Dichtstoffe auf den Oberflächen zu treffen, die bei den Speicherwandsegmenten zum Einsatz kommen, wurden diese Eigenschaften in weiterführenden Untersuchungen geprüft. Diese sind in Kapitel 2.3.2 dokumentiert.

Als Ergebnisse aus dem Prüfstand zur Untersuchung gealterter Dichtstoffe wurden die Versagensdrücke sämtlicher Dichtstoffproben erfasst. Die Ergebnisse wurden in Anlehnung an EN ISO 2578 – „Kunststoffe – Bestimmung der Temperatur-Zeit-Grenzen bei langanhaltender Wärmeeinwirkung“ ausgewertet. Als Grundlage wird die Annahme getroffen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Kehrwert der Temperatur und dem Logarithmus der Lebensdauer existiert. Diese Annahme basiert auf dem Arrhenius-Gesetz. Für die Auswertung wurde zuerst die Änderung des Eigenschaftswertes bestimmt. Dieser relative Eigenschaftswert EW_{rel}

berechnet sich, wie in Gleichung (1) dargestellt, aus dem Eigenschaftswert der wärmebehandelten (gealterten) Proben EW und dem Eigenschaftswert der nicht wärmebehandelten Proben EW_0 .

$$EW_{\text{rel}} = \frac{EW}{EW_0} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Der relative Eigenschaftswert wurde anschließend für jede Lagerungstemperatur in einem Diagramm über der Alterungszeit logarithmisch aufgetragen und es wurde ein exponentieller Fit für jede kohäsiv versagte Probe erstellt. Abbildung 20 zeigt ein solches Diagramm zur Bestimmung der Ausfallzeiten am Beispiel des Dichtstoffs Sikasil® AS-70. Als Eigenschaftswert wurde der jeweilige Versagensdruck der einzelnen kohäsiv versagten Proben in der Einheit bar verwendet. Als Grenzwert wurde ein relativer Eigenschaftswert von 50 % festgelegt.

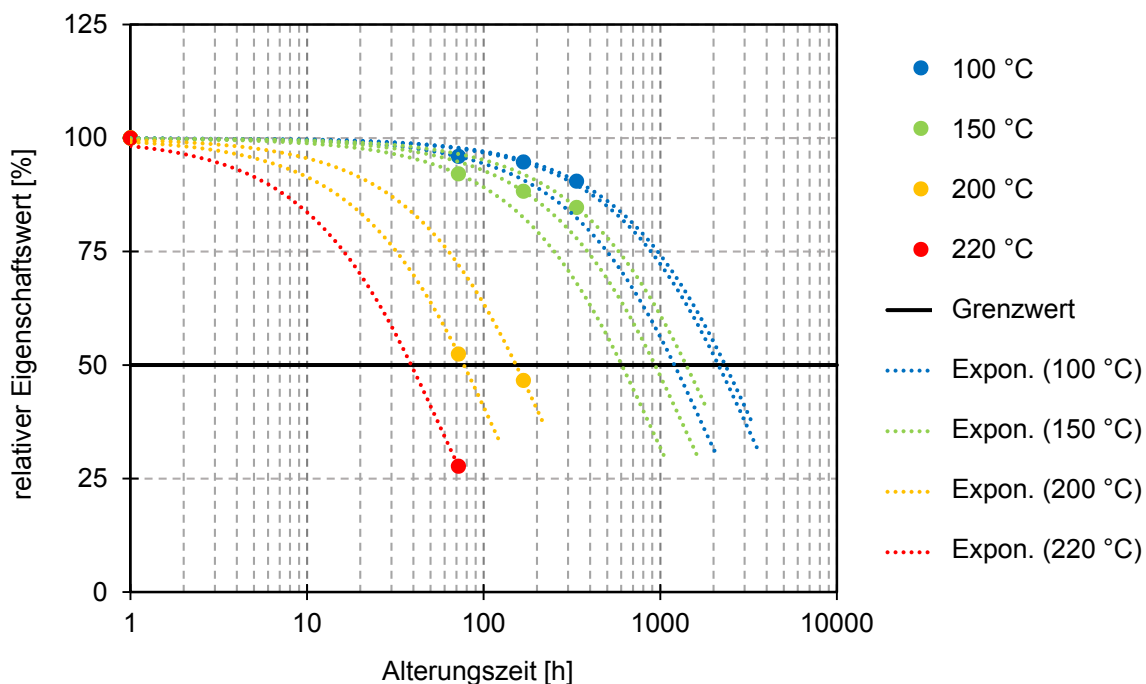


Abbildung 20: Relative Eigenschaftswerte (Versagensdrücke) des Dichtstoffs Sikasil® AS-70

Aus den Schnittpunkten der exponentiellen gefitteten Kurven mit dem Grenzwert von 50 % relativem Eigenschaftswert kann das thermische Langzeit-Diagramm in Anlehnung an EN ISO 2578 gebildet werden. In Abbildung 21 ist dieses für die Dichtstoffe Sikasil® AS-70 und Dow Corning® 7091 dargestellt. Dabei wurde jeweils der arithmetische Mittelwert aus den oben beschriebenen Schnittpunkten bei gleicher Temperatur gealterter Proben gebildet und eine exponentielle Regression durch die resultierenden Punkte jedes Dichtstoffs gelegt.

Aus dem thermischen Langzeit-Diagramm kann die Zeit bis zum Versagen des Dichtstoffs für geringere Temperaturen extrapoliert werden. So wird beispielsweise bei 95 °C für den Dichtstoff Dow Corning® 7091 der relative Eigenschaftswert von 50 % nach 43 Tagen unterschritten und für den Dichtstoff Sikasil® AS-70 nach 191 Tagen.

Diese Zeiten können jedoch keinesfalls als Versagenszeiten des Dichtstoffs beim Einsatz in einem Warmwasserspeicher gedeutet werden. Die Dichtstoffe werden in den hier dargestellten Versuchen deutlich höheren mechanischen Belastungen bei deutlich ungünstigerer Dichtstoffanbringung ausgesetzt. Damit soll ein Versagen in kürzerer Zeit ausgelöst werden, um noch vor dem Zeitpunkt des Einsatzes der Dichtstoffe im Demonstrator einen qualitativen Vergleich der Dichtstoffe zueinander zu erhalten.

Bei der hier aufgezeigten Versuchsanordnung und Auswertemethodik zeigte der Dichtstoff Sikasil® AS-70 die vielversprechendsten Eigenschaften im Vergleich zu allen anderen geprüften Dichtstoffen, gefolgt vom Dichtstoff Dow Corning® 7091. Daher wurden diese beiden Dichtstoffe für die anschließenden Untersuchungen der Haftungseigenschaften auf unterschiedlichen Speicherwandsegment-Beschichtungen ausgewählt.

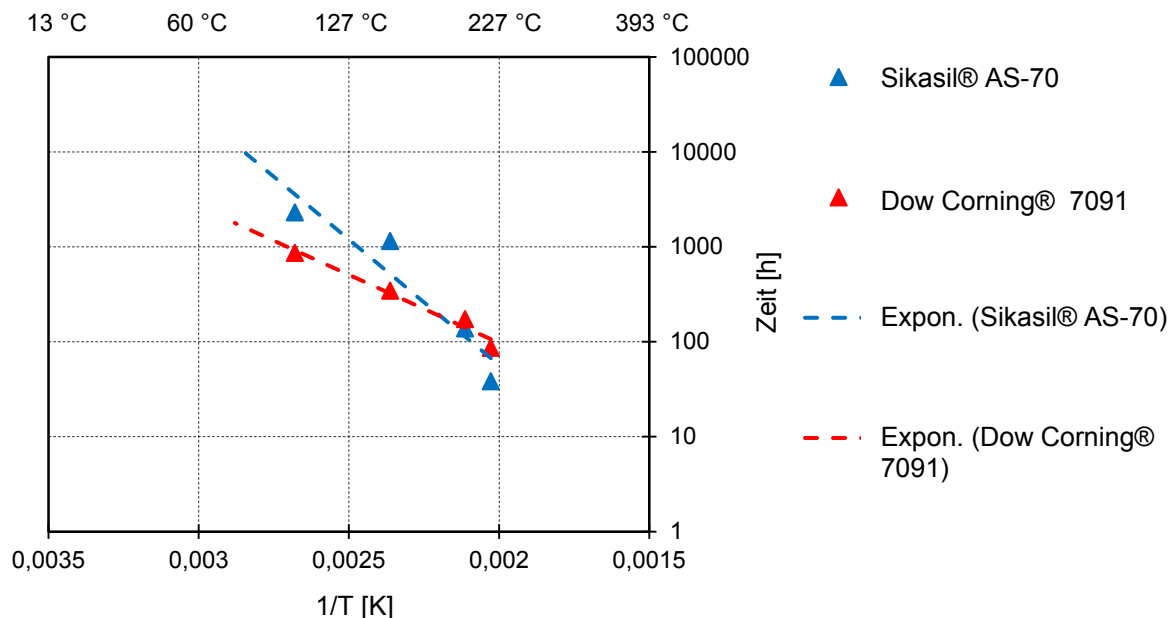


Abbildung 21: Thermisches Langzeit-Diagramm für einen relativen Eigenschaftswert von 50 % in Anlehnung an EN ISO 2578 für Sikasil® AS-70 und Dow Corning® 7091

2.3.2 Haftungseigenschaften

Für die Untersuchung der Haftungseigenschaften (Adhäsionskräfte) der Dichtstoffe Sikasil® AS-70 und Dow Corning® 7091 auf unterschiedlichen Speicherwandsegment-Beschichtungen kamen die in Tabelle 6 aufgelisteten und in Abbildung 22 dargestellten Beschichtungen zum Einsatz.

Tabelle 6: Untersuchte Oberflächenbeschichtungen der Speicherwandsegmente

Bezeichnung der Oberflächenbeschichtung	Hersteller	Materialart
Proguard CN 200	Ceramic Polymer	Epoxy-Fluid mit Keramikpartikeln
Ecofusion® Außenbeschichtung (e)	Permastore®	Email
Ecofusion® Innenbeschichtung (i)	Permastore®	Email
Fusion® V1100 Außenbeschichtung (e)	Permastore®	Epoxy-Pulver
Fusion® V1100 Innenbeschichtung (i)	Permastore®	Epoxy-Pulver
Painted Epoxy	Permastore®	Epoxidharz
Tankguard Storage	JOTUN®	Epoxidharz

Zur Untersuchung der Haftungseigenschaften wurde der Prüfstand zur Untersuchung gealterter Dichtstoffe umgebaut (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Darin sollen Verbindungen aus Dichtstoffen und Oberflächenbeschichtungen auf Zug und Scherung in einem Wasserbad bei 95 °C belastet werden.

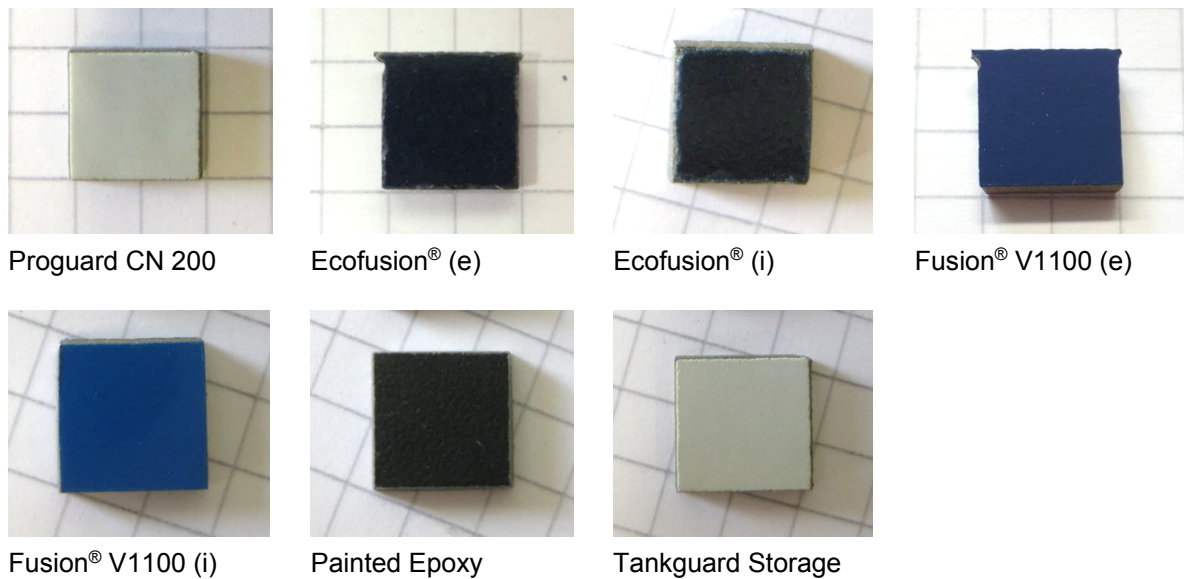


Abbildung 22: Fotos der untersuchten Oberflächenbeschichtungen der Speicherwandsegmente

Am Boden des Versuchsbehälters wurde ein Haken angebracht, an dem ein Ende der Probe befestigt wird. An dem anderen Ende der Probe wird ein Drahtseil befestigt, das über Blockseilrollen mit einer Last verbunden ist, die kontinuierlich bis zum Versagen der Probe erhöht werden kann. Um die Reibungswiderstände der Blockseilrollen zu berücksichtigen, wurde zunächst eine Zugwaage dort eingesetzt, wo später die Probe zum Einsatz kommt. Das angezeigte Gewicht der Zugwaage wurde mit dem Gewicht der Last, welches danach mit der gleichen Zugwaage gemessen wurde, verglichen. Damit wurde ein Wirkungsgrad der Seilführung ermittelt, der mit dem Gewicht der Last multipliziert wurde. Das resultierende Produkt dividiert durch die Haftfläche der Probe zwischen Dichtstoff und der Oberflächenbeschichtung ergibt die auf die Haftfläche wirkende Zug- bzw. Scherspannung.

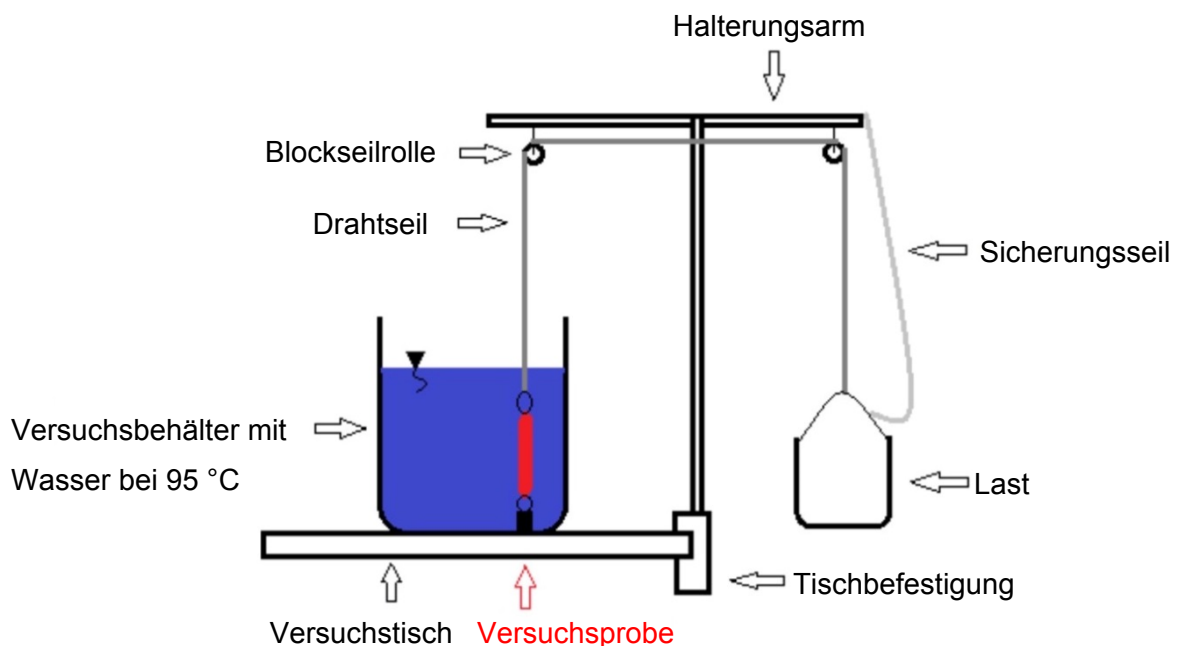


Abbildung 23: Schematische Darstellung des Prüfstands zur Untersuchung der Haftungseigenschaften von Dichtstoffen auf Oberflächenbeschichtungen

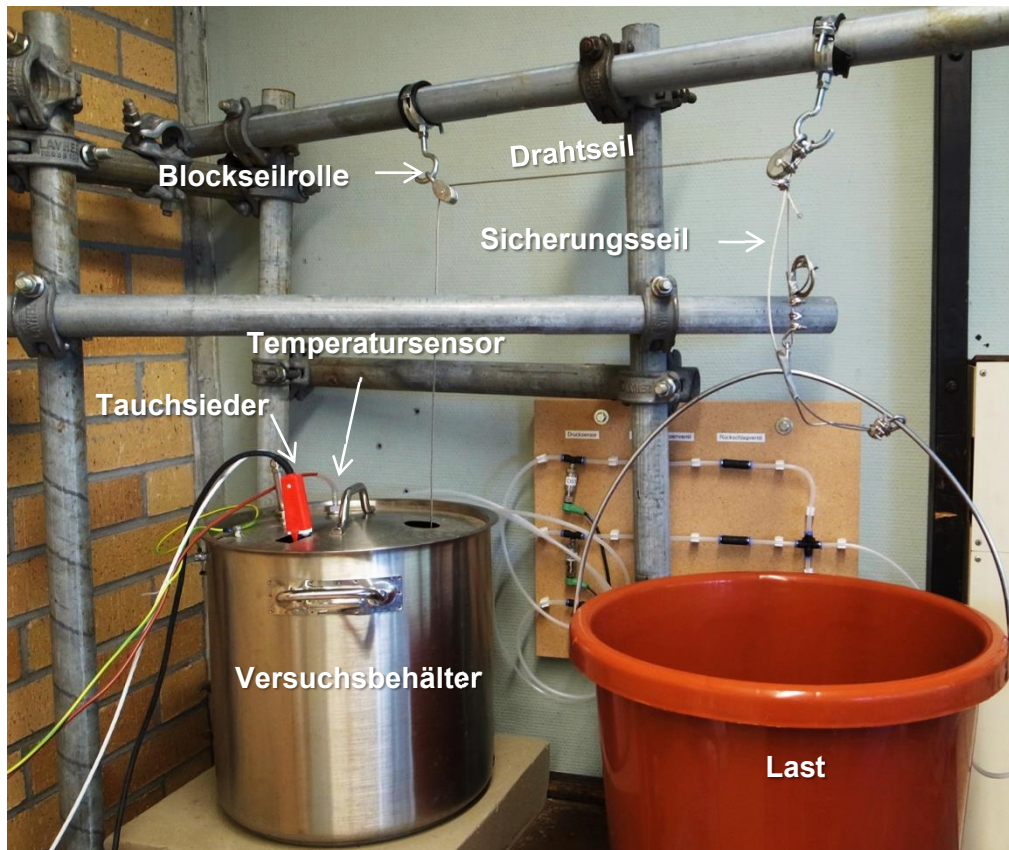


Abbildung 24: Foto des Prüfstands zur Untersuchung der Haftungseigenschaften von Dichtstoffen auf Oberflächenbeschichtungen

Nach sechs Minuten Vorkonditionierung der Probe im Versuchsbehälter wurde die Belastung über die Wasserzufuhr in den Wasserbehälter (Last), ausgehend von einer Last nahe 0 N, um 0,84 N/s erhöht, bis das Versagen der Probe durch Abriss des Dichtstoffes eintritt. Um einen Messpunkt zu ermitteln, wurden jeweils drei Zug- bzw. Scherversuche unter gleichen Randbedingungen durchgeführt.

In Abbildung 25 ist die Herstellung der Proben für den Zugversuch (Zugproben) dargestellt. Es wurde eine Probenform aus Polytetrafluorethylen (PTFE) erstellt, in welcher zunächst die in Abbildung 22 dargestellten Zugprobenplättchen mit einem Cyanacrylat-Klebstoff an den Probenträgern befestigt wurden. Als Material für die Probenform wurde PTFE gewählt, da weder der Klebstoff noch der Dichtstoff daran haften. Nach dem Aushärten des Klebstoffs wurden zwei Probenträger mit angeklebten Zugprobenplättchen in die Zugprobenform eingelegt und der Dichtstoff zwischen die Oberflächenbeschichtungen der Zugprobenplättchen eingebracht. Durch Verschieben der Probenträger wurde eine Dichtstoffdicke zwischen den Probenplättchen von jeweils 1 mm eingestellt. Daraufhin wurden die Probenträger in der Zugprobenform fixiert und der Dichtstoff ausgehärtet.

Die Herstellung der Proben für den Scherversuch (Scherproben) ist in Abbildung 26 dargestellt. In einer Scherprobenform aus PTFE können drei Scherproben hergestellt werden. Dazu wurden zwei mit Bohrungen versehene Scherprobenplättchen auf 15 mm überlappend aufeinander gelegt. Zwischen den Scherprobenplättchen wurde Dichtstoff mit einer Schichtdicke von 1 mm aufgebracht. Nach dem Aushärten wurde der überschüssige Dichtstoff entfernt.

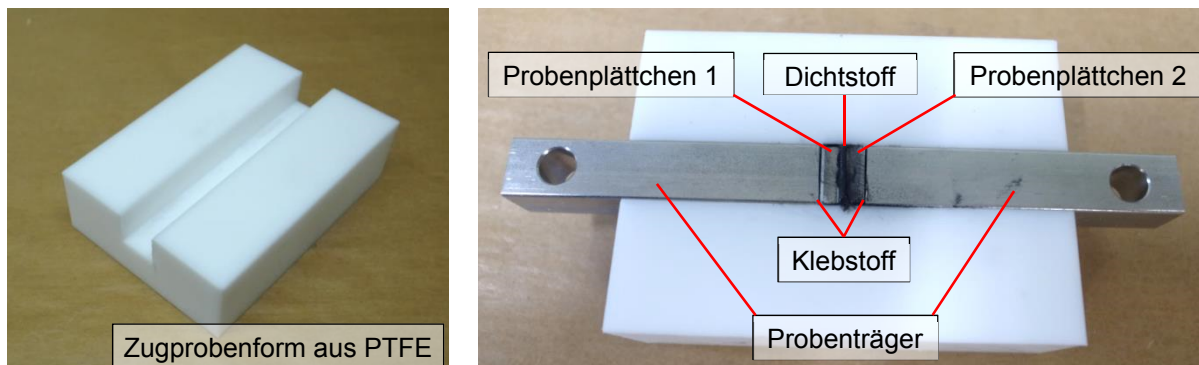


Abbildung 25: Herstellung der Proben für den Zugversuch

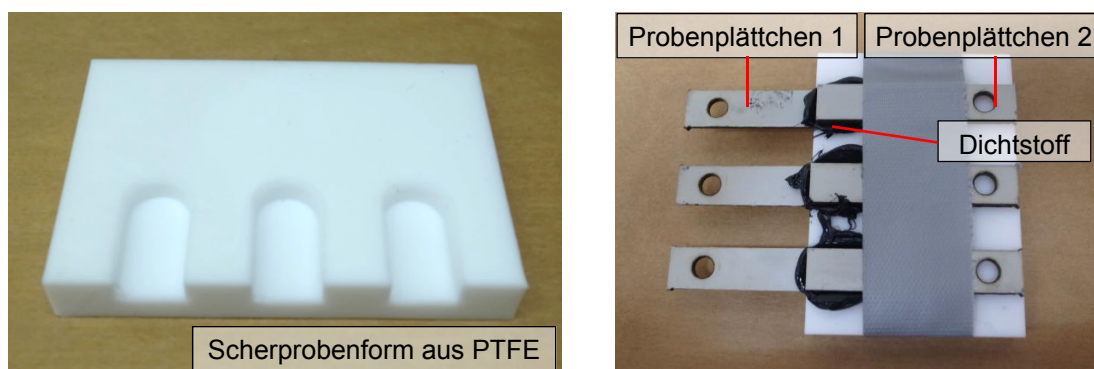


Abbildung 26: Herstellung der Proben für den Scherversuch

Je nach Versagensart können unterschiedliche Aussagen zu den Haftungseigenschaften der Dichtstoffe auf den Oberflächenbeschichtungen gemacht werden. Nur bei rein adhäsivem Versagen (av), also der vollständigen Ablösung des Dichtstoffes von der Oberfläche, können die Haftungseigenschaften eindeutig quantifiziert werden. Bei nicht rein adhäsivem Versagen wie kohäsivem Versagen (kv) oder Mischversagen (mv) kann lediglich eine Untergrenze für die Haftungseigenschaft des Dichtstoffes auf der Oberflächenbeschichtung bestimmt werden. Als Mischversagen einer einzelnen Probe wird ein Versagen definiert, bei welchem entweder kohäsives oder adhäsives Versagen an mindestens 25 % und maximal 75 % der Rissfläche auftritt. Außerhalb dieses Bereiches wird das Versagen der einzelnen Proben als vorwiegend kohäsiv oder vorwiegend adhäsiv bezeichnet.

Die Ergebnisse der Zugversuche sind in Abbildung 27 und die Ergebnisse der Scherversuche in Abbildung 28 dargestellt. Bei der Darstellung der Ergebnisse wird die Versagensart für jeden Messpunkt mit angegeben. Wie bereits oben erwähnt wurde jeder Messpunkt aus den Ergebnissen von drei, unter gleichen Randbedingungen durchgeführten Versuchen gemittelt. Es ist dabei die Versagensart angegeben, die bei den Versuchen der drei Proben überwiegend aufgetreten ist. Treten alle Versagensarten in gleicher Anzahl auf, wird die Versagensart des Endergebnisses aus dem Mittelwert der drei Einzelversuche als Mischversagen definiert.

Bei den Zugversuchen konnten bei vier von sieben Oberflächenbeschichtungen mit dem Dichtstoff Sikasil® AS-70 höhere Zugfestigkeiten als mit Dow Corning® 7091 erreicht werden. Die höchste Zugfestigkeit konnte mit der Materialpaarung Tankguard Storage und Sikasil® AS-70 erreicht werden. Dabei trat vorwiegend kohäsives Versagen auf, was bedeutet, dass der Dichtstoff versagte, bevor es zu einer Ablösung des Dichtstoffes von der Oberflächenbeschichtung kommen konnte. Ein Vergleich zu anderen Materialpaarungen, bei welchen ebenfalls vorwiegend kohäsives Versagen auftrat, ist bezüglich der Haftungseigenschaften (Adhäsionskräfte) daher nicht eindeutig möglich. Die geringste Zugfestigkeit wurde mit der Materialpaarung

Painted Epoxy und Dow Corning® 7091 gemessen. Dabei kam es zu einem vorwiegend adhäsiven Versagen. Diese Materialpaarung ist beim Zugversuch als am wenigsten geeignet zu bewerten.

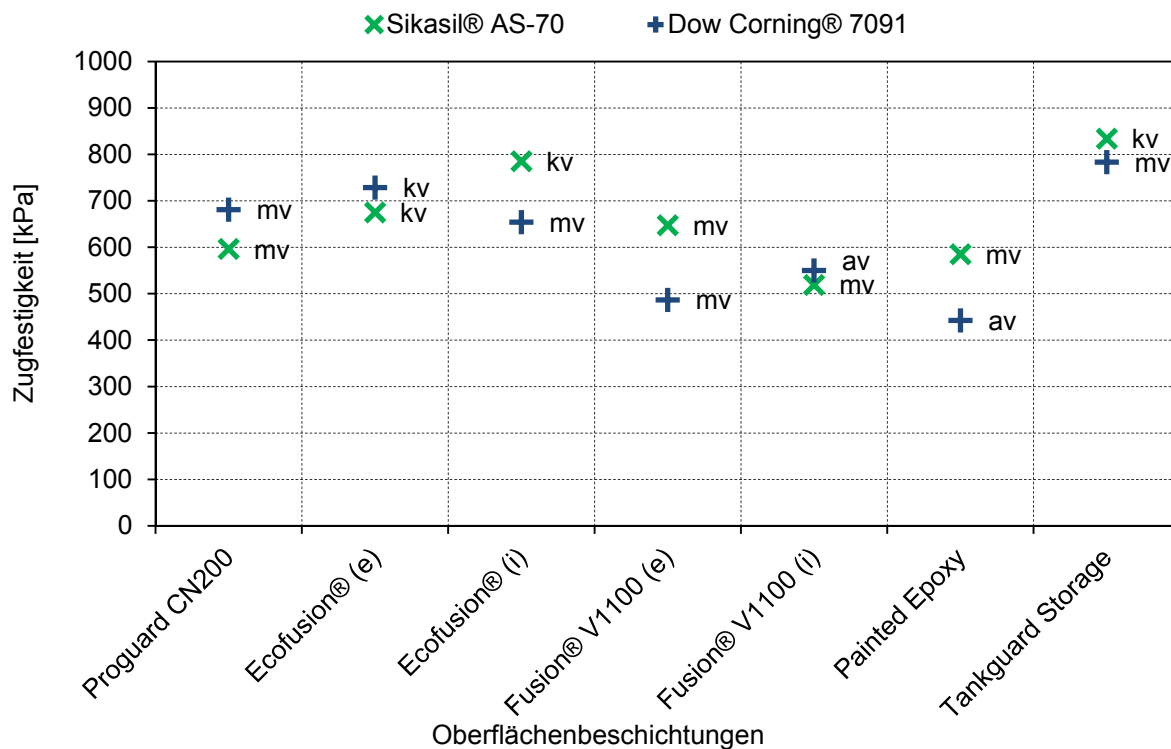


Abbildung 27: Ergebnisse der Zugversuche

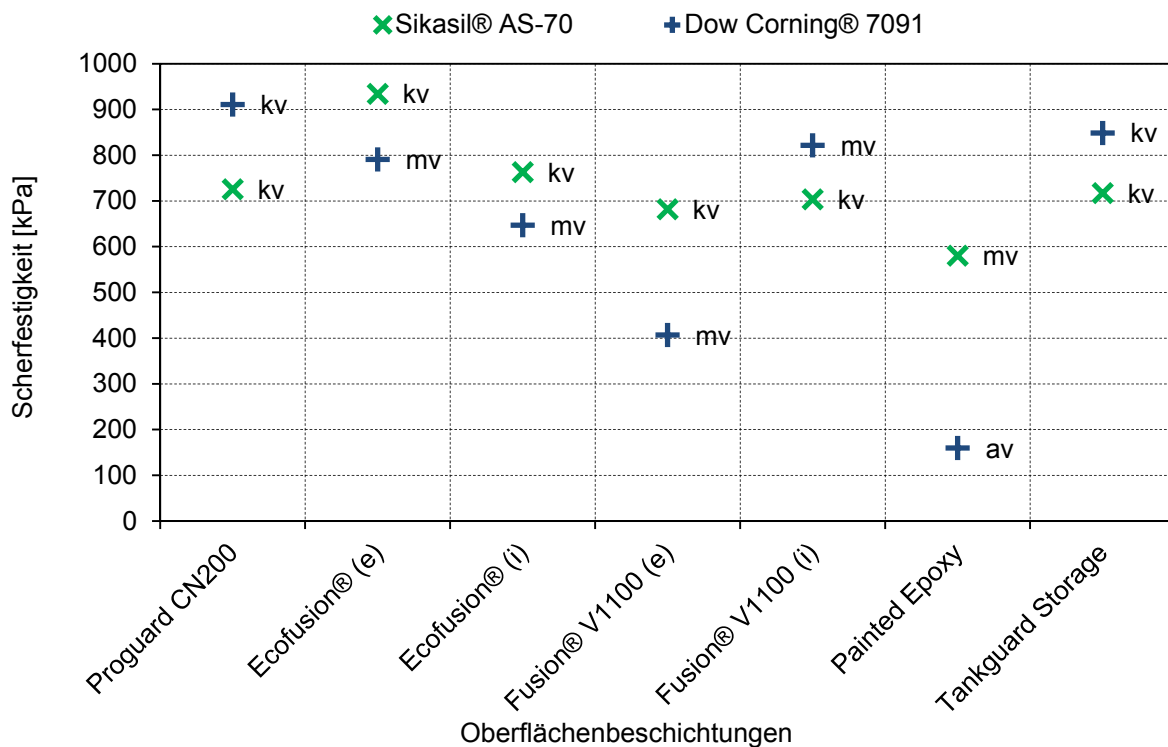


Abbildung 28: Ergebnisse der Scherversuche

Auch bei den Scherversuchen wies die Materialpaarung Painted Epoxy und Dow Corning® 7091 die geringste Festigkeit auf und auch hierbei kam es zu einem vorwiegend adhäsiven Versagen. Damit kann diese Materialpaarung nach Untersuchung beider Belastungsarten als am wenigsten geeignet für den Einsatz am Warmwasserspeicher bewertet werden. Auch bei den Scherversuchen konnten mit dem Dichtstoff Sikasil® AS-70 in vier von sieben Fällen die höchsten Festigkeiten erzielt werden.

2.3.3 Auswahl des Dichtstoffs und der Speicherwandsegment-Beschichtungen für den Demonstrator

Aufgrund der Ergebnisse aus den Untersuchungen der Alterung und der Haftungseigenschaften wurde der Dichtstoff Sikasil® AS-70 für den Einsatz und die weitere Untersuchung am Demonstrator ausgewählt. Um vergleichende Untersuchungen hinsichtlich der Korrosionsbeständigkeit und der Haftungseigenschaften im Demonstrator-Maßstab durchzuführen, wurden alle in Tabelle 6 aufgelisteten Speicherwandsegment-Beschichtungen im Demonstrator eingesetzt. Zusätzlich kam noch eine weitere Epoxidhart-Beschichtung des Herstellers JOTUN® mit der Bezeichnung Epoxy HR zum Einsatz. Die Untersuchungen der Speicherwandsegment-Beschichtungen ist in Abschnitt 8.3 aufgeführt.

3 Entwicklung und Test von Wandaufbauten

3.1 Weitere Stoffuntersuchungen¹⁵

Dieses Kapitel stellt die weiteren Stoffuntersuchungen zum genutzten Wärmedämmstoff Rathipur (RP) dar. Zusätzlich zu den in Abschnitt 2 beschriebenen Untersuchungen wurde die äußeren Porosität, die Dichte und die Korngrößenverteilung bestimmt. Weiterhin erfolgte die Aufnahme von Bildern mit einem Mikroskop (durch das ITW, [50]) sowie von makroskopischen Bildern, um eine Aussage über die Oberflächenstruktur des Materials treffen zu können.

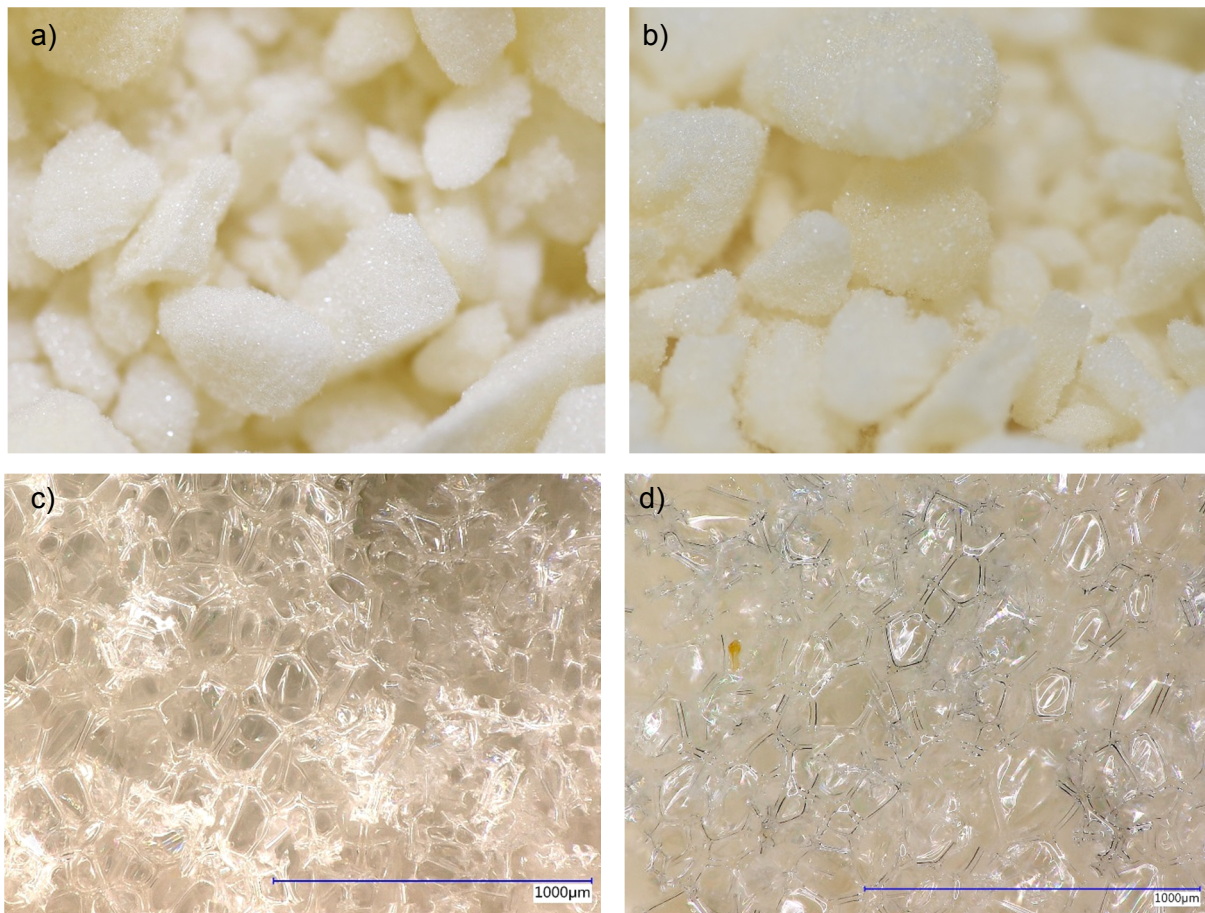


Abbildung 29: Materialstruktur Rathipur; a) und b) makroskopische Aufnahmen, c) und d) mikroskopische Detailaufnahmen [50]

Abbildung 29 zeigt die Detailaufnahmen zur Darstellung der Materialstruktur. Die starke Rauigkeit der Partikeloberfläche ist auf den makroskopischen Aufnahmen sehr gut zu erkennen. Abbildung 29d zeigt vor allem geschlossene Strukturen (glänzende bzw. spiegelnde Zellwände), wie sie auch innerhalb des Kornes zu erwarten sind.

3.1.1 Setzungsverhalten, Dichte und Sieblinie

Das Setzungsverhalten hat besonders großen Einfluss auf die Dichte. Dieses Verhalten ist auch für den späteren praktischen Einsatz im Wandbereich des Demonstrators von Bedeutung. Bei zu stark ausgeprägten Setzungserscheinungen könnte ein Nachfüllen von Rathipur

¹⁵ Autoren des Abschnittes: Jan Mücke, Thorsten Urbaneck. Die Versuchsergebnisse wurden in [18] veröffentlicht.

notwendig werden, um die optimalen Dämmeigenschaften weiterhin sicherzustellen. Die folgende Darstellung bezieht sich auf das Dämmmaterial in der Originalzusammensetzung.

Es erfolgte ein Einrütteln des lose eingefüllten Granulats in einen Behälter auf einer Rüttelplatte (Abbildung 30). Der Rüttelversuch dauerte eine Minute. Abbildung 30 und Abbildung 31 zeigt das Ergebnis zur Verdichtung.

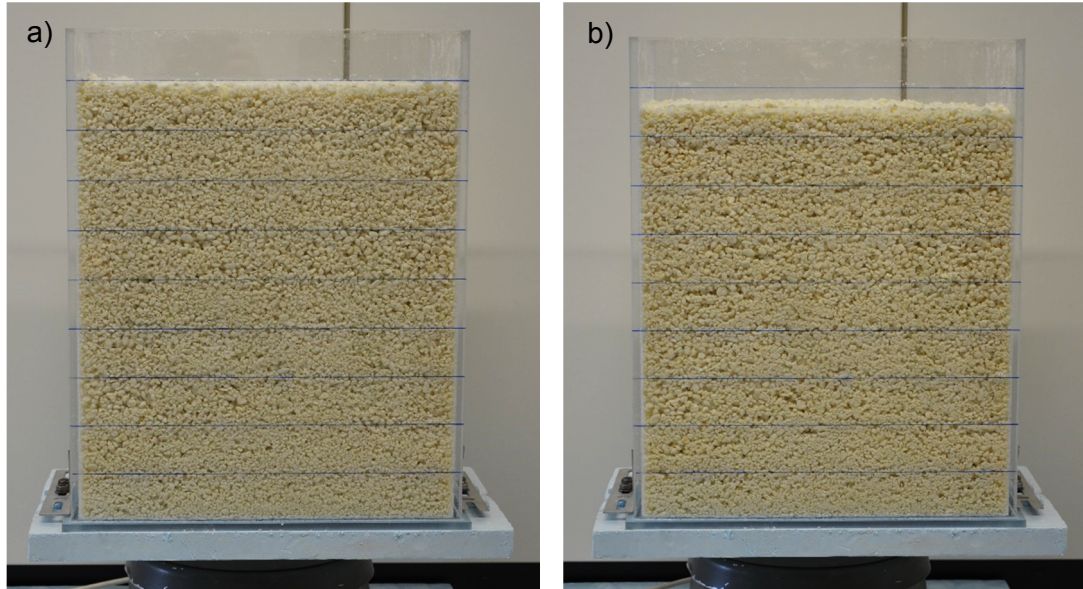


Abbildung 30: Setzungsversuch mit Rathipur (Originalprobe); a) lose eingefülltes Rathipur, b) Rathipur nach 1 min Rütteldauer

Die Dichte steigt in den ersten zehn Sekunden durch das Rütteln jeweils um ca. 1 kg/m^3 . Danach bleibt die Rütteldichte näherungsweise konstant. Das Rathipur hat dann offensichtlich einen Endzustand eingenommen. Dieser Zustand ist für die Anwendung und somit auch für die folgenden Untersuchungen anzustreben. Um eine möglichst hohe Wiederholgenauigkeit gewährleisten zu können, basieren alle folgenden Messungen auf diesem Verfahren. Weiterhin ist in Abbildung 31 zu erkennen, dass die Dichte zwischen den verschiedenen Proben um ca. 1 kg/m^3 schwankt. Dies ist ein erstes Indiz darauf, dass Materialschwankungen vorhanden sind.

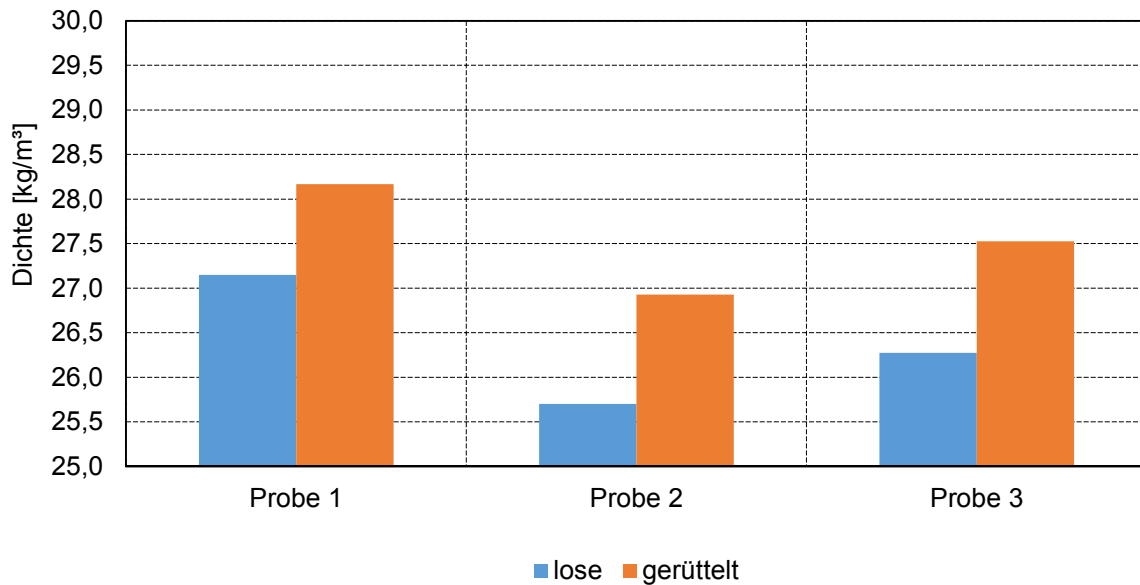


Abbildung 31: Dichte des Rathipur in Original-Zusammensetzung vor und nach dem Rüttelvorgang

Um das Setzungsverhalten noch weiter zu untersuchen, wurden zusätzliche Dauerversuche in einem Plexiglasbehälter durchgeführt. Dabei erfolgte die Befüllung mit Rathipur einmal absichtlich mit einer geringen Dichte (24 kg/m^3 , Abbildung 32a) und einmal mit einer dem Mittelwert der experimentellen Untersuchungen entsprechenden Dichte (28 kg/m^3 , vgl. mit Abschnitt 3.1.2). Um das Drehen zwischen vertikaler und horizontaler Lage des Versuchsstandes zum praxisnahen Test mehrschichtiger Wandaufbauten (VS-WA, s. Abschnitt 3.2) zu simulieren, wurde der Plexiglasbehälter im Anschluss ca. einmal wöchentlich um 180° ($2 \times 90^\circ$) gedreht.

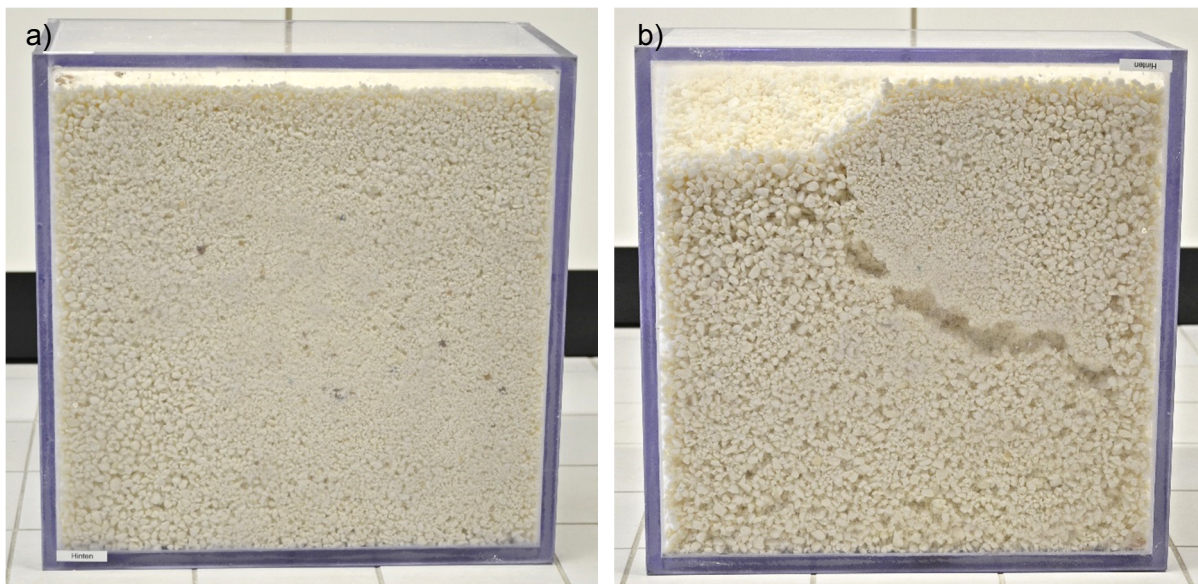


Abbildung 32: Versuch zum Setzungsverhalten von Rathipur in Original-Zusammensetzung mit geringer Dichte (24 kg/m^3); a) nach Befüllung, b) nach dem ersten Drehvorgang

Bei dem mit geringer Dichte befüllten Behälter entstehen sofort größere Hohlräume (Abbildung 32b). Dies dürfte auch Auswirkungen auf die effektive Wärmeleitfähigkeit in praxisnahen Wandaufbauten haben, wenn bspw. größere Flächen bei dem Befüllvorgang mit Dämmmaterial nicht erreicht werden. Um diese Effekte zu verhindern, ist auf eine entsprechend korrekte Verfüllung zu achten (ausreichend hohe Dichte, siehe Abschnitt 3.1.2). Im VS-WA ist durch

eine entsprechende Befüllung, durch den Versuchsablauf und durch die ständigen optischen Kontrollen an einer Befüllöffnung eine ausreichend hohe Dichte gewährleistet.

Bei dem mit einer Dichte von 28 kg/m^3 befüllten Behälter ist anfangs keine Veränderung erkennbar. Nach ca. vier Wochen (vier 180° -Drehungen) zeigt sich jedoch ein kleiner Spalt an der Oberseite des Behälters, der in den folgenden Monaten noch größer wurde. Abbildung 33 zeigt den Behälter nach dem Einfüllen und nach 14 Monaten Versuchszeit (56 180° -Drehungen). Die nach 14 Monaten gemessene Setzung von ca. 3 cm entspricht einer Volumenreduktion von ca. 6 %. Auf den Demonstrator bezogen, wäre im Wandbereich mit einer Setzung um ca. 42 cm zu rechnen (vgl. Abschnitt 7.1). Dies wäre aus praktischer Sicht unproblematisch, weil die Schwimmdecke ca. 80 cm niedriger liegt als das obere Ende der Wanddämmung und unkompliziert Material nachgefüllt werden kann.

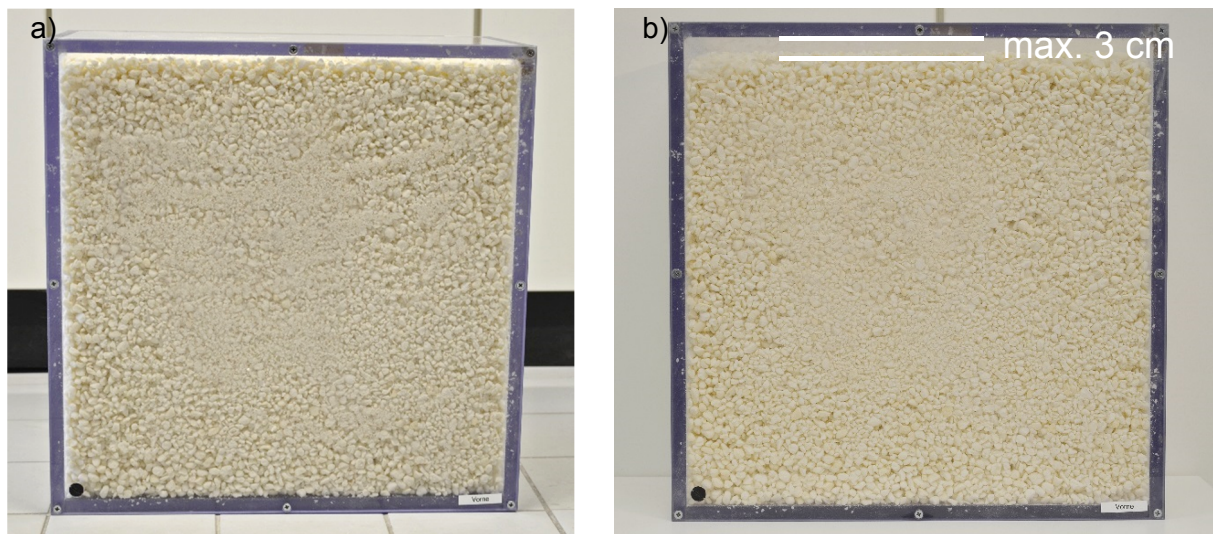


Abbildung 33: Langzeitversuch zum Setzungsverhalten von Rathipur in Original-Zusammensetzung für normale Dichten (28 kg/m^3); a) nach der Befüllung, b) nach 14 Monaten Versuchszeit

Für die Aufnahme einer Sieblinie und weiterer Untersuchungen der Dichte des Rathipurs (Unterschiede bei den verschiedenen Korngrößen) erfolgten Siebanalysen (Abbildung 34). Diese wurden mit allen an der TU Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik zur Verfügung stehenden Säcken sowie an Proben aus dem im VS-WA genutzten Rathipur durchgeführt. Es kamen zwei Siebe (A und B) mit quadratischen Maschen der Kantenlänge 5 mm und 2 mm zum Einsatz. Die aus der Siebanalyse erhaltenen Fraktionen charakterisieren die Originalschüttung nach ihren Massenanteilen (Abbildung 35). Dabei erfolgt die Bezeichnung der Korngrößen (KG) wie in Tabelle 7 beschrieben.

Tabelle 7: Korngrößen der ausgesiebten Fraktionen nach Siebdurchgang

Siebdurchgang A	Siebdurchgang B
KG 1 ($d > 5 \text{ mm}$)	KG 2 ($d < 5 \text{ mm}, d > 2 \text{ mm}$)
KG 2+3 ($d < 5 \text{ mm}$)	KG 3 ($d < 2 \text{ mm}$)

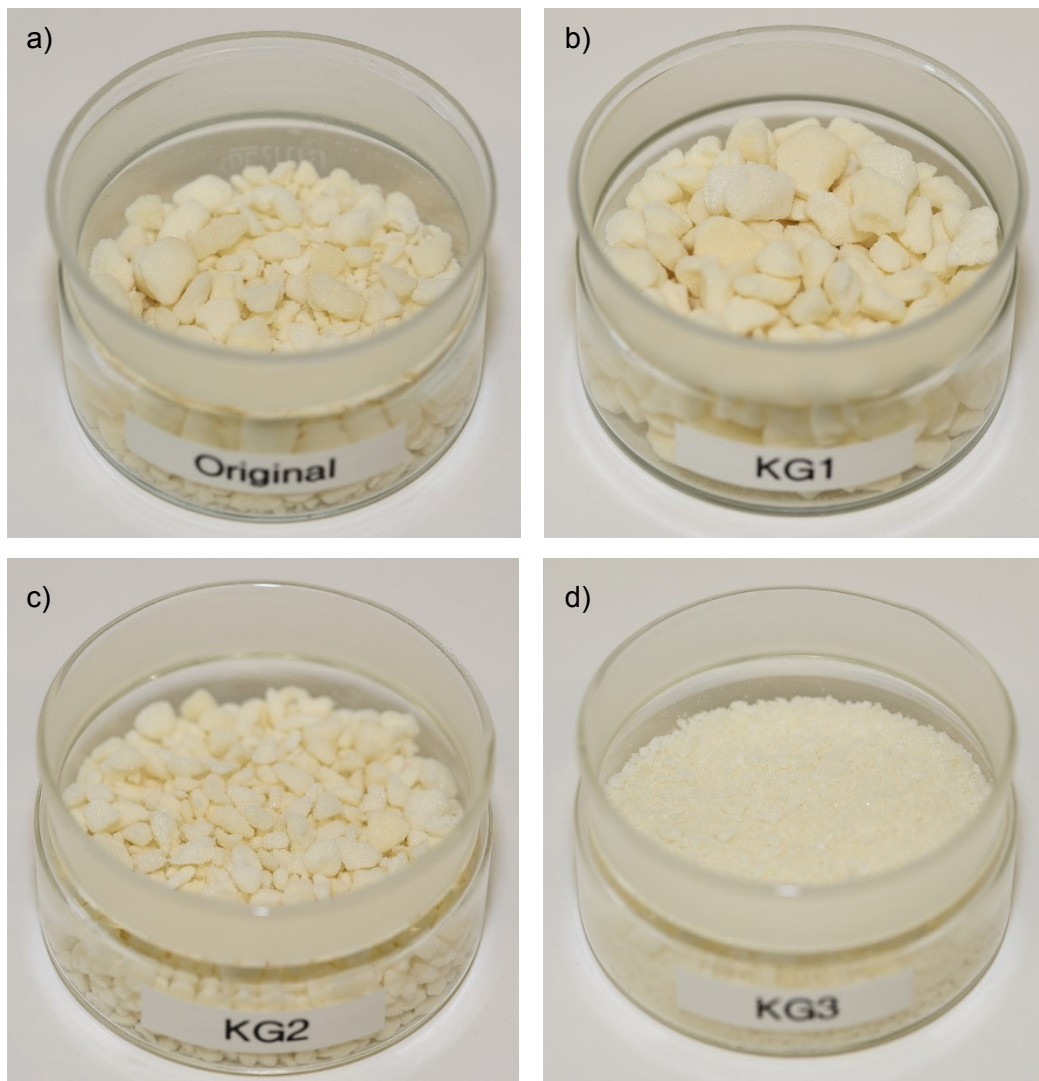


Abbildung 34: Detailaufnahmen des Rathipurs; a) Original-Zusammensetzung, b) Korngröße 1, c) Korngröße 2, d) Korngröße 3

Mit dem Siebdurchgang A wird die Masse der Originalschüttung ca. zu gleichen Teilen in KG 1 bzw. KG 2 und KG 3 aufgeteilt. Die Werte schwanken zwischen 45 % und 53 % für KG 1. Aus KG 2 und KG 3 wurde anschließend im Siebdurchgang B durchschnittlich 9 % von der Gesamtmasse an KG 3 gesiebt. Dieser Wert schwankt von 5 bis 14 %. Es zeigt sich, dass Rathipur in Säcken mit größerem Feinanteil (KG 3) einen kleineren Massenanteil an KG 1 aufweist. Schwankungen in der Zusammensetzung je nach Sack sind dementsprechend vorhanden und vor allem durch den Feinanteil bestimmt. Diese Schwankungen dürften bei unterschiedlichen Chargen bzw. Bestellungen noch größer sein¹⁶. Die Werte des Rathipurs aus dem VS-WA liegen nahe an den Mittelwerten. Das ist plausibel, da hier mehrere Säcke eingefüllt wurden.

¹⁶ Das Rathipur in den Säcken an der TUC/TT ist aus einer Bestellcharge.



Abbildung 35: Massenanteile der Fraktionen bezogen auf die Gesamtmasse [43]

Die Rütteldichten der so erhaltenen Fraktionen werden anhand der Volumen- und Massenbestimmungen der Teilmessvolumen pro Sack bestimmt und gemittelt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 36 dargestellt. Tabelle 4 fasst die Mittelwerte nochmals zusammen.

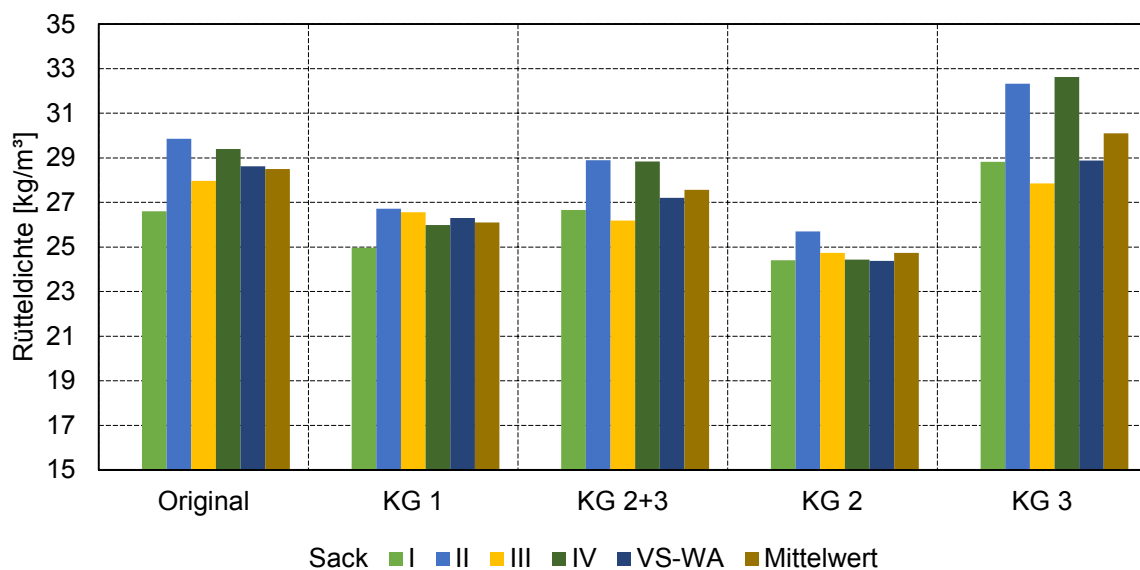


Abbildung 36: Rütteldichte der verschiedenen Korngrößen je Probensack [43]

Die Rütteldichte von Rathipur in der Original-Zusammensetzung schwankt um bis zu 5 kg/m³ zwischen den verschiedenen Säcken. Diese Schwankungen zeigen auch die gesiebten Fraktionen. Im Mittel hat das Rathipur in der Original-Zusammensetzung eine Rütteldichte von 28-29 kg/m³. Die vom Hersteller angegebene Dichte von 40-50 kg/m³ [44] konnte nicht erreicht werden. Die größeren Anteile (KG 1 und KG 2) zeigen durchschnittlich eine geringere Rütteldichte von 26 bzw. 25 kg/m³. KG 3 (feinster Anteil) hat die größte Rütteldichte von 30 kg/m³.

Die Ermittlung der Massenanteile der verschiedenen KG ermöglicht die Aufnahme einer Sieblinie. Hierfür werden die Massenanteile kleiner gleich einer Korngröße über dieser Korngröße aufgetragen (Abbildung 37). Aufgrund der geringen Anzahl an Messpunkten sind die interpolierten Kurven nur eine grobe Näherung der Sieblinie.

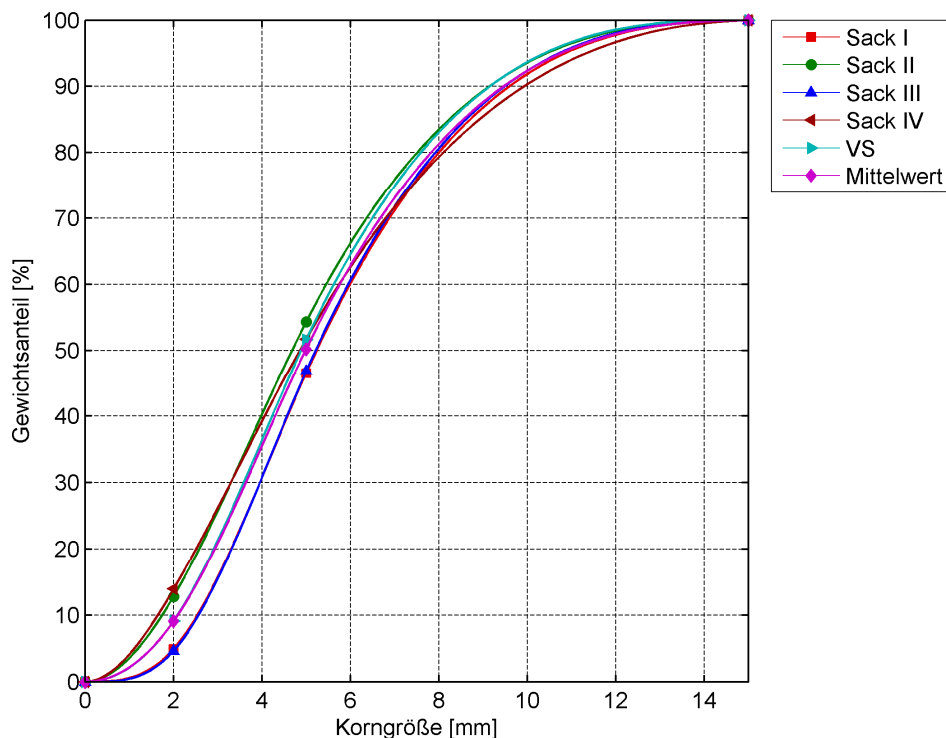


Abbildung 37: Extrapolierte Sieblinien für die untersuchten Rathipur-Schüttungen [43]

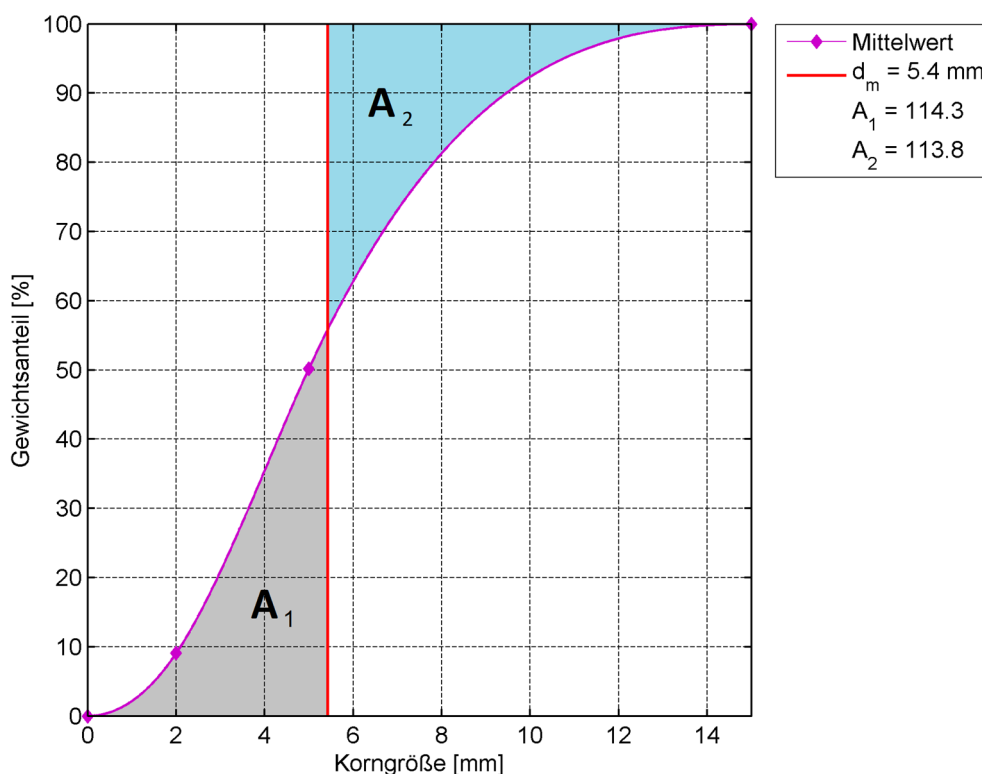


Abbildung 38: Bestimmung der mittleren Korngröße d_m für die gemittelte Sieblinie der untersuchten Proben [43]

Mit Hilfe der Sieblinie kann nach DIN 19661-2 eine mittlere Korngröße d_m von rolligem Material bestimmt werden [45]. d_m entspricht hier der Korngröße bei der eine senkrechte Linie im Diagramm, die sich ergebenden Flächen A_1 und A_2 (Abbildung 38) zur Sieblinie gleich groß werden lässt. Alle so ermittelten mittleren Korngrößen sind in Tabelle 8 angegeben. Sie bewegen sich im Bereich von 5-6 mm.

Die DIN 14688-2 beschreibt zusätzlich eine Ungleichförmigkeitszahl [46]. Sie trifft eine Aussage über die Steilheit der Sieblinie im Bereich von 10 bis 60 % des Massenanteils. Die Kennzahl ist mit

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \tag{2}$$

definiert, wobei d_{10} und d_{60} die Korndurchmesser bei 10 bzw. 60 % Siebdurchgang (Massenanteil) sind. Mit wachsendem Anstieg in diesem Bereich strebt die Kenngröße gegen 1. Diese Ergebnisse sind ebenfalls in Tabelle 8 dargestellt. Im Mittel ergibt sich für die Rathipur-Schüttung eine Ungleichförmigkeitszahl von 2,7.

Tabelle 8: Kenngrößen der untersuchten Rathipur-Proben

Probe	Sack I	Sack II	Sack III	Sack IV	VS-WA	Mittelwert
d_m [mm]	5,7	5,1	5,7	5,4	5,3	5,4
d_{10} [mm]	2,5	1,7	2,6	1,6	2,1	2,1
d_{60} [mm]	6,0	5,5	6,0	5,7	5,6	5,8
C_U [-]	2,4	3,1	2,3	3,5	2,7	2,7

3.1.2 Äußere Porosität

Die äußere Porosität wurde mittels Auffüllen der Lufträume innerhalb einer Rathipurprobe mit Wasser ermittelt. Dabei erfolgt ein regelmäßiges Wiegen der gesamten Probe jeweils vor und nach dem Auffüllen. Aufgrund der Hydrophobierung der Partikel sollte sich das Material beim kurzfristigen Tauchen nicht vollsaugen (siehe auch Abschnitt 3.3). Zusätzlich zur Untersuchung des Rathipurs in Originalzusammensetzung erfolgten Messungen der ausgesiebten Fraktionen. Exemplarisch zeigt Abbildung 39 die Messwerte in Abhängigkeit von der Zeit für eine Probe im Originalzustand.

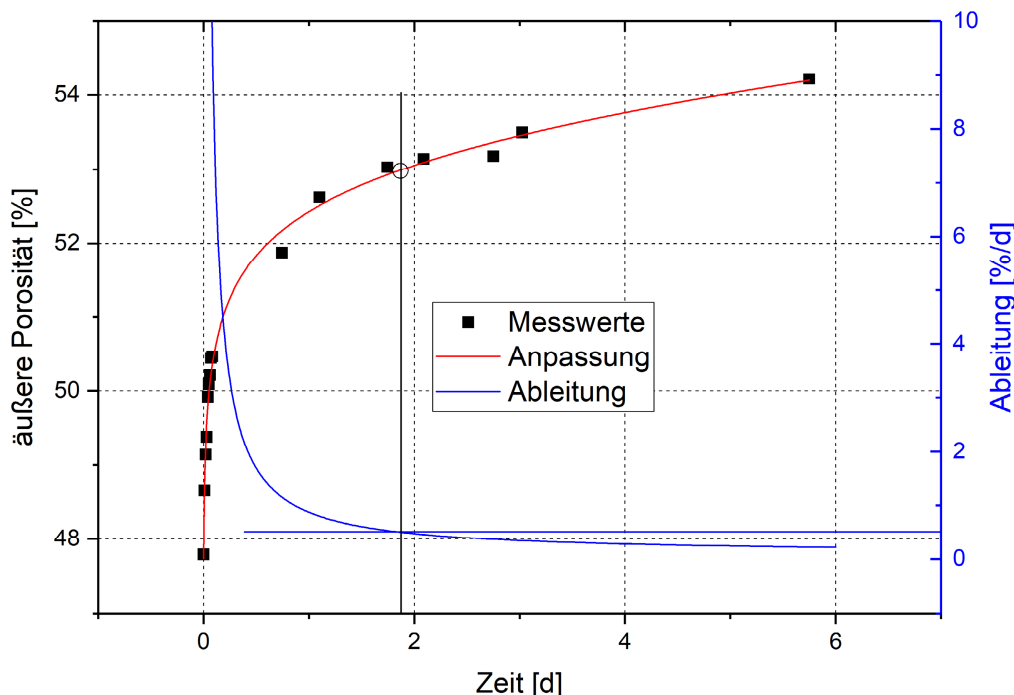


Abbildung 39: Exemplarischer Verlauf der Porositätsmessungen für Rathipur [43]

Mit Hilfe der Ableitung wird die äußere Porosität zu dem Zeitpunkt bestimmt, an dem der Anstieg lediglich noch 0,5 %/d ist. Der Schnittpunkt der senkrechten, schwarzen Linie mit dem Verlauf der Messwerte markiert diesen Punkt im Diagramm. Der Anstiegswert von 0,5 %/d wurde anhand der praktischen Erfahrungen während des Experimentierens und der Abschätzung von Messgenauigkeiten festgelegt.

Die Ergebnisse aller Porositätsmessungen sind in Abbildung 40 und Tabelle 9 zusammengestellt. Die Werte wurden dabei im Mittel nach einer Zeit von ca. 3,5 Tagen aus den angepassten Kurven abgelesen.

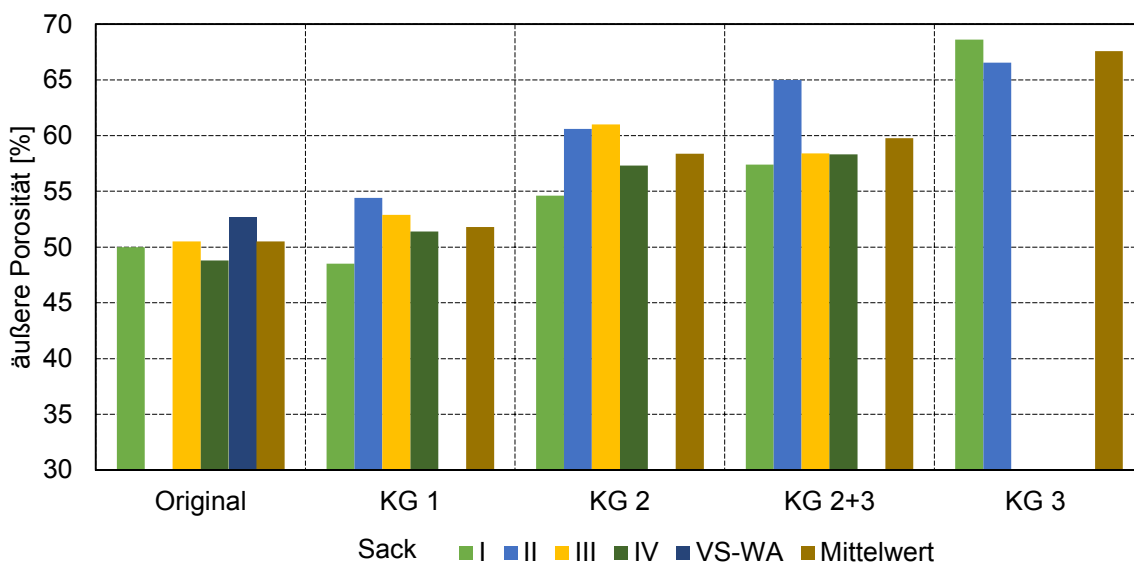


Abbildung 40: Äußere Porosität der Rathipur-Fraktionen [43]

Tabelle 9: Partikeldurchmesser, Mittelwert der Rütteldichte sowie der äußeren Porosität für Rathipur im Originalzustand und den Fraktionen [43]

Korngröße	Original	KG 1	KG 2	KG 2+3	KG 3
d [mm]	ca. 1-16	> 5	< 5 und > 2	< 5	< 2
ρ [kg/m ³]	28,5	26,1	27,6	24,7	30,1
$\Phi_{a,RP}$ [%]	51	52	58	60	68

Für Rathipur in Original-Zusammensetzung ergibt sich danach eine durchschnittliche äußere Porosität von 51 %. Die Werte schwanken je nach Sack um bis zu 4 %. Auch hier sind also Materialschwankungen zu erkennen. Das Ergebnis für KG 1 zeigt keinen wesentlichen Unterschied. Erst für die kleineren Partikel der Korngrößen KG 2, KG 2+3 und KG 3 steigen die äußeren Porositäten an. Dabei unterscheiden sich KG 2 und KG 2+3 kaum. KG 3 hat mit äußeren Porositäten von über 66 % die größten Werte.

Abbildung 41 zeigt einen Vergleich der aufgenommenen zeitlichen Verläufe der äußeren Porosität für die verschiedenen Korngrößen. Hier ist ebenfalls der Anstieg der äußeren Porosität mit kleiner werdenden Partikelgrößen gut zu erkennen. Die Messwerte erscheinen plausibel, wenn man annimmt, dass bei kleinerer Partikelgröße die Anzahl der offenen Poren an der Partikeloberfläche steigt.

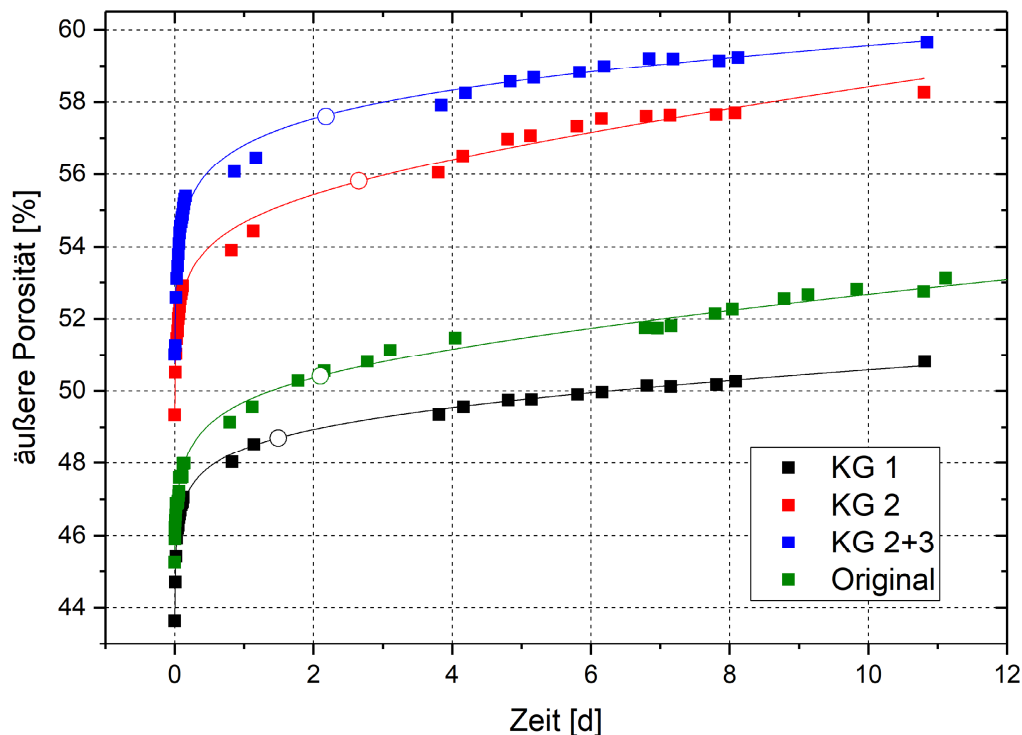


Abbildung 41: Vergleich der Kurven für die äußere Porosität von Sack I für verschiedene Korngrößen [43]

3.1.3 Fazit

Das Schüttgut aus PUR-Hartschaum-Partikeln ist zur Dämmung von Warmwasserspeichern geeignet und stellt einen Fortschritt gegenüber bisherigen Lösungen dar. Detailuntersuchungen zeigen zwar Materialschwankungen bei der Rütteldichte, der äußeren Porosität und der Korngrößenverteilung, diese Schwankungen stellen jedoch keinen Hinderungsgrund für einen Einsatz am Demonstrator dar.

3.2 Versuchsstand zum praxisnahen Test von mehrschichtigen Wandaufbauten¹⁷

3.2.1 Aufbau

Im Rahmen des Projektes wurde ein vollkommen neuer Versuchsstand zum Test von ca. 1,0 m x 1,0 m großen Wandelementen aufgebaut. Mit dem Versuchsstand (Abbildung 42) sind praxisnahe Untersuchungen verschiedener Dämm- und Dichtstoffe sowie von Wandsegmentmaterialien in einer Einheit möglich. Die Strategie besteht darin, vor dem realen Einsatz neue Wandkonstruktionen im labortechnischen Maßstab zu testen. Diese Vorgehensweise bietet mehrere Vorteile. Im Labor herrschen definierte Bedingungen mit hoher Reproduzierbarkeit. Es entstehen relativ niedrige Kosten bezüglich des Aufbaus und des Betriebs. Weiterhin besteht bei eventuellen Fehlentwicklungen nur ein geringes Risiko.

Der wesentliche Unterschied zu herkömmlichen Versuchsständen zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeit (z. B. Zwei-Platten-Apparatur) oder anderen Tests (z. B. für Dichtstoffe) besteht

¹⁷ Autoren des Abschnittes: Jan Mücke, Thorsten Urbaneck. Die Abhandlung wurde in [18] und [19] veröffentlicht.

in der Möglichkeit, ein repräsentatives Flächenelement (RFE) zu untersuchen. Das Element repräsentiert einen typischen Wandausschnitt mit allen geplanten oder eingesetzten Materialien (Dämmstoff, Wandsegment, Verbindungen, Dichtungen usw.). Mit dem Versuchsstand stellt man die typischen Randbedingungen an der Innen- und Außenseite ein, sodass die Wärme- und Stoffübertragung im RFE praxisnah abgebildet wird. Die Maße der untersuchten Dämmstoff-Proben sind zudem deutlich größer als bei anderen experimentellen Untersuchungen. Der Versuchsstand wurde zur Untersuchung des effektiven Wärmeübergangs im Wandaufbau sowie zu Langzeittests der Materialien (Temperaturbeständigkeit, Dichtheit) eingesetzt. Weiterhin ist es problemlos möglich, vertikale und horizontale Aufbauten zu untersuchen, weil der Versuchsstand drehbar gelagert ist.

Der Versuchsstand besteht aus einem Kreislauf, mit dem Wasser durch eine Wanne gepumpt wird. Die Temperatur ist exakt einstellbar und simuliert die Verhältnisse an der Speicherinnenseite. Abbildung 42 zeigt den Aufbau inklusive der verbauten Messtechnik.

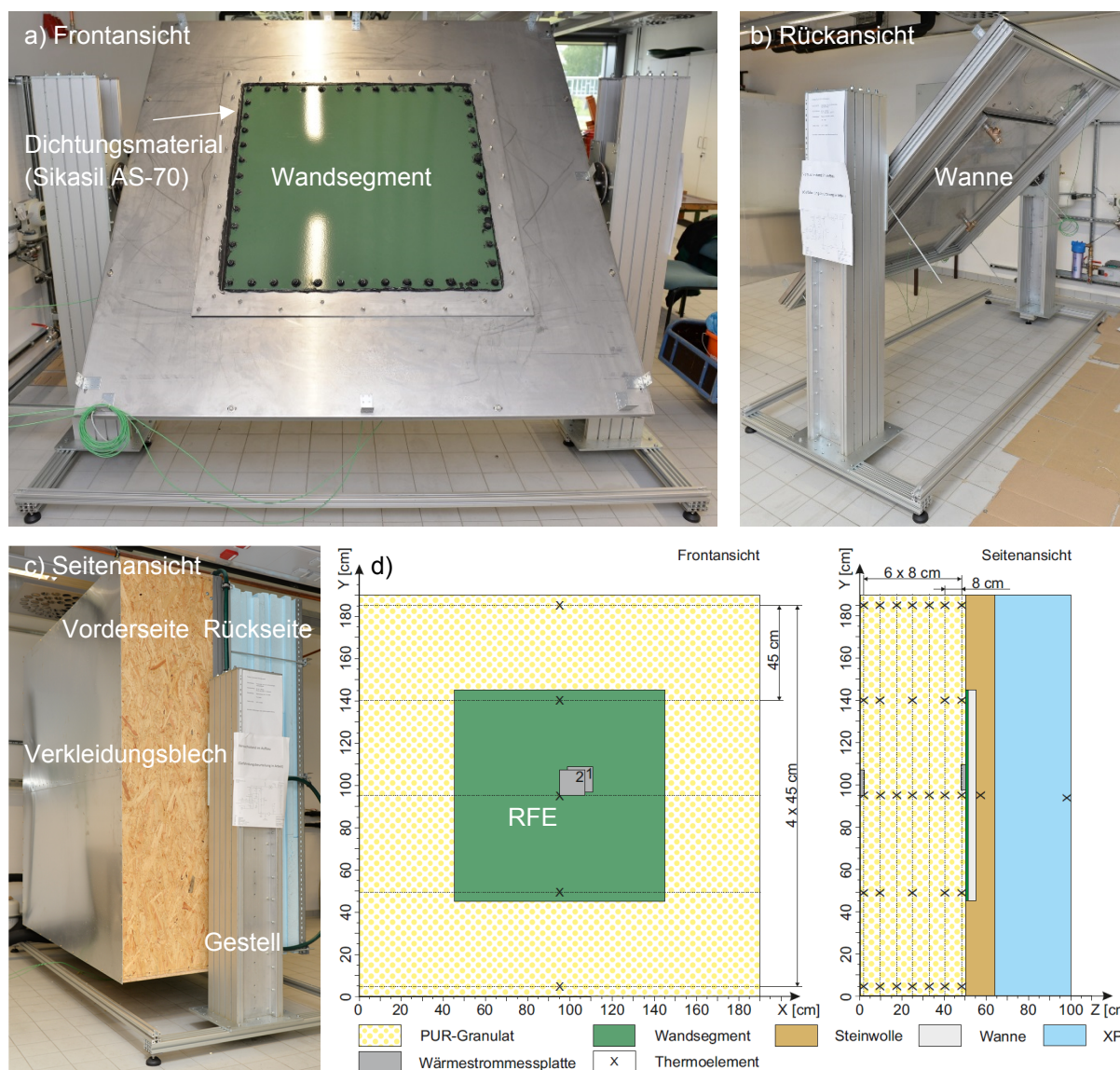


Abbildung 42: a) Frontansicht des Versuchsstands zum praxisnahen Test mehrschichtiger Wandaufbauten während des Aufbaus; b) Rückansicht; c) Seitenansicht nach Fertigstellung; d) schematischer Aufbau des Versuchsstands im Querschnitt der Front- und Seitenansicht mit eingezeichneter Messtechnik

In der Frontansicht ist das Wandsegment zu erkennen, welches aus einem ca. 3 mm starken emaillierten Stahlblech besteht, wie es auch bei realen Speichern in Segmentbauweise zum Einsatz kommt. Dieses Wandsegment wurde auf die Wanne analog der vorgesehenen Bautechnologie geklebt (Dicht- und Klebstoff: Sikasil AS-70). Auf der Vorderseite befindet sich die zu untersuchende Wärmedämmung aus Polyurethan-Hartschaum-Partikeln (PUR-Granulat). Das Schüttgut wurde dabei in einen Holzkasten eingefüllt, der nach vorne hin mit einem Verkleidungsblech (Speicherverkleidung) abgeschlossen ist. In jede Richtung ist eine ca. 50 cm starke Dämmschicht zur Unterdrückung der Wärmeverluste installiert, wobei auf der Rückseite Steinwolle und extrudierter Polystyrol-Hartschaum (XPS) zum Einsatz kommen. Zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit, die als Maß für den effektiven Wärmeübergang im RFE verwendet wird, kommen Wärmestrom-Messplatten und Thermoelemente zum Einsatz. Die Wärmestrom-Messplatten befinden sich zentral auf der Oberfläche des Wandsegments und auf der Innenseite des Verkleidungsblechs. Die insgesamt 31 Thermoelemente in der zu untersuchenden Schüttung sind auf fünf verschiedenen Höhen (Abbildung 42d, Frontansicht, Abstand 45 cm) und in sieben verschiedenen Schichten verbaut (Abbildung 42d, Seitenansicht, Abstand 8 cm). Diese Konfiguration ermöglicht die Aufnahme von vertikalen und horizontalen Temperaturprofilen im Wandaufbau.

Nach der Durchführung von Versuchen zur Bestimmung von Versuchsstandparametern sowie zur Optimierung der Regel- und Steuerkreisläufe und erster Langzeitversuche deuteten die Ergebnisse auf einen Einfluss von freier Konvektion auf den Wärmetransport in der Schüttung hin. Die Versuchsplanung berücksichtigt daher den Einbau von Konvektionsbremsen (KB, Abbildung 43) und umfasst die in Tabelle 10 dargestellten Versuche.

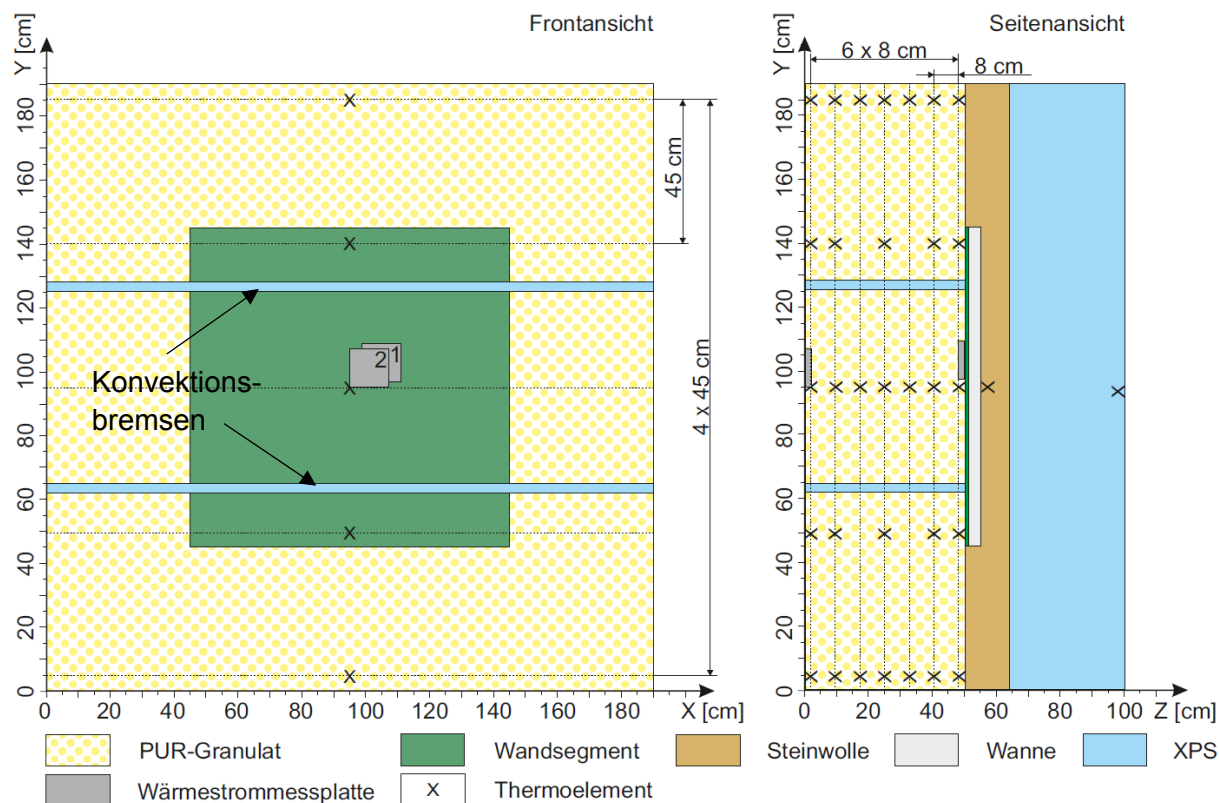


Abbildung 43: Schematischer Aufbau des Versuchsstandes im Querschnitt der Front- und Seitenansicht mit eingezeichneter Messtechnik und Konvektionsbremsen

Tabelle 10: Übersicht der durchgeführten Versuche am Versuchsstand zum praxisnahen Test mehrschichtiger Wandaufbauten

Aufstellung/Lage	Mitteltemperatur in der Wanne [°C] ¹⁸				
Horizontale Aufstellung mit und ohne KB	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0
Vertikale Aufstellung mit und ohne KB	30,0	40,0	50,0	60,0	70,0

3.2.2 Berechnung von freier Konvektion in porösen Schüttgütern

Das Berechnungsverfahren von freier Konvektion in porösen Stoffsystemen soll im Folgenden kurz dargestellt werden. Die Berechnung für den VS-WA folgt im Anschluss. In porösen Stoffsystemen ist vor allem die nach Darcy modifizierte Rayleigh-Zahl Ra^* von Interesse [47]. Diese ist nach [47], [48] wie folgt definiert.

$$Ra^* = Ra * Da = K \frac{g \beta_{Fl} l_{ch} \Delta T}{\nu_{Fl} a_{Sch}} \quad (3)$$

Hier ist a_{Sch} die Temperaturleitfähigkeit der Schüttung:

$$a_{Sch} = \frac{\lambda_{Sch}}{(\rho * c_p)_{Fluid}} \quad (4)$$

Die Stoffwerte sind für die Mitteltemperatur der Schüttung einzusetzen, bei ebenen Platten gebildet aus dem arithmetischen Mittel der kalten und heißen Seite [47]. Ein charakteristisches Merkmal poröser Schüttungen ist außerdem die äußere Porosität [47]:

$$\Phi_{a,RP} = \frac{V_{Zwischenraum}}{V_{gesamt}} \quad (5)$$

Damit und mit dem Durchmesser der Schüttgutpartikel d_{Sch} , kann die Permeabilität K nach dem von Rumpf, Gupte aufgestellten Zusammenhang [52]:

$$K = \left(\frac{d^2}{5,6} \right) * \Phi_{a,RP}^{5,5} \quad (6)$$

bestimmt werden. Diese Gleichung gilt für Kugelschüttungen mit einer Porosität von 0,35-0,67. Um die oben genannten Gleichungen nutzen zu können, müssen also zunächst die äußere Porosität, der durchschnittliche Partikeldurchmesser und die Permeabilität des Rathipur bestimmt werden.

Die äußere Porosität ist nach entsprechenden Untersuchungen des PUR-Granulats bekannt und beträgt ca. 0,51 (siehe Abschnitt 3.1.3). Die Partikel werden als geschlossenporig angenommen. Der Partikeldurchmesser variiert in der Realität. Für die Berechnung wird von einem durchschnittlichen Partikeldurchmesser (Annahme: idealisierte Kugelform) von 5,4 mm ausgegangen (siehe Abschnitt 3.1.2 Rütteldichte und Sieblinie). K_{RP} berechnet sich nach Gleichung 6 und beträgt $1,3 \cdot 10^{-7}$. Mit steigender Temperatur in der Wanne steigt im Labor (bei gleich bleibenden Raumbedingungen) auch die Temperaturdifferenz zwischen der warmen und der kalten Seite. Der Dichteunterschied der Luft und die Rayleigh-Zahl (Gl. 3) nehmen somit zu. Der Konvektionseinfluss auf den Wärmetransport steigt daher ebenfalls. Es folgt deswegen eine beispielhafte Berechnung für 70 °C Wannenmitteltemperatur (ca. 47 °C

¹⁸ Höhere Temperaturen (bis 98 °C) sind mit der momentane Konfiguration des Versuchsstandes nicht möglich. Das verbaute Wandsegment verformt sich bei weiterem Aufheizen zu stark, sodass Undichtigkeiten zu erwarten sind.

Dämmstoff-Mitteltemperatur). Für λ_{Sch} werden die vom ITW ermittelten Wärmeleitfähigkeitswerte verwendet. Es gelten die folgenden Stoffwerte für Luft und Rathipur sowie die entsprechenden Werte für weitere für die Berechnung notwendige Parameter (Tabelle 11).

Tabelle 11: Stoffwerte für Luft und Rathipurschüttung bei 47 °C Dämmstoff-Mitteltemperatur sowie weitere Parameter [54]

Stoffwert bzw. Parameter	Formelzeichen	Wert
Dichte Luft [kg/m³]	ρ_L	1,1025
kinematische Viskosität Luft [m²/s]	ν_L	17,704*10 ⁻⁶
isobarer Wärmeausdehnungskoeffizient Luft [1/K]	β_L	3,1305*10 ⁻³
äußere Porosität Rathipur	$\phi_{a,RP}$	0,51
Partikeldurchmesser Rathipur [mm]	d_{RP}	5,4
Temperaturleitfähigkeit Rathipur [m²/s]	a_{RP}	0,0331
Wärmeleitfähigkeit Rathipur [W/(mK)]	λ_{RP}	0,0367
Permeabilität Rathipur [m²]	K_{RP}	1,3*10 ⁻⁷
charakteristische Länge [m]	l_{ch}	0,50
Verhältnis Höhe zu Schichtdicke (vertikale Aufstellung)	h/l	3,80
Temperaturdifferenz [K]	ΔT	45,0
Erdbeschleunigung [m/s²]	g	9,81

Die in Tabelle 11 dargestellten Werte ermöglichen die Berechnung der nach Darcy modifizierten Rayleigh-Zahl nach Gleichung 3. Tabelle 12 fasst die so erhaltenen Kennzahlen zusammen.

Tabelle 12: Nach Darcy modifizierte Rayleigh-Zahlen für den VS-WA

Kennzahl	Formelzeichen	Wert
Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl (vertikal)	$Ra^*_{vertikal}$	0,15
Darcy-modifizierte Rayleigh-Zahl (horizontal)	$Ra^*_{horizontal}$	0,14

Freie Konvektion tritt laut Literaturstellen wie dem VDI Wärmeatlas oder der DIN EN ISO 10456 ab $Ra^* > 2,5$ bzw. 30 für eine vertikale bzw. horizontale Orientierung auf [47], [55]. In weiteren Literaturstellen sind Werte von $Ra_c = 4\pi^2$ oder $Ra_c = 1000$ genannt [49], [55], [61]. Abbildung 44 zeigt den Zusammenhang von Nu und Ra in innendurchströmten vertikalen ebenen Schichten nach [47], [58].

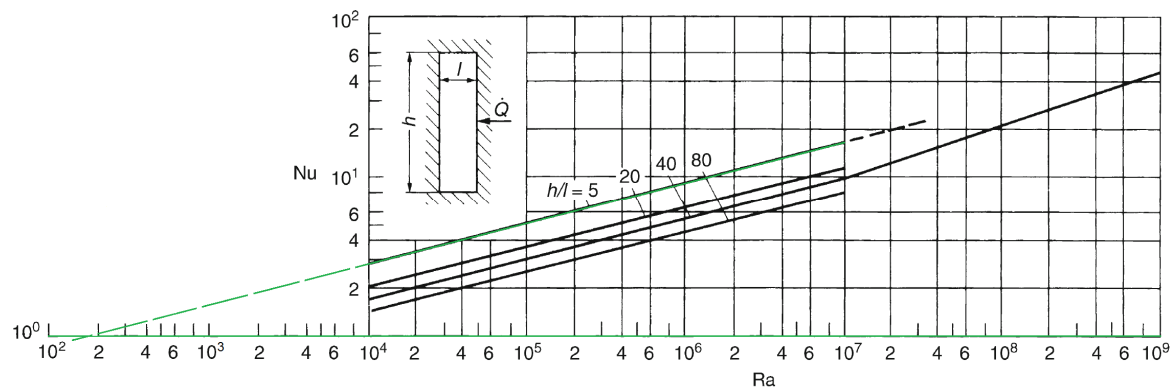


Abbildung 44: Mittlerer dimensionsloser Wärmeübergangskoeffizient Nu in Abhängigkeit von Ra bei der Wärmeübertragung in vertikalen ebenen Schichten [47]; mit grün eingezeichneter Vergrößerung des Ra -Bereiches

Bei einem Verhältnis von h/l für den VS-WA von 3,8 kann die Gerade für $h/l = 5$ als Annäherung genutzt werden. Unter Annahme der Zulässigkeit einer linearen Verlängerung des Zusammenhangs in den Bereich niedrigerer Ra -Zahlen (grün eingezeichnet) ergäbe sich für $Nu = 1$ (kein konvektiver Wärmetransport) eine Rayleigh-Zahl von ca. 180. Abbildung 45 zeigt das Verhältnis des Konvektionsfaktors $\epsilon_K (\triangleq Nu)$ und $Gr * Pr (\triangleq Ra)$ im begrenzten Raum nach Michejew [49].

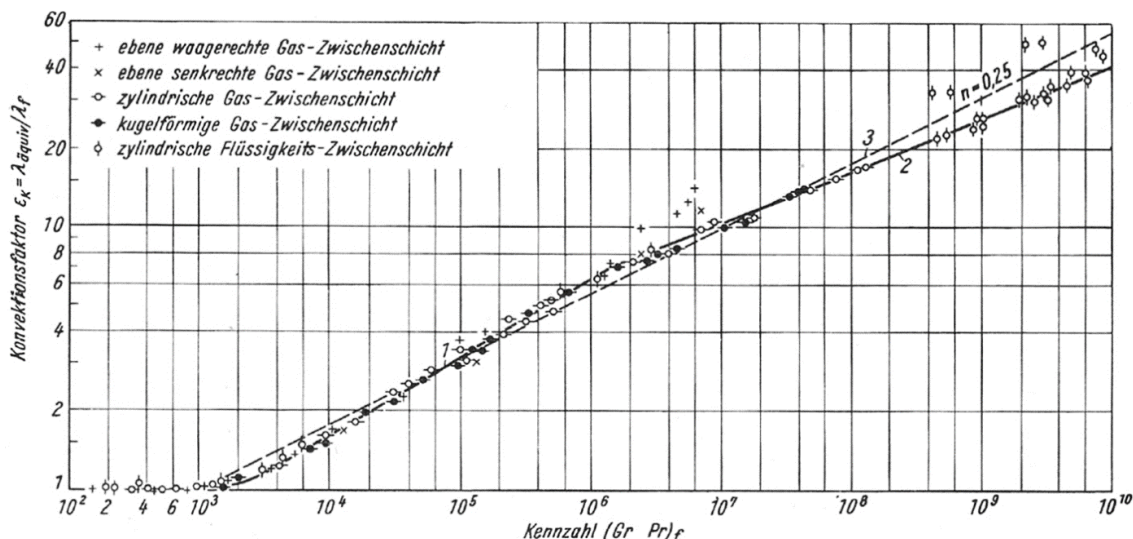


Abbildung 45: Konvektionsfaktor ϵ_K in Abhängigkeit der Rayleigh-Zahl ($Gr*Pr$) im begrenzten Raum [49]

Auch hier ist zu erkennen, dass erst ab $Ra > 1000$ Werte von $Nu > 1$ zu erwarten sind. Alle obig genannten Werte werden mit 0,15 nicht erreicht.

Kritische Rayleigh-Zahlen sind allerdings nur miteinander vergleichbar, sofern ein ähnlicher Aufbau mit vergleichbarer charakteristischer Länge existiert bzw. bei einem Vergleich von Darcy-modifizierten Rayleigh-Zahlen in Schüttungen, nur bei einer ähnlichen charakteristischen Länge und Permeabilität der Schüttung [48]. Dies ist bei den oben genannten Ra -Zahlen nicht der Fall. Da ein vergleichbarer Versuchsaufbau (Dimensionen, ähnliches Schüttgut) in der Literatur jedoch noch nicht zu finden ist, liefern die genannten Werte zumindest einen groben Anhaltspunkt. Nach dem Stand des Wissens wäre bei derart niedrigen Rayleigh-Zahlen keine freie Konvektion zu erwarten. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem VS-WA.

3.2.3 Ergebnisse und Auswertung

Belastungen des Dichtstoffes und des Wandsegments

Während der gesamten Versuchsdurchläufe erfolgt die messtechnische Aufnahme der Ausbeulung der Wanne (hervorgerufen durch die Volumenänderung des Wassers im Kreislauf des Versuchstandes aufgrund der Aufheizvorgänge), des Drucks und der Temperatur in der Wanne (Abbildung 47). Insgesamt wurden bis Projektende ca. 46 Versuchs-Zyklen durchgeführt. Es sind während dieser Versuchszeit keine Undichtigkeiten entstanden. Materialveränderungen oder andere negative Auswirkungen konnten ebenfalls nicht festgestellt werden.

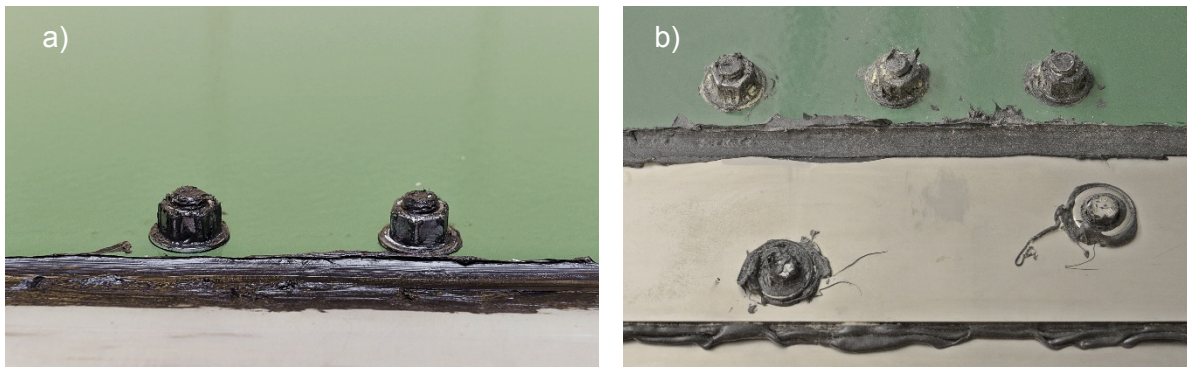


Abbildung 46: Vergleich von Sikasil-Dichtstellen; a) nach der Montage am 15.07.2015; b) nach über zwei Jahren Betrieb und 44 Testzyklen am 07.03.2018

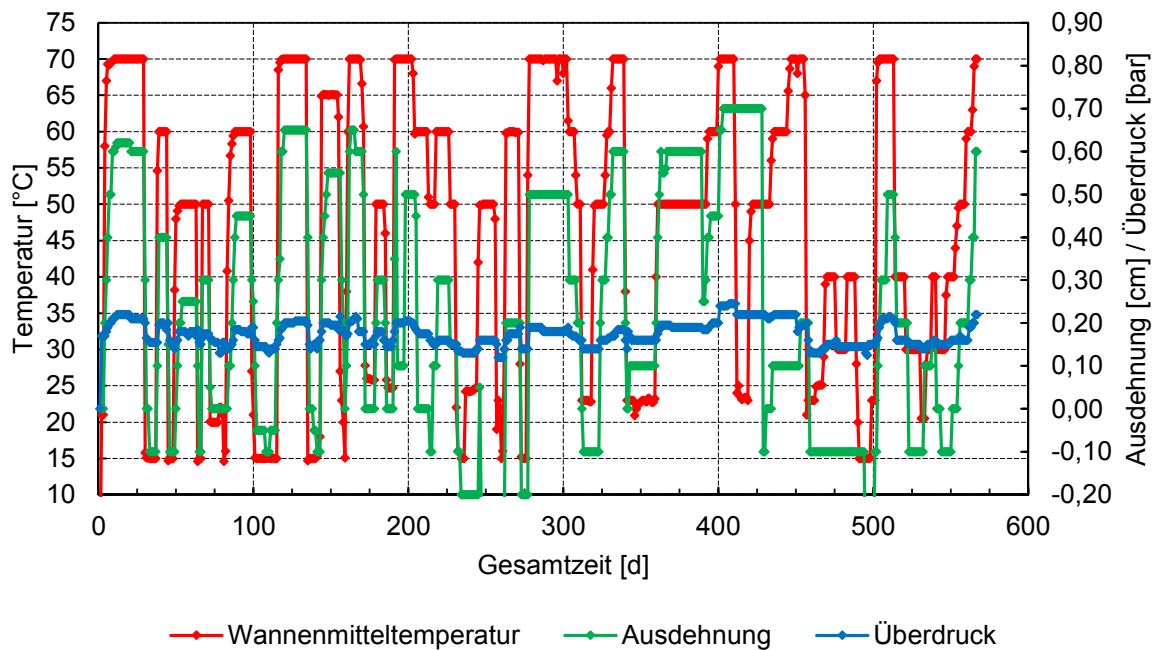


Abbildung 47: Beanspruchung des Wandsegments durch Aufheiz- und Abkühlvorgänge.¹⁹

Temperaturverläufe im Wandaufbau

Zur Analyse der Temperaturverteilung im Wandaufbau werden die zum Wandsegment parallelen Temperaturverläufe herangezogen. Abbildung 48 zeigt exemplarisch die Verläufe bei einer Wannenmitteltemperatur von 60 °C und 30 °C jeweils bei einem Abstand von 8,5 cm vom Wandsegment.

¹⁹ Die Wannenmitteltemperatur ist der Mittelwert aus den Temperaturen am Einlass, in der Wanne und am Auslass.

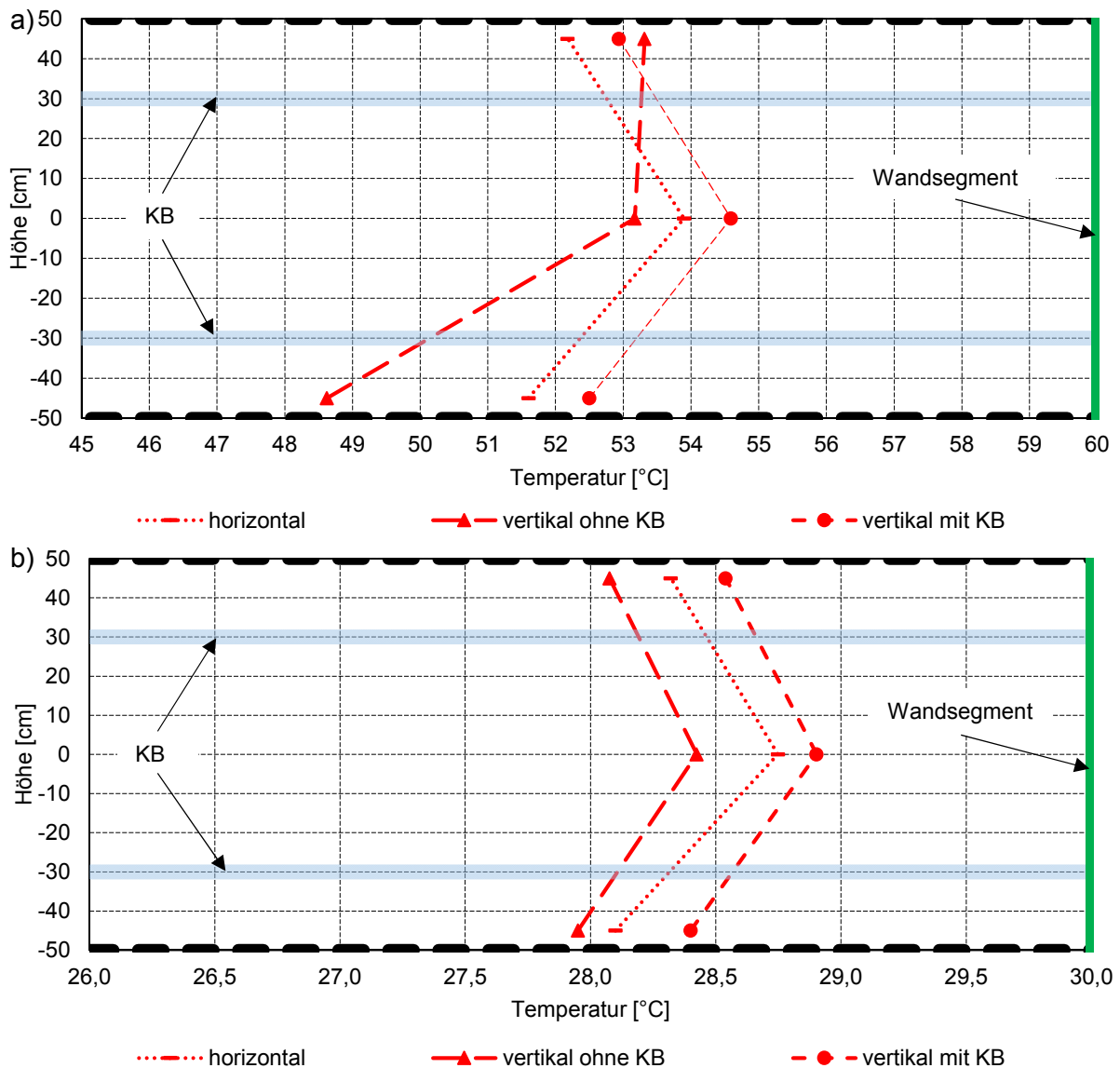


Abbildung 48: Temperaturverläufe in der Rathipur-Schüttung (Vorderseite des VS-WA) für die vertikale und horizontale Lage, 60 °C (a) bzw. 30 °C (b) Wannenmitteltemperatur, 8,5 cm Abstand zum Wandsegment, mit und ohne Konvektionsbremsen

In Abbildung 48a besitzen die Temperaturverläufe für die horizontale Lage und die vertikale Lage mit Konvektionsbremse eine ähnliche Form. Der zentrale Bereich in der Nähe des Wandsegments weist hohe Temperaturen auf. Aufgrund des Randbereichs ohne Beheizung und der größeren Übertragungsfläche außen sinken die Temperaturen für die außen liegenden Stützstellen.

Der Temperaturverlauf für die vertikale Lage ohne Konvektionsbremsen unterscheidet sich signifikant von den zwei beschriebenen Verläufen. In Abbildung 48a kann man sehr gut die niedrigen Temperaturen am unteren Ende des Segments erkennen. Die Temperatur am oberen Ende des Segments liegt über der Temperatur im Zentrum. Dieser Verlauf zeigt, dass sich offensichtlich ein Luftstrom über der gesamten Plattenhöhe erwärmt und somit freie Konvektion im Schüttgut auftritt.

Der Unterschied zu den Verläufen bei 30 °C (Abbildung 48b) ist deutlich zu erkennen. Hier sind alle drei Verläufe ähnlich. Der zentrale Bereich (bei Höhe 0 cm) weist die höchsten Temperaturen auf. Gleichzeitig sinken die Temperaturen für die außen liegenden Stützstellen. Im

Gegensatz zu den höheren Temperaturen tritt bei 30 °C Wannenmitteltemperatur offensichtlich keine oder nahezu keine freie Konvektion im VS-WA auf.

Wärmestromdichte und effektive Wärmeleitfähigkeit

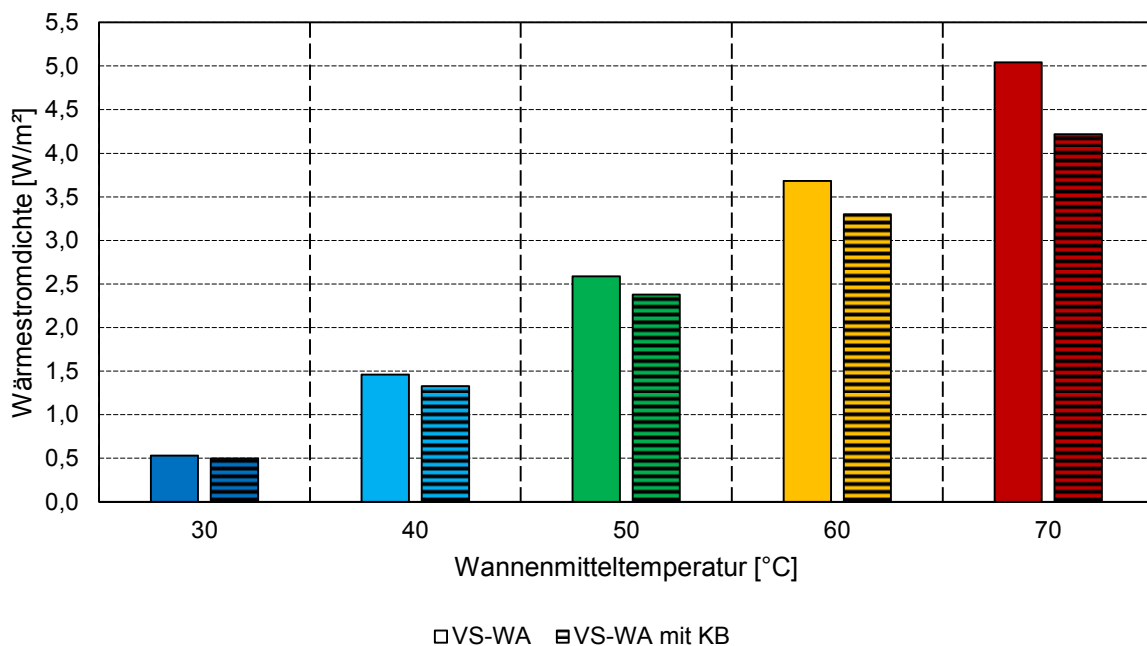


Abbildung 49: Wärmestromdichte für die Rathipur-Schüttung im VS-WA, mit und ohne Konvektionsbremsen (KB) bei 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C und 70 °C Wannenmitteltemperatur für die vertikale Lage (Temperaturdifferenz zur Umgebung ca. 7 K, 17 K, 27 K, 36 K und 46 K)

Abbildung 49 zeigt den Vergleich der Wärmestromdichten mit und ohne Konvektionsbremsen. Der Unterschied mit und ohne KB ist bei 30 °C und 40 °C (Temperaturdifferenz zur Umgebung ca. 7 K bzw. 17 K) sehr gering. Dies deutet, ebenso wie die parallelen Temperaturprofile (Abbildung 48), auf keinen oder lediglich einen sehr geringen Einfluss von freier Konvektion in diesem Temperaturbereich hin. Bei den höheren Temperaturen sinken die Wärmestromdichten bei der Variante mit KB signifikant.

Dementsprechend sinkt auch die effektive Wärmeleitfähigkeit mit eingebauten Konvektionsbremsen und es ergeben sich folgende Werte für λ_{eff} nach

$$\lambda_{\text{eff}} = \frac{\dot{q}_{\text{eff}} \cdot d_{\text{Schicht1-Schicht7}}}{(T_{\text{Schicht1}} - T_{\text{Schicht7}})} \quad (7)$$

für den VS-WA (Tabelle 13). Schicht 1 entspricht dabei der dem Wandsegment am nächsten gelegenen Temperaturmessschicht und Schicht 7 der dem Außenblech am nächsten Gelegenen, wie in Abbildung 42d und Abbildung 43 zu sehen ist.

Tabelle 13: Effektive Wärmeleitfähigkeit für Rathipur im VS-WA in vertikaler Lage mit und ohne Konvektionsbremsen bezogen auf die Mitteltemperatur des Dämmstoffs und die Temperaturdifferenz zur Umgebung

ohne Konvektionsbremsen			mit Konvektionsbremsen		
T_m [°C]	ΔT [K]	λ_{eff} [W/(m K)]	T_m [°C]	ΔT [K]	$\lambda_{eff,KB}$ [W/(m K)]
25,7	8,6	0,038	26,9	6,5	0,037
31,2	17,8	0,043	32,4	15,5	0,041
36,5	26,9	0,046	37,1	25,8	0,044
41,8	36,6	0,049	42,9	34,3	0,046
46,6	47,0	0,053	48,2	43,8	0,047

Da sich der Prüfstand in einem Labor mit relativ konstanten Temperaturen (ca. 23 °C) befindet, sind die Kurven für die effektive Wärmeleitfähigkeit über die mittlere Temperatur im Dämmstoff und über die Temperaturdifferenz zwischen Wanne und Umgebung qualitativ gleichwertig. Abbildung 50 zeigt die effektiven Wärmeleitfähigkeit im VS-WA im Vergleich zu den vom Projektpartner Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) ermittelten Stoffwerten über der Dämmstoffmitteltemperatur.

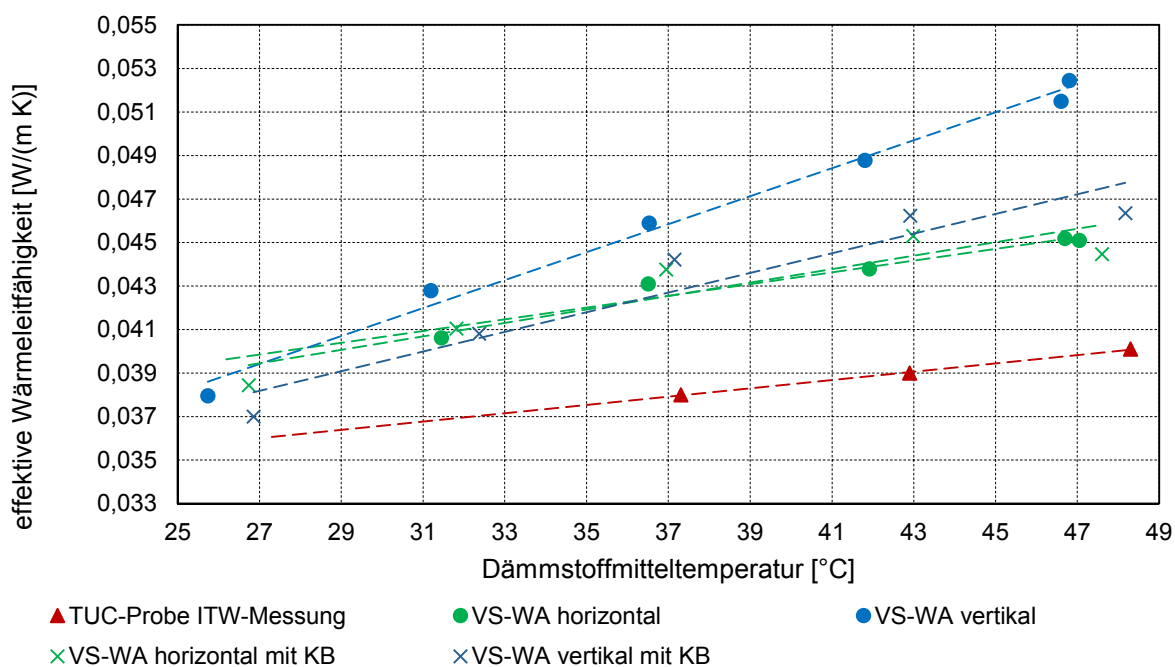


Abbildung 50: Wärmeleitfähigkeit der Rathipur-Schüttung (VS-WA, Werte des ITW) in Abhängigkeit der Mitteltemperatur des Dämmstoffs mit und ohne Konvektionsbremsen (Temperaturdifferenz zur Umgebung ca. 7 K, 17 K, 27 K, 36 K und 46 K.)

Im Vergleich zu den ITW-Werten²⁰ liegen die Werte des VS-WA für die vertikale Lage deutlich höher. Auch die Temperaturabhängigkeit ist größer, was zu einem steileren Anstieg der effektiven Wärmeleitfähigkeit über der Temperatur führt. Dies ist u. a. auf freie Konvektion im Schüttgut zurückzuführen.

Die Werte in horizontaler Lage mit und ohne Konvektionsbremse sowie in vertikaler Lage mit Konvektionsbremse unterscheiden sich nur gering (vgl. mit Tabelle 14 und Abbildung 51). Dies

²⁰ Das ITW hat u. a. eine Probe von TUC/TT untersucht, die hier dargestellt ist.

bestätigt die Schlussfolgerung, dass die Konvektion wirksam unterdrückt werden kann. Die Werte liegen jedoch im Vergleich zu den Daten des ITW immer noch höher. Dies ist auf unterschiedliche Messmethoden²¹ und Versuchsstandaufbauten sowie mögliche Materialschwankungen bzw. -veränderungen des Rathipurs zurückzuführen. Ein weiterer Effekt könnte unter Umständen durch Alterungserscheinungen verursacht werden. Das Zellgas könnte aus den geschlossenen Poren diffundieren. Bei der PUR-Schaum-Herstellung wird größtenteils n-/iso-Pentan als Treibmittel mit folgender Wärmeleitfähigkeit verwendet [59], [60]:

$$\lambda(T) = 0,00013 * T + 0,010, \quad (8)$$

mit T in °C. Luft besitzt im relevanten Temperaturbereich eine höhere Wärmeleitfähigkeit [59], [60]:

$$\lambda(T) = 0,00006 * T + 0,024. \quad (9)$$

Es wird vermutet, dass derartige Austauscheffekte dann auch in realen Wandaufbauten vorkommen.

Weiterhin ist auf Abbildung 50 zu erkennen, dass die effektive Wärmeleitfähigkeit bei niedrigeren Temperaturen im Wandaufbau (beim untersuchten Versuchsaufbau entspricht dies gleichzeitig geringen Temperaturdifferenzen) in vertikaler Lage und in horizontaler Lage unabhängig vom Einbau der Konvektionsbremsen in einem ähnlichen Bereich liegt (vgl. mit Tabelle 14 und Abbildung 51).

Tabelle 14: Effektive Wärmeleitfähigkeit für Rathipur im VS-WA in vertikaler und horizontaler Lage mit Konvektionsbremsen bezogen auf die Mitteltemperatur des Dämmstoffs und die Temperaturdifferenz zur Umgebung

T_m [°C]	ΔT [K]	$\lambda_{\text{eff,hor,KB}}$ [W/(m K)]	T_m [°C]	ΔT [K]	$\lambda_{\text{eff,ver,KB}}$ [W/(m K)]
26,7	6,5	0,038	26,9	6,5	0,037
31,8	16,6	0,041	32,4	15,5	0,041
36,9	26,3	0,043	37,1	25,8	0,044
43,0	34,8	0,045	42,9	34,3	0,046
48,4	43,9	0,046	48,2	43,8	0,046

²¹ Die Genauigkeit der Messapparatur am ITW ist hinsichtlich der Stoffwertbestimmung prinzipbedingt genauer. Die Zwei-Platten-Apparatur orientiert sich an der DIN EN 12664 und 12667.

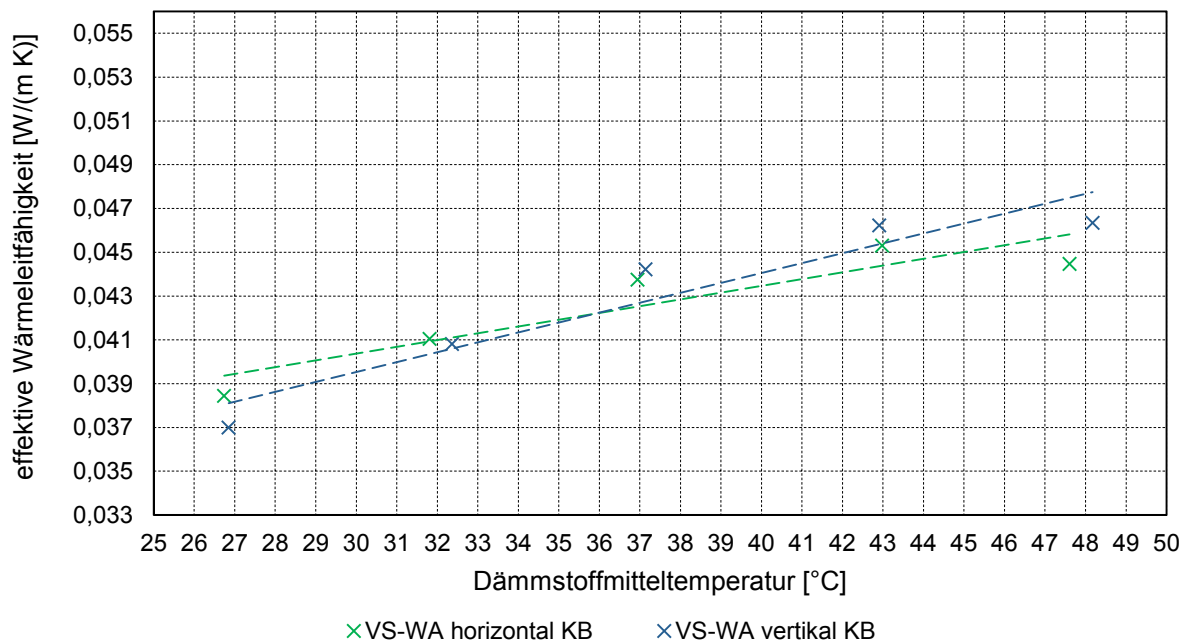


Abbildung 51: Wärmeleitfähigkeit Rathipur VS-WA vertikale und horizontale Aufstellung mit KB in Abhängigkeit der Mitteltemperatur des Dämmstoffs (Temperaturdifferenz zur Umgebung ca. 7 K, 17 K, 27 K, 36 K und 46 K)

Konvektionsfaktor

Um den Einfluss der Konvektion im VS-WA quantifizieren zu können, erfolgt die Nutzung des von Michejew [49] eingeführten Konvektionsfaktors ϵ_k :

$$\epsilon_k = \frac{\lambda_{\text{eff}}}{\lambda_{\text{Stoffwert}}} \tag{10}$$

ϵ_k ist das Verhältnis aus der effektiven Wärmeleitfähigkeit und dem Wärmeleitfähigkeits-Stoffwert. Tabelle 15 zeigt die Ergebnisse für einen Vergleich der VS-WA- und der ITW-Werte.

Tabelle 15: Konvektionsfaktoren für die Rathipur-Schüttung, Vergleich der ITW- und VS-WA-Werte für die vertikale Lage mit und ohne Konvektionsbremsen bezogen auf die Mitteltemperatur des Dämmstoffs und die Temperaturdifferenz zur Umgebung

		keine Konvektionsbremse	Konvektionsbremse
Gleichung		$\epsilon_k = \left(\frac{\lambda_{\text{VS-WA vertikal}}}{\lambda_{\text{ITW}}} \right)$	$\epsilon_k = \left(\frac{\lambda_{\text{VS-WA vertikal KB3}}}{\lambda_{\text{ITW}}} \right)$
T_m [°C]	ΔT [K]		
26	7	1,06	1,03
32	17	1,16	1,10
37	27	1,21	1,16
43	36	1,25	1,19
48	46	1,31	1,16

Demnach ist bei vertikaler Lage ohne Konvektionsbremsen eine Erhöhung des Wärmeverlusts um bis zu 31 % zu erwarten. Durch den Einsatz von Konvektionsbremsen kann man den Zuwachs auf bis zu 19 % begrenzen. Gleichzeitig sinkt scheinbar die Temperaturabhängigkeit. Bei 26 °C (30 °C Wannenmitteltemperatur) ist lediglich eine Erhöhung von 6 % bzw. mit KB

um 3 % zu erwarten. Bei Berücksichtigung der Materialschwankungen und der Messunsicherheit der Wärmestrommessplatten (5 % [56]) ist hier lediglich noch ein sehr geringer Unterschied zwischen den ITW-Werten und den Werten des VS-WA mit und ohne KB zu erkennen. Es ist jedoch zu beachten, dass ein Vergleich zwischen dem VS-WA und den Stoffwerten des ITW nur bedingt aussagekräftig ist. Wie bereits oben beschrieben, unterscheiden sich die Messmethoden, die Versuchsstandaufbauten und die Probengrößen signifikant. Weiterhin sind die Unterschiede teilweise auch auf mögliche Materialschwankungen bzw. -veränderungen des Rathipurs zurückzuführen.

Es bietet sich daher ein Bezug der Konvektionsfaktoren auf die effektive Wärmeleitfähigkeit bei horizontaler Lage des VS-WA an. Dabei wird angenommen, dass keine konvektiven Effekte bei der Bezugsgröße auftreten. So sind die zusätzlichen Verluste in der vertikalen Lage ohne Konvektionsbremsen geringer (Tabelle 16). Es ergibt sich ein Maximalwert von 116 %. Beim Einsatz von Konvektionsbremsen schwankt ϵ_k im Bereich der Messunsicherheit um 1,0. Die Werte verdeutlichen nochmals, dass bei niedrigen Dämmstoffmitteltemperaturen bzw. Temperaturdifferenzen zur Umgebung keine freie Konvektion auftritt und der Einbau der KB evtl. auftretende freie Konvektion wirkungsvoll unterbindet.

Tabelle 16: Konvektionsfaktor ϵ_k , Vergleich der Werte des VS-WA in horizontaler und vertikaler Lage mit und ohne Konvektionsbremsen bezogen auf die Mitteltemperatur des Dämmstoffs und die Temperaturdifferenz zur Umgebung

		keine Konvektionsbremse	Konvektionsbremse
Gleichung		$\epsilon_k = \left(\frac{\lambda_{VS-WA \text{ vertikal}}}{\lambda_{VS-WA \text{ horizontal}}} \right)$	$\epsilon_k = \left(\frac{\lambda_{VS-WA \text{ vertikal KB3}}}{\lambda_{VS-WA \text{ horizontal}}} \right)$
T_m [°C]	ΔT [K]		
26	7	1,00	0,99
32	17	1,05	0,99
37	27	1,07	1,01
43	36	1,11	1,02
48	46	1,16	1,00

Abbildung 52 zeigt die nach Darcy modifizierten Rayleigh-Zahlen (Ra^*) als Funktion des Konvektionsfaktors für die Werte aus Tabelle 16. Die Berechnung erfolgte mit temperaturabhängigen Stoffwerten für Luft und Rathipur nach der in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Vorgehensweise. Als Stoffwerte für Rathipur dienen die Messungen des ITW [50].

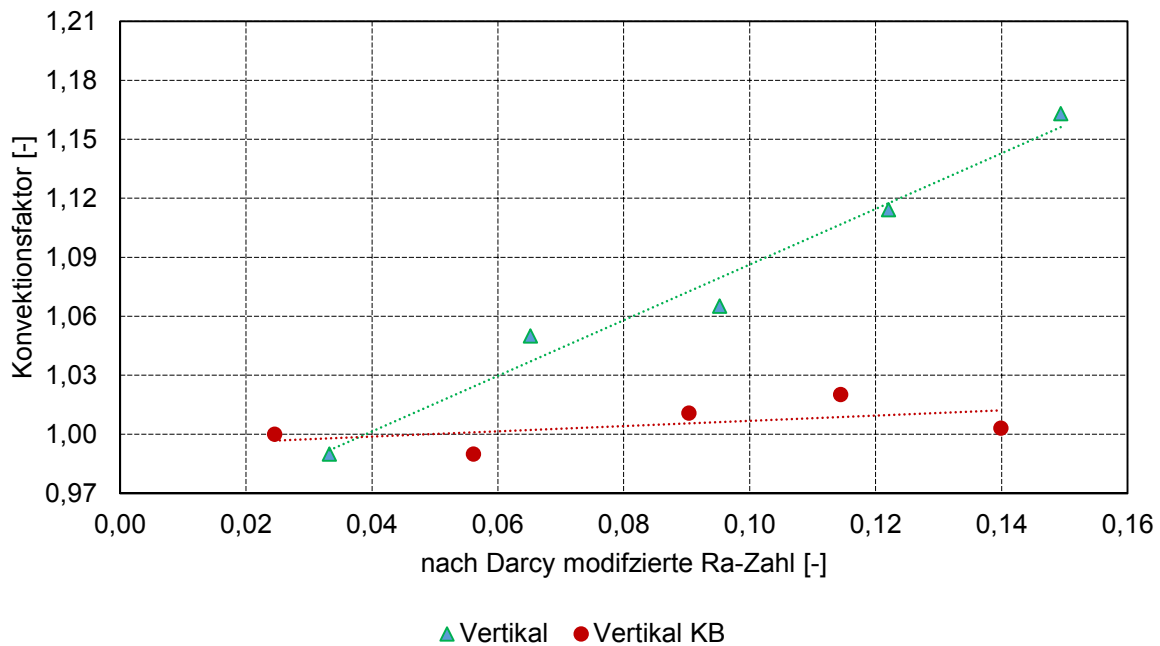


Abbildung 52: Konvektionsfaktor ϵ_K in Abhängigkeit von der nach Darcy modifizierten Rayleigh-Zahl Ra^* für den VS-WA

Beim Vergleich mit Literaturstellen zeigt sich, dass die freie Konvektion im VS-WA bei sehr niedrigeren Rayleigh-Zahlen einsetzt. Im VDI-Wärmeatlas oder in der DIN EN ISO 10456 werden kritische Rayleigh-Zahlen von 2,5 angegeben [47], [55]. Für den VS-WA ergibt sich eine kritische Rayleigh-Zahl von ca. 0,04. Unterhalb dieser Zahl tritt auch in vertikaler Aufstellung ohne KB keine freie Konvektion mehr im VS-WA auf. Es ist dabei weiterhin zu beachten, dass nach Untersuchungen des ITW ein Vergleich von Rayleigh-Zahlen bzw. von nach Darcy modifizierten Rayleigh-Zahlen in Schüttungen nur bei einer ähnlichen charakteristischen Länge und Permeabilität der Schüttung zulässig ist [48]. Diese kritische Rayleigh-Zahl kann also nur als Anhaltspunkt für das Auftreten von freier Konvektion in ähnlichen Wandaufbauten wie beim VS-WA gesehen werden.

Künstliche Besonnung

Um den Einfluss von solarer Strahlung auf die Messwerte am Demonstrator, insbesondere die Werte der Wärmestrommessplatten und der Thermoelemente im Wandaufbau, besser einschätzen und die Auswertung entsprechend anpassen zu können, erfolgte eine künstliche Besonnung des VS-WA. Abbildung 53 zeigt den Versuchsaufbau.



Abbildung 53: Versuchsaufbau für künstliche Besonnung am VS-WA

Mittels eines Baustrahlers (ca. 50 W/m²) erfolgte eine Besonnung des VS-WA von der Vorderseite. Die Dauer des Versuchs betrug zwei Stunden (von Stunde 6 bis 8 in Abbildung 54 und Abbildung 55). Zum Startzeitpunkt befand sich der Versuchsstand in einem stationären Zustand bei 30 °C Wannenmitteltemperatur. Abbildung 54 zeigt den zeitlichen Verlauf der Wärmestromdichte und der Temperaturen in den verschiedenen Schichten auf der Vorderseite des Versuchsstandes.

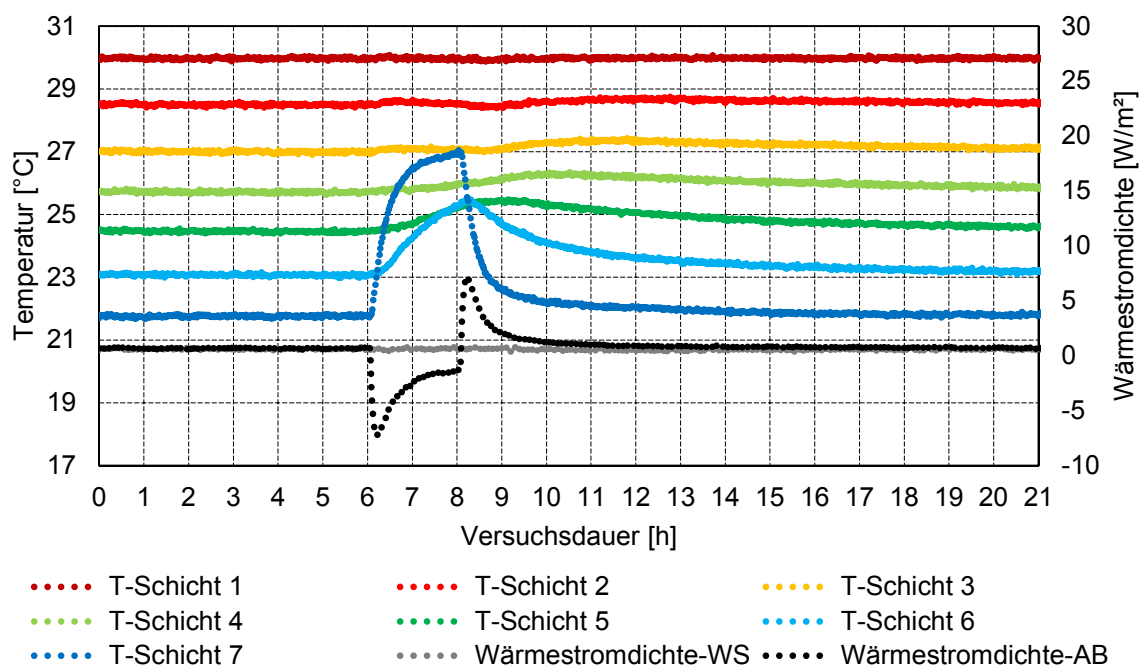


Abbildung 54: Temperatur und Wärmestromdichte in Abhängigkeit der Zeit während eines Besonnungs-Versuches am VS-WA

Es ist gut zu erkennen, dass vor allem die Temperaturen in Schicht 4 bis 7 (die äußeren Schichten) und die Werte der äußeren Wärmestrommessplatte (Wärmestrommessplatte-Außenblech WSP-AB, direkt auf der Innenseite unter dem Außenblech des Versuchsstandes) stark von der Besonnung beeinflusst werden. Die Temperaturverläufe der Schicht 2 und 3 zeigen, dass die Temperaturerhöhung je nach Abstand zum Außenblech auch zeitverzögert stattfindet. Außerdem erreichen die Werte erst mehrere Stunden nach dem Ende der Besonnung wieder den Ausgangszustand.

Bei einer Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit auf Basis von WSP-AB und der Temperaturdifferenz zwischen Schicht 1 und Schicht 7 bzw. der Differenz zwischen Schicht 2 und Schicht 6 ergeben sich die in Abbildung 55 blau eingezeichneten Werte. Es ist deutlich zu erkennen, dass während der Besonnung keine Werte nutzbar sind. Die effektive WLF liegt im negativen Bereich, da sich der Wandaufbau durch die Besonnung erwärmt. Nach Ende der Besonnung ergeben sich erst nach ca. 10 h wieder die gleichen Werte wie vor dem Start des Versuchs (bei Stunde 0 bis 6 in Abbildung 54 und Abbildung 55).

Die rot eingezeichneten Verläufe zeigen die Berechnung der effektiven WLF mit der Wärmestrommessplatte auf der Oberfläche des Wandsegments (WSP-WS), ebenfalls mit den Temperaturdifferenzen zwischen Schicht 1 und Schicht 7 bzw. Schicht 2 und Schicht 6. Obwohl die gemessene Wärmestromdichte keine Abweichung von dem Verlauf vor der Besonnung zeigt (Abbildung 54) weichen die Werte für die effektive WLF stark von den in stationären Zuständen ermittelten Werten ab. Dies ist ausschließlich auf die Veränderung der Temperaturen in den verschiedenen Schichten des Wandaufbaus zurückzuführen. Es ergeben sich für die Berechnung mit WSP-WS Abweichungen von bis zu 150 % (Schicht 1 - Schicht 7) bzw. 75 % (Schicht 2 - Schicht 6). Im Unterschied zu der Ermittlung mittels WSP-AB ergeben sich bei Nutzung von WSP-WS bereits ca. 3 h nach Ende der Besonnung wieder mit den Anfangswerten vergleichbare effektive Wärmeleitfähigkeiten.

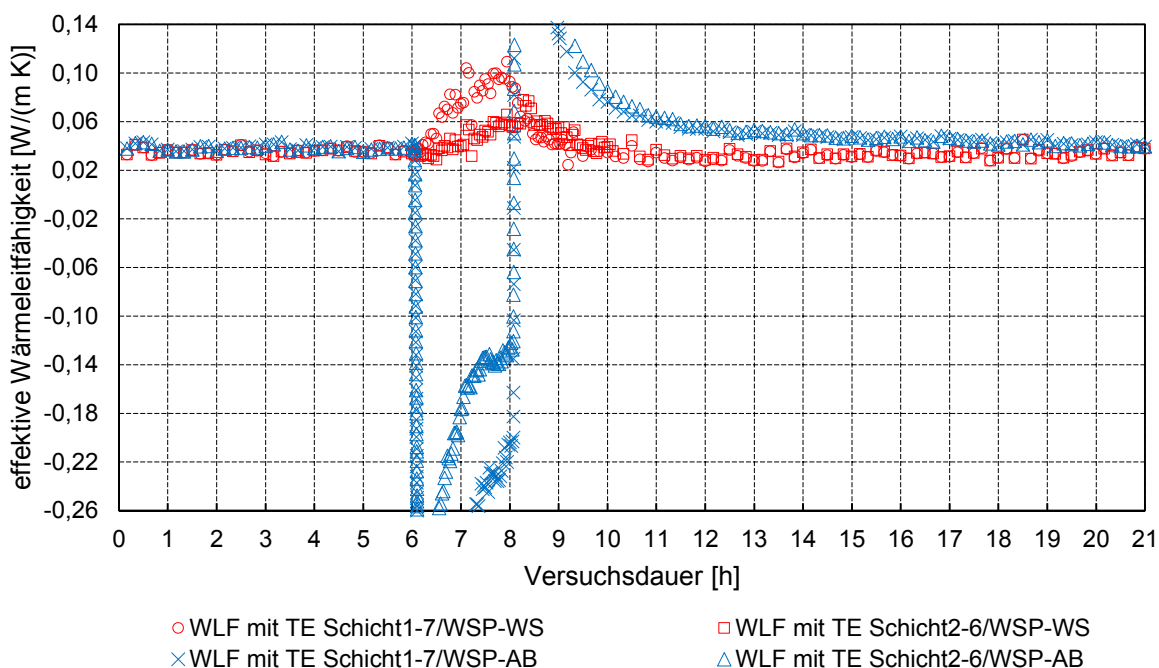


Abbildung 55: Effektive Wärmeleitfähigkeit von Rathipur in Abhängigkeit der Zeit am VS-WA während eines Besonnung-Versuches

Der Versuch zeigt anschaulich, dass insbesondere für repräsentative Messungen der effektiven Wärmeleitfähigkeit, Messwerte bei instationären Zuständen, bspw. hervorgerufen durch

äußere Einflüsse wie solare Einstrahlung, nicht ohne weitere Maßnahmen verwertbar sind. Eine Auswertung der Wärmeleitfähigkeits-Messwerte am Demonstrator scheint daher nur in ausreichenden zeitlichen Abstand zu einer solaren Bestrahlung möglich. Dies wurde bei der Auswertung der externen Verluste des Demonstrators berücksichtigt.

3.2.4 Simulation mit DELPHIN

Parallel zu den Versuchen mit dem VS-WA erfolgten Simulationen mit dem Programm DELPHIN, um die mit dem VS-WA erhaltenen Temperaturprofile zu kontrollieren. Genutzt wurde die Version 5.8.3 [51]. Das Programm arbeitet ausschließlich mit Wärmeleitung. Dementsprechend ist mit diesen Simulationen lediglich ein Vergleich der von freier Konvektion unbeeinflussten Temperaturprofile sinnvoll. Folgende Randbedingungen und Annahmen galten für die Simulationen:

- ausschließlich Wärmeleitung im Dämmstoff,
- Wannentemperatur: 60 °C;
- Außentemperatur: 25 °C;
- Wärmeübergangskoeffizient zum Wasser: 500 W/(m²K);
- Wärmeübergangskoeffizient am Außenblech: 8 W/(m²K);
- Nutzung der temperaturabhängigen Wärmeleitfähigkeit für Rathipur wie mit dem VS-WA (horizontal) bestimmt;
- Nutzung von Herstellerangaben für die Wärmeleitfähigkeit der Steinwolle und des XPS.

Das Ergebnis der Simulationen ist hier als Temperaturfeld dargestellt (Abbildung 56). Vor allem die symmetrische Verteilung ist sehr gut zu erkennen.

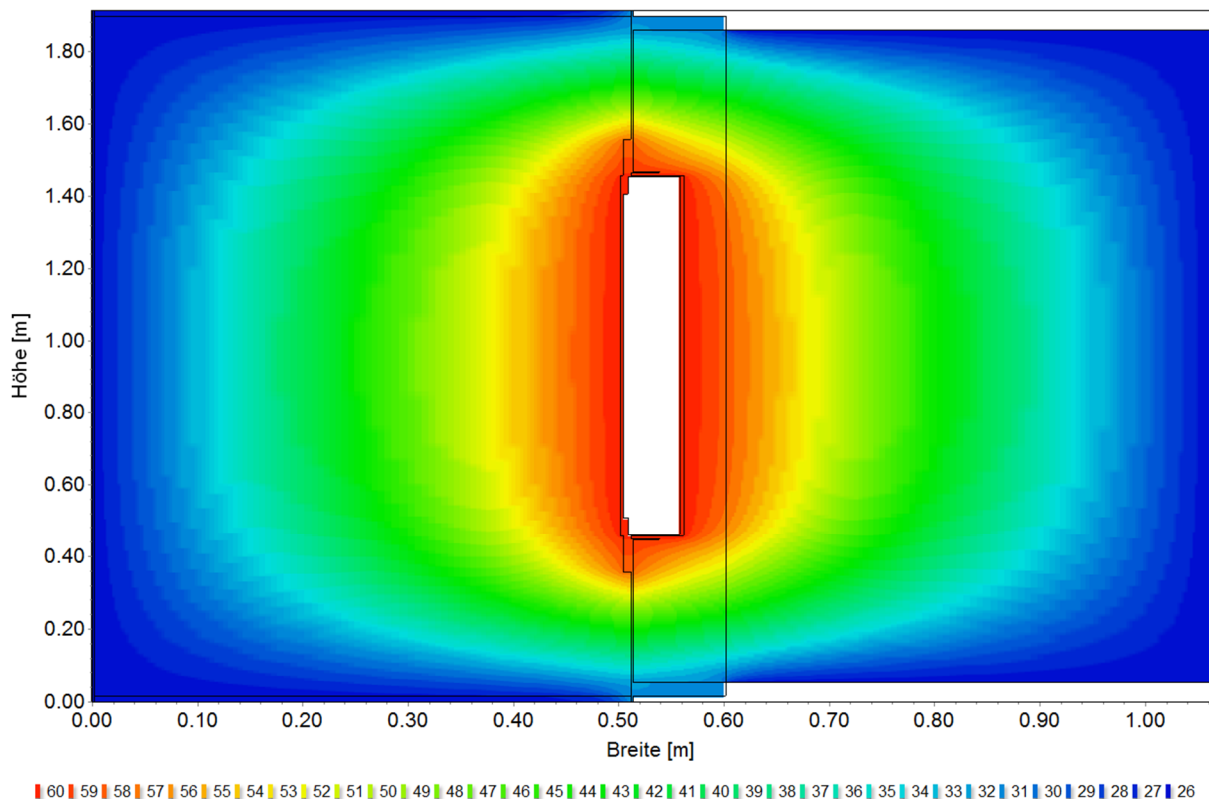


Abbildung 56: Seitenansicht Temperaturfeld am Versuchsstand Wandaufbauten

Wenn die Annahmen zum Wärmetransport zutreffen, müsste der Verlauf in horizontaler Lage bzw. in vertikaler Lage mit KB zu diesem Temperaturfeld passen. Daher sind die Temperaturprofile in vertikaler Lage mit KB in Abbildung 30 nochmal zusammen mit den Ergebnissen der Delphin Simulationen in einem Diagramm dargestellt.

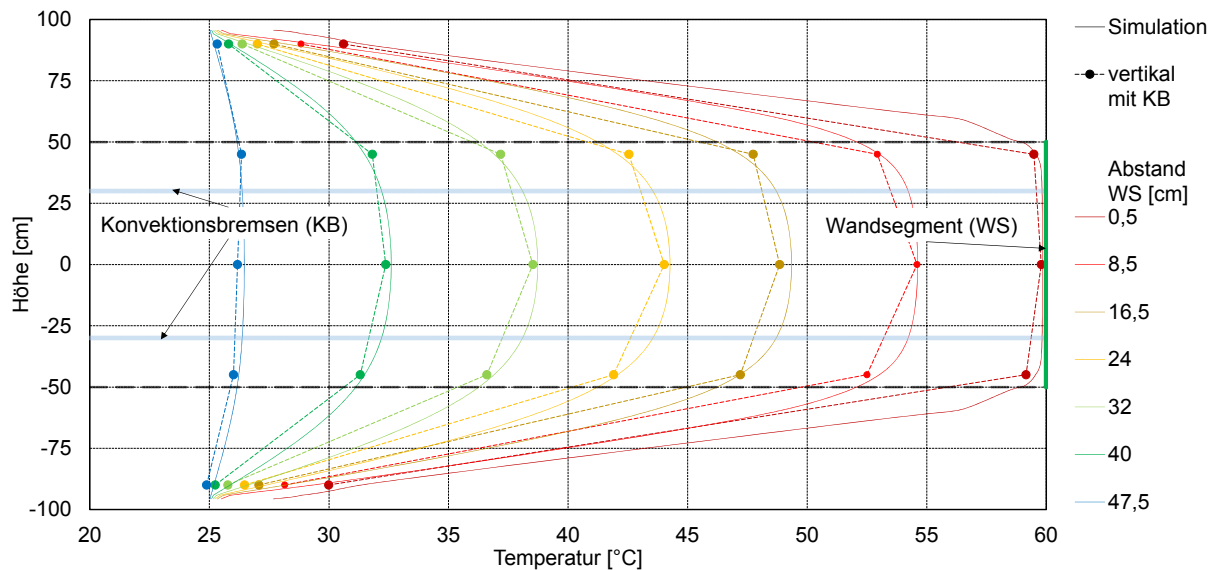


Abbildung 57: Zum Wandsegment parallele Temperaturverläufe im untersuchten Dämmstoff (Rathipur) am Versuchsstand VS-WA und bei Simulationen mit DELPHIN bei 60 °C Wannenmitteltemperatur

Das Diagramm zeigt, dass die Werte an den Stützstellen bei 0 cm am VS sehr gut zu den Werten der Delphin Simulation passen. Aufgrund der Nutzung der gleichen Randbedingungen und effektiven Wärmeleitfähigkeit für die Simulation ist dies plausibel. Die Werte an den anderen Stützstellen und somit der gesamte Verlauf stimmen ebenfalls sehr gut überein. Dies zeigt, dass die Annahmen bzgl. des Wärmetransports und der Wirksamkeit der Konvektionsbremsen korrekt sind.

Zusammenfassend heißt dies, dass in horizontaler Lage der Wärmetransport vor allem über Wärmeleitung abläuft und in vertikaler Lage ein signifikanter Anteil freie Konvektion hinzukommt und dieser Anteil durch entsprechende Einbauten effektiv unterbunden werden kann.

Der erkennbare geringe Unterschied bei den Stützstellen ist aller Voraussicht nach auf eine nicht exakte Positionierung der Thermoelemente im Versuchsstand, als auch auf ein leichtes Herabrutschen der Thermoelemente bei der Drehung in die vertikale Lage zurückzuführen. Beim späteren Zurückdrehen in die Horizontale bewegen sich die Thermoelemente wahrscheinlich nicht komplett in die Ursprungslage zurück. Dieses Verhalten ist ohne weitere, aufwendige Einbauten, die die Messung voraussichtlich stärker verfälschen würden, nicht zu verhindern.

3.2.5 Fazit

In vertikalen Wandkonstruktionen tritt freie Konvektion auf, die die Wärmedämmwirkung mindert. Die Langzeittests zeigen eine Eignung der eingesetzten Materialien (Dämmstoff, Dichtstoff, Wandsegmentbeschichtung). Die Vorgehensweise zum Aufbau des neuartigen Versuchsstandes zum praxisnahen Test mehrschichtiger Wandaufbauten und das dreistufige Konzept im Projekt (Stoffuntersuchungen im kleinen Maßstab am ITW, Laboruntersuchungen

im größeren Maßstab mit dem VS-WA, Umsetzung der Erkenntnisse und Tests am Demonstrator) haben sich bewährt. Die Erkenntnisse bzgl. der freien Konvektion in senkrechten Wandaufbauten wären ohne einen solchen Versuchsstand nicht möglich gewesen.

3.3 Einfluss der Feuchtigkeit²²

3.3.1 Befeuchtungsversuche

Vor der Durchführung von Trocknungsversuchen erfolgte zunächst eine Untersuchung des Verhaltens bei Befeuchtung. So war eine Einschätzung möglich, in welchem Maße eine spezielle Trocknungstechnik bei dem zum Einsatz kommenden Dämmstoff sinnvoll ist. Weiterhin können die Durchführung und der Vergleich von unterschiedlichen Trocknungstechniken erst bei Vorhandensein eines definierten und exakt reproduzierbaren Befeuchtungsvorgangs stattfinden.

Tauchen

Die erste Variante besteht im Tauchen des Dämmstoffes in ein Wasserbad für eine bestimmte Zeit. Ohne Gegengewicht ist dies nicht möglich, da der Dämmstoff aufschwimmt (Abbildung 58).

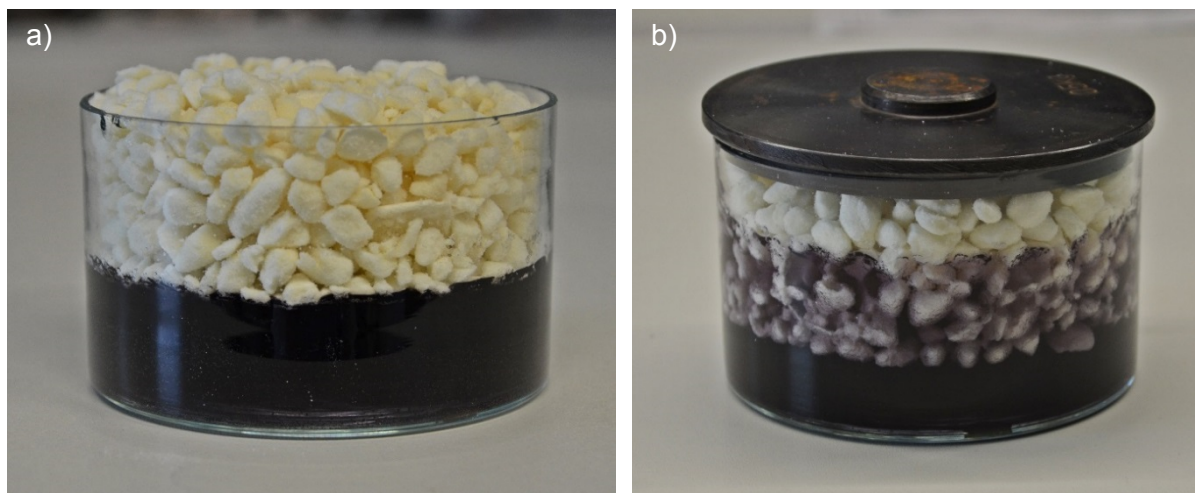


Abbildung 58: Befeuchtungsversuche mittels Tauchen in Wasser mit Tinteeinfärbung, Aufschwimmverhalten (a), mit Gewicht (b)

Mit einem Abdeckgewicht ist ein Tauchen problemlos möglich. Der Dämmstoff scheint sich nicht vollzusaugen und das Wasser tropft nach dem Tauchversuch wieder ab. Die Hydrophobierung bewirkt ein Abperlen des Wassers, sodass eine definierte und exakt wiederholbare Befeuchtung mit diesem Verfahren nicht möglich ist.

Weiterhin fand die Durchführung eines Langzeittest zum Verhalten von Rathipur unter Wasser statt (Abbildung 60). Die Proben befanden sich dafür ca. 15 Monaten unter Wasser. Dabei erfolgten ein regelmäßiges Auffüllen des Probenbehälters mit Wasser und ein Wiegen der gesamten Probe jeweils vor und nach dem Auffüllen, wie während der Porositätsmessungen. Abbildung 59 zeigt eine Probe des unter Wasser gelagerten Rathipurs in Originalzusammensetzung zu verschiedenen Zeitpunkten. Es ist gut zu erkennen, dass sich Gaseinschlüsse bilden und diese mit der Zeit größer werden. Diese Blasen entstanden nach ca. 4 Wochen und

²² Autoren des Abschnittes: Jan Mücke, Thorsten Urbaneck.

verschwanden durch erneutes Auffüllen nicht. Gleichzeitig stieg das Wasservolumen im Probenbehälter kontinuierlich. Dies deutet auf ein langsames Aufnehmen des Wassers durch das Rathipur hin. Da das Wasservolumen (Abbildung 60) nur gering ansteigt, scheint sich diese Aufnahme jedoch lediglich auf die äußeren Poren der Partikel zu begrenzen. Es wäre denkbar, dass sich ausschließlich die offenen oder leicht beschädigten Poren an der Oberfläche der Partikel befüllen und alle vollständig intakten Poren kein Wasser aufnehmen.

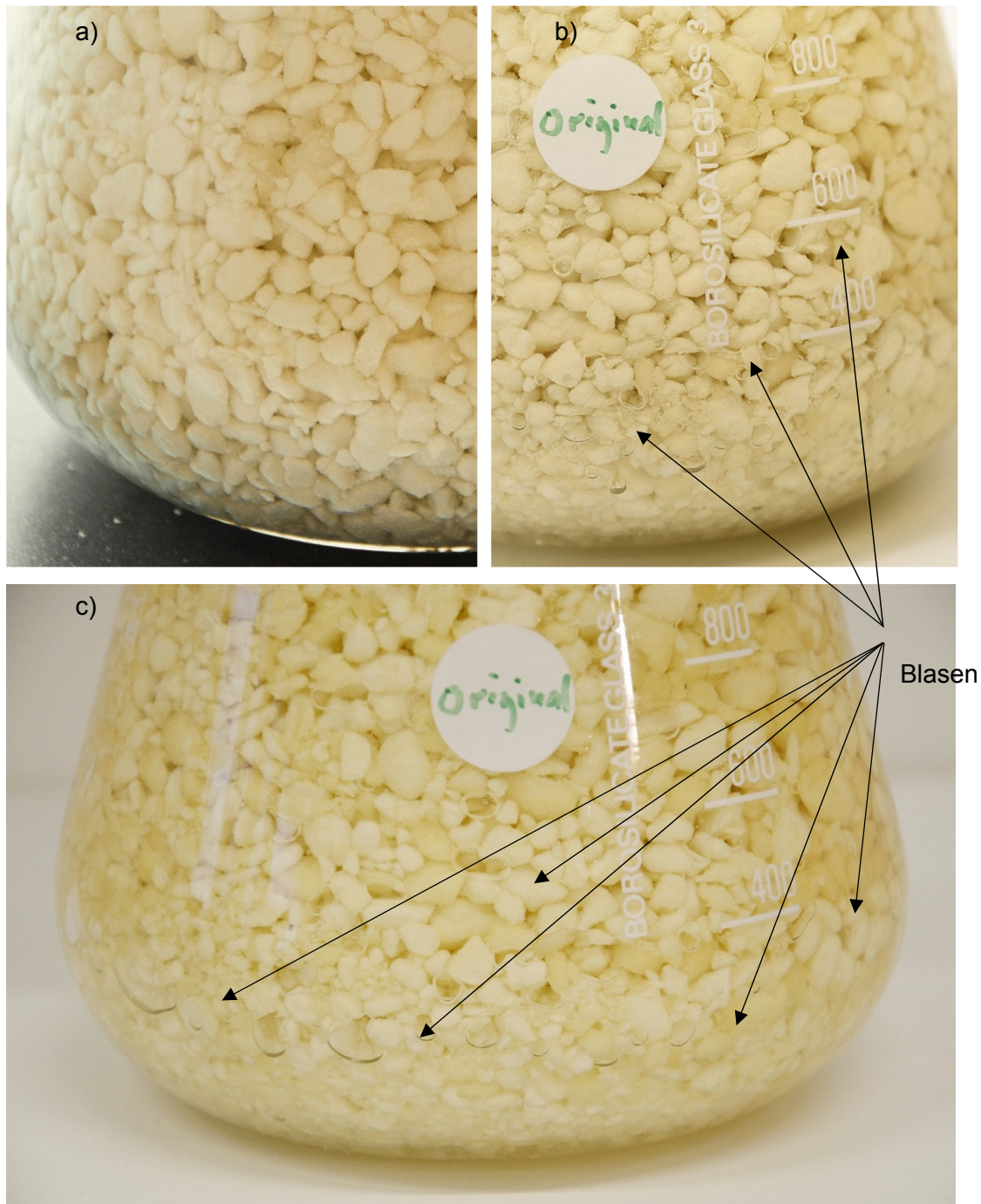


Abbildung 59: Verhalten von Rathipur unter Wasser; a) nach 7 Tagen (keine Blasen erkennbar), b) nach 100 Tagen (Blasenbildung), c) nach 280 Tagen (größere Blasen)

Abbildung 60 zeigt den Verlauf des Wasservolumens im Probenbehälter über die Zeit. Für eine vollständige Lagerung unter Wasser und regelmäßiges Auffüllen des verdunsteten bzw. aufgesaugten Wassers ist auch nach 280 Tagen nur ein vergleichsweise geringer Anstieg des Wasservolumens (von 51 % auf 67 %) in Hinblick auf die Versuchsdauer festzustellen. Die Hydrophobierung scheint sehr wirkungsvoll zu sein und zudem über längere Zeiträume gut zu funktionieren.

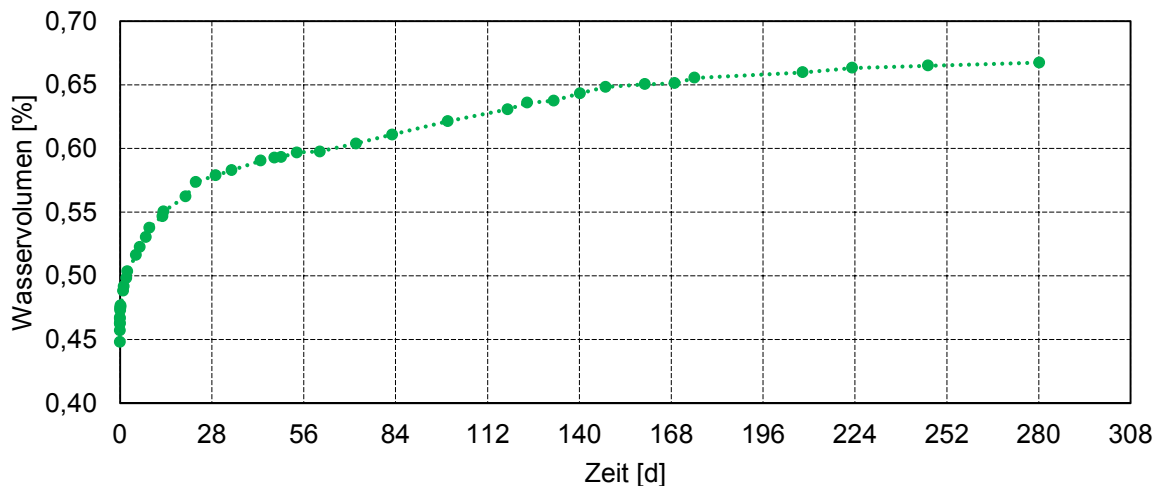


Abbildung 60: Verlauf des Wasservolumens über der Zeit bei einer unter Wasser gelagerten Rathipurprobe in Original-Zusammensetzung

Klimaschrank

Als weitere Variante zur Befeuchtung kam eine Konditionierung von Proben in einem Klimaschrank bei definierter Luftfeuchte zum Einsatz. Die erreichbare Wasserbeladung der Proben mit dieser Variante ist jedoch unter Beachtung der aufzuwendenden Zeit deutlich zu niedrig. Man kann bei einer Konditionierung über mehrere Tage bei einer relativen Luftfeuchte von 95 % (bei 40 °C) eine maximale Beladung im Bereich von 5 % Massenanteil Wassergehalt erzielen.

Besprühen und Mischen

Versuche mit Besprühen und anschließendem Mischen bzw. Umrühren des Granulats erbrachten die besten Ergebnisse hinsichtlich einer gleichmäßigen, reproduzierbaren und definierten Befeuchtung. Wie in Abbildung 61 zu sehen ist, bildet sich nach dem Besprühen zunächst ein Flüssigkeitsfilm auf dem Granulat. Diesen kann man nun mit einem dünnen Stab im gesamten Granulat durch Umrühren, Durchmischen und Unterheben gleichmäßig verteilen.



Abbildung 61: befeuchtetes Rathipur nach einer Befeuchtung mittels Besprühen

Mit diesem Verfahren ist eine maximale Wasserbeladung von ca. 20 % Massenanteil zu erreichen. Ab diesem Wert sickert das Wasser durch das Schüttgut hindurch. Das Durchsickern von Wasser könnte bei den Trocknungsversuchen u. a. zu folgenden Problemen führen, die zu vermeiden sind:

- Ansammlung von Wasser am Boden der Packung,
 - ungleichmäßige Verteilung der Feuchte,
 - nicht repräsentative Trocknungsergebnisse,
- Kurzschluss am Lüfter durch Wassereintritt (siehe Abbildung 63).

Sorptionsisotherme

Das PUR-Granulat nahm bei den oben beschriebenen Befeuchtungsversuchen generell sehr wenig Wasser auf. Die Eigenschaften des Dämmstoffes bzgl. Wasseraufnahme durch das umgebende Klima wurden daher nochmal genauer untersucht, da dies auch für den späteren Betrieb am Demonstrator von Belang war. In diesem Zusammenhang erfolgte die Aufnahme einer Sorptionsisothermen bei 40 °C (Abbildung 62). 40 °C ist eine realistische Temperatur in der Wandmitte bei einem beladenen Speicher. Der Verlauf der Kurve ist im Vergleich zu Sorptionsisothermen anderer Schüttgüter plausibel [62].

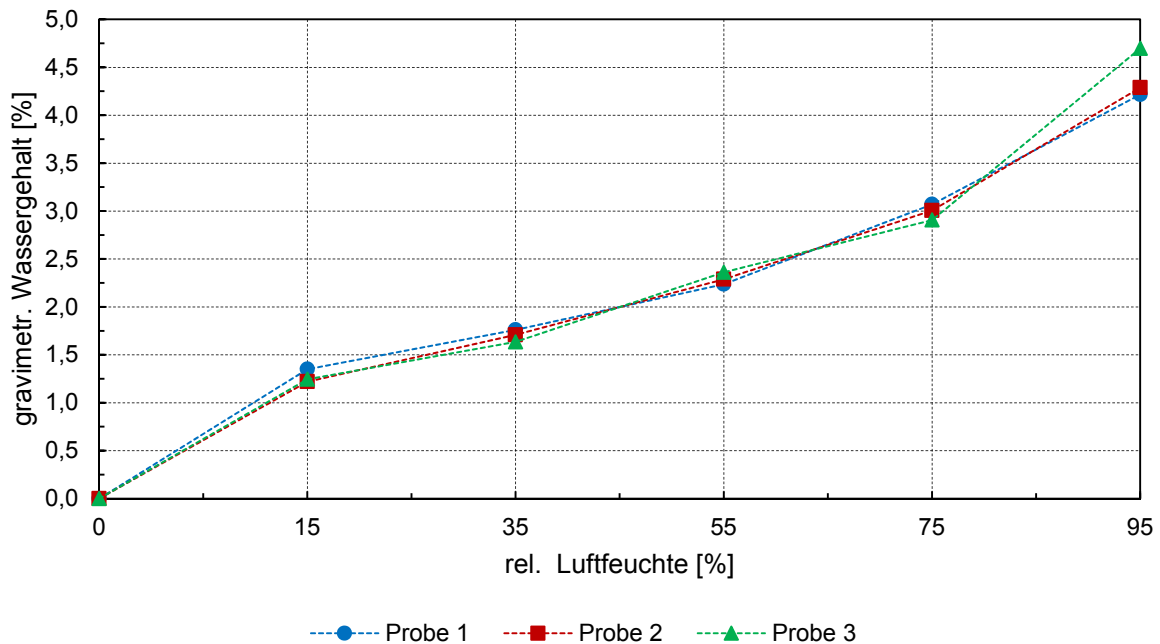


Abbildung 62: Sorptionsisotherme Rathipur bei 40 °C

Die Abbildung zeigt, dass der Wassergehalt selbst bei 95 % relativer Luftfeuchte nicht über 5 % Massenanteil steigt. Dies bestätigt die hohe Qualität der Hydrophobierung des Rathipur. Durch die gemäßigten klimatischen Umgebungsbedingungen in Deutschland sind daher keine hohen Wasserbeladungen zu erwarten. Kondensationsprobleme, Leckagen und Regeneinflüsse könnten jedoch zu erhöhten Wassergehalten in der Dämmschicht führen. Eine weitere Untersuchung von möglichen Trocknungstechniken erschien daher zwischenzeitlich sinnvoll und zweckmäßig.

3.3.2 Aufbau Versuchsstand Trocknungstechnik

Der Versuchsstand Trocknungstechnik (Abbildung 63) ist als Durchströmungskanal mit Umgebungs- bzw. Raumluft ausgelegt. Die Nutzung von Umgebungsluft bietet den Vorteil, dass eine Vorkonditionierung der Luft entfällt und entspricht daher einer preiswerten Trocknungsmöglichkeit. Als Lüfter kommt ein PC-Lüfter mit 12 cm Durchmesser und 24 V-Anschluss zum Einsatz. Die Wände sind aus XPS gefertigt. Abbildung 63 zeigt den Aufbau des Versuchsstandes.

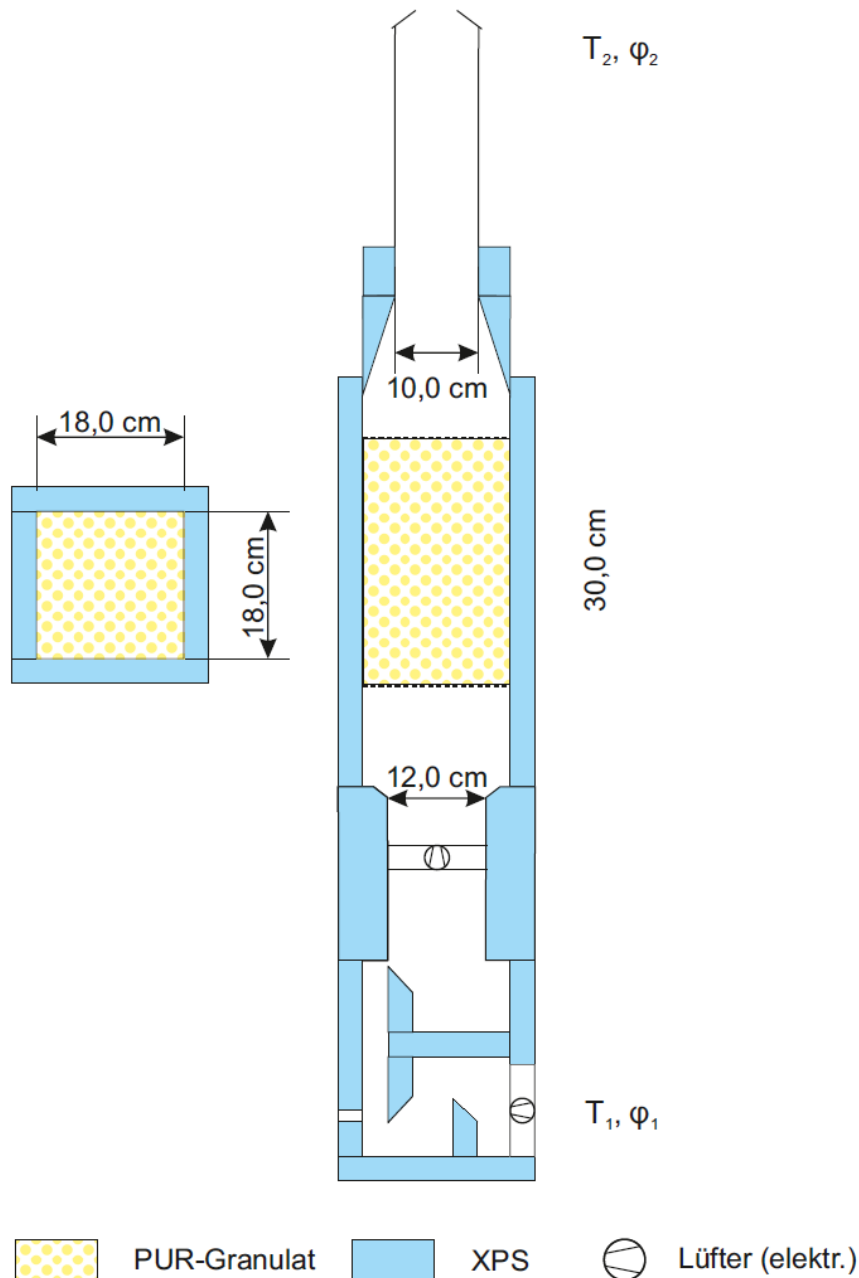


Abbildung 63: Versuchsstand Trocknungstechnik, schematische Darstellung des Versuchsstandes Trocknungstechnik

Das Volumen der durchströmten Schüttung beträgt $0,0093 \text{ m}^3$ bei einer Schütthöhe von $0,300 \text{ m}$ und einer Querschnittsfläche des Kanals von $0,0324 \text{ m}^2$. Der Versuchsstand bietet zudem die Möglichkeit, Schütthöhen von $0,150 \text{ m}$ und $0,075 \text{ m}$ zu untersuchen. Abbildung 64 zeigt den fertig zusammengebauten Trocknungskanal in leerem und befülltem Zustand.

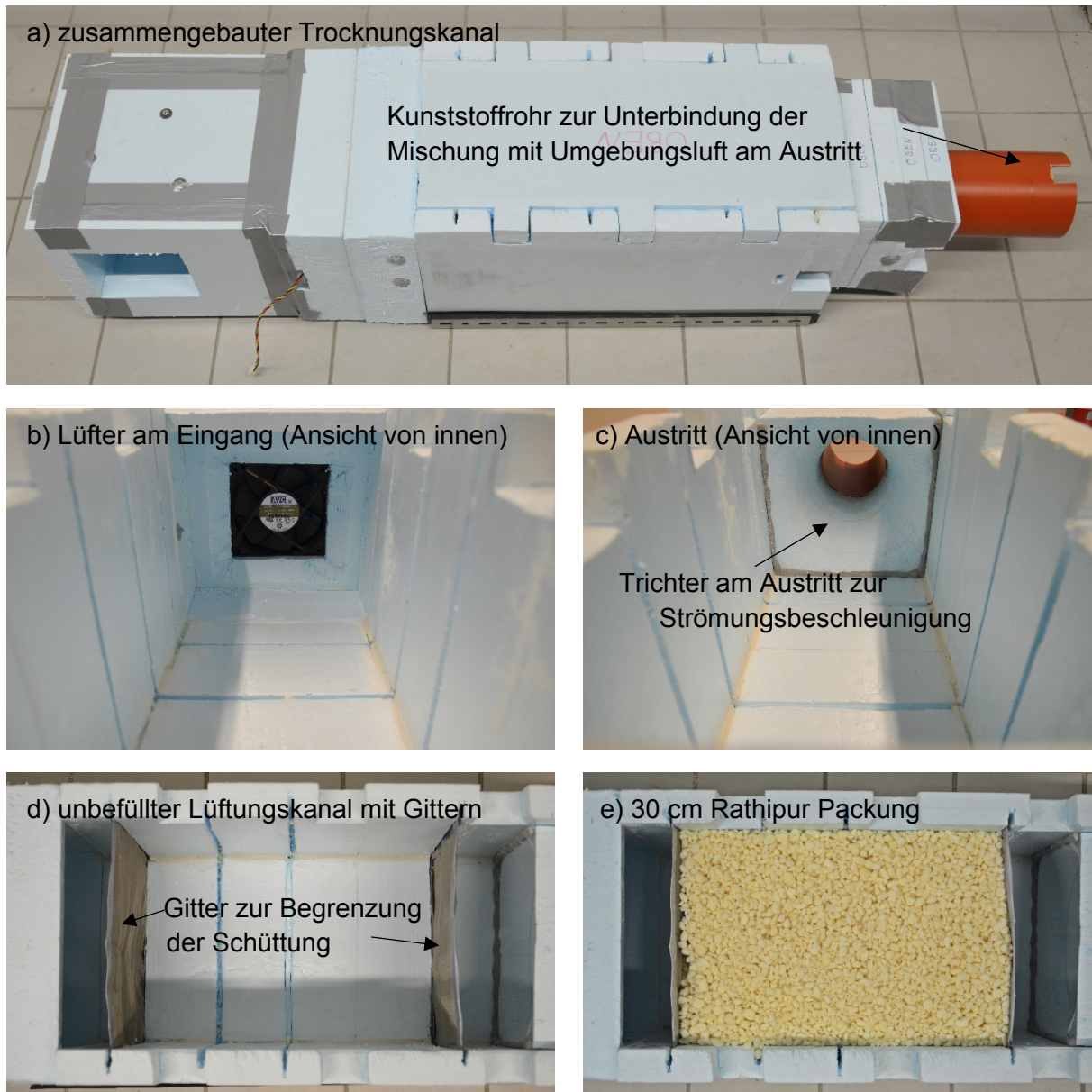


Abbildung 64: Versuchsstand Trocknungstechnik, Strömungskanal

3.3.3 Modellvorstellung Trocknungskanal

Vor der Durchführung von Versuchen erfolgt eine Zusammenstellung der bei der Trocknung mit Umgebungsluft in dem gebauten Kanal zu erwarteten Effekten und Transportmechanismen. Diese sind in Abbildung 65 dargestellt.

Die angesaugte Raumluft (Zustand 1: T_1 , φ_1) wird auf das Gitter und die Dämmstoffschüttung geblasen. Beim Auftreffen auf das Gitter bzw. die Schüttung kann es zu Rückströmeffekten kommen. Während des Durchströmens der PUR-Granulat-Packung wird das dort verteilte Wasser aufgenommen und ausgetragen. Am Austritt des Kanals (Zustand 2: T_2 , φ_2) kann es zur Mischung mit Raumluft am Messfühler kommen. Weiterhin ist eine Rezirkulation des mit Wasser beaufschlagten Luftmassenstroms am Ausgang nicht komplett auszuschließen.

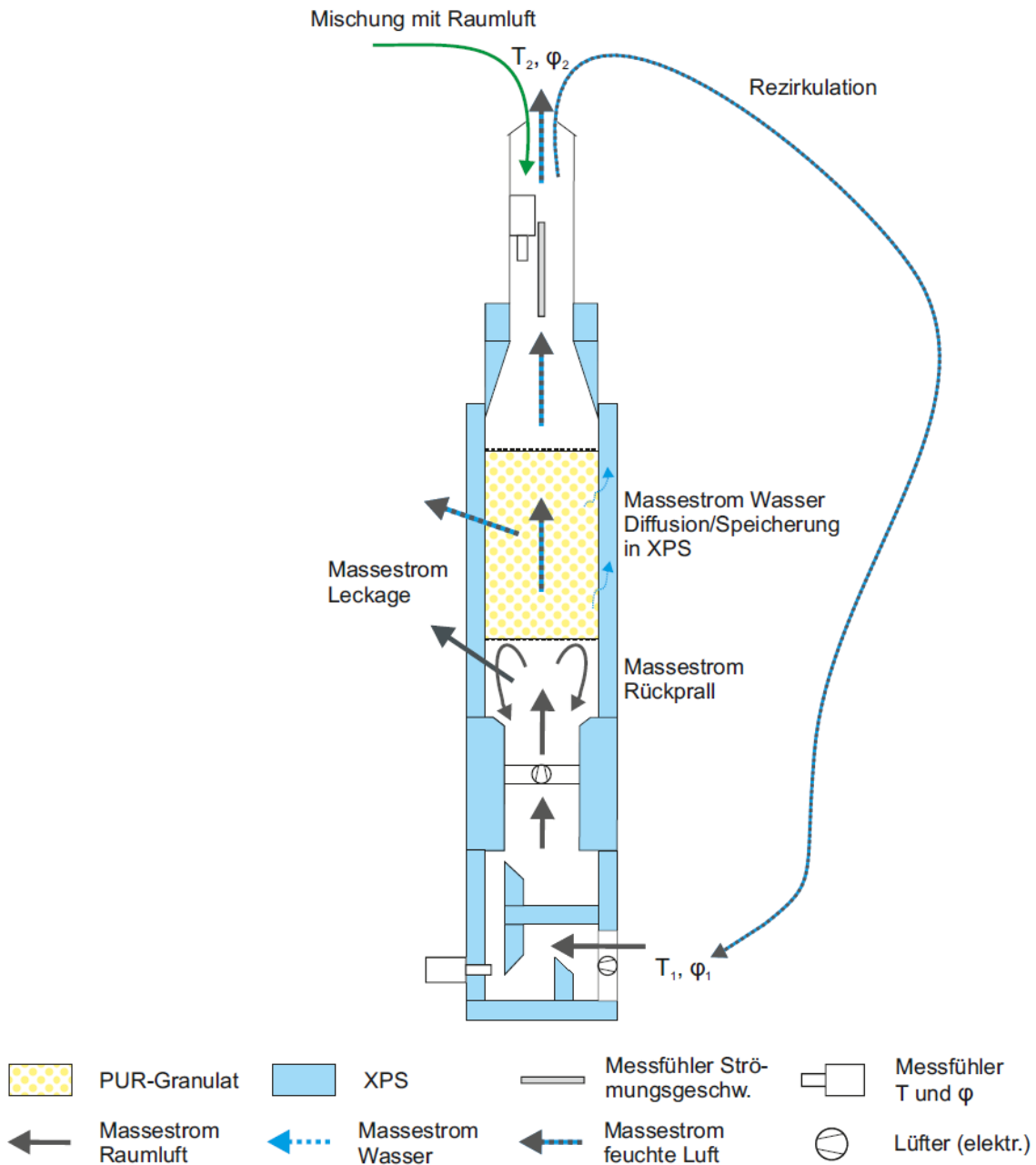


Abbildung 65: Versuchsstand Trocknungstechnik, Modell zur Luftströmung durch den Trocknungskanal

Kleine Leckagen sind über den gesamten Strömungskanal möglich, jedoch durch exaktes Fügen und Abdichten der einzelnen Bauteile minimiert.

Tests mit getauchtem XPS und Tests im Klimaschrank mit bis zu 95 % Luftfeuchte zeigten, dass XPS keine signifikanten Mengen an Wasser aufnimmt (Kurzzeitversuche). Deswegen wird eine diffusive Wasseraufnahme im Versuchsstand ausgeschlossen.

Abbildung 66 zeigt den Versuchsstand während der Trocknungsversuche. Der Strömungskanal steht auf einer Waage. Mit dieser Waage können die Masseänderungen während der Trocknung festgestellt werden.



Abbildung 66: Versuchsstand Trocknungstechnik, gesamter Aufbau

3.3.4 Festlegung der Versuchsparameter und Versuchsdurchführung

Die Durchströmgeschwindigkeit ist einerseits niedrig zu wählen, um bei einer späteren Umsetzung möglichst geringe Wärmeverluste durch die durchströmte Dämmschicht zu erreichen. Andererseits muss diese jedoch ausreichend hoch sein, sodass signifikante Mengen an Feuchtigkeit ausgetragen werden können. Weiterhin ist die Durchströmgeschwindigkeit vom Messbereich des verwendeten Hitzdrahtanemometers abhängig. Die Festlegung der Strömungsgeschwindigkeit erfolgt auf Basis dieser Faktoren auf 0,10 m/s (untere Messgrenze des verwendeten Anemometers bei ausreichender Genauigkeit), 0,15 m/s und 0,20 m/s an der Messstelle am Austritt des Strömungskanals.

Wie bereits bei den Befeuchtungsversuchen beschrieben, sind lediglich Beladungen unter 20 % Masseanteil Wasser machbar. Höhere Wassergehalte führen zum Durchsickern des Wassers. Lediglich durch die relative Feuchte des Umgebungsklimas ist keine Befeuchtung von über 5 % Masseanteil zu erwarten (s. a. Abschnitt Sorptionsisotherme). Um jedoch weitere praktisch relevante Befeuchtungen durch beispielsweise Regenwassereintritt oder Kondensationseffekte zu simulieren, erfolgt die Festlegung der Wasserbeladung auf 5 %, 10 % und 15 % Masseanteil Wassereintrag.

Neben diesen Versuchen müssen Verdunstungsversuche mit identischer Versuchsstandkonfiguration erfolgen, um die erzielte Beschleunigung des Trocknungsvorganges durch die Umgebungsluft-Durchströmung quantifizieren bzw. die Effektivität der Trocknungstechnik einschätzen zu können. Es ergeben sich somit die in Tabelle 17 dargestellten Versuche.

Tabelle 17: Versuchsmatrix Trocknungstechnik mit Umgebungsluft

Strömungsgeschwindigkeit am Austritt [m/s]	Wasserbeladung [% Masseanteil]		
	5	10	15 ²³
0,00 (Verdunstung)		X	
0,10	X	X	
0,15	X	X	X
0,20	X	X	X

Während der Trocknungsversuche erfolgt die Aufnahme folgender Messwerte:

- Temperatur am Eintritt T_1 ,
- relative Feuchte am Eintritt φ_1 ,
- Temperatur am Austritt T_2 ,
- relative Feuchte am Austritt φ_2 ,
- Strömungsgeschwindigkeit am Austritt v_2 ,
- Gewicht des Versuchsaufbaus
 - ohne Rathipur,
 - mit Rathipur,
 - mit Wasser,
 - zusammengebaut am Start des Versuchs,
 - Verlauf des Gewichts während der Trocknung.

Mit diesen Werten ist die Berechnung des Luftmassenstroms mit

$$\dot{m}_L = \dot{m}_{L,1} = \dot{m}_{L,2} = v_2 * \rho_{L,2} * A_2 * k_v \quad (11)$$

möglich. Man nimmt dabei an, dass der Luftmassenstrom am Austritt identisch mit dem am Eintritt ist. Der Korrekturfaktor k_v wurde eingeführt, um die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit am Austritt auf der Querschnittsfläche zu berücksichtigen. Die Strömungsgeschwindigkeit ist am Rand niedriger als im Zentrum. Die Messwertaufnahme erfolgt im Zentrum. Der Faktor normiert die Geschwindigkeit auf einen gemittelten Wert über den gesamten Querschnitt.

Die Berechnung des Wassermassenstroms erfolgt mit dem Luftmassenstrom über

$$\dot{m}_W = \dot{m}_L * (x_2 - x_1). \quad (12)$$

Der Feuchtegehalt x am Eingang bzw. Ausgang wurde hier mit dem Luft-Kennwert-Rechner der Professur Technischen Thermodynamik bestimmt [63]. Die dafür notwendigen Kennwerte

²³ Die Trocknung einer 30 cm-Packung bei 0,10 m/s und einer Wasserbeladung von 15 % dauert sehr lange. Da während der Messung auch die Ablesung der Waage erfolgen muss, konnte diese Kombination nicht durchgeführt werden.

des Luftzustandes sind mit der Temperatur und der relativen Feuchte bei Zustand 1 und 2 bekannt. Der berechnete, ausgetragene Wassermassenstrom kann nun mit dem während der Versuche aufgenommenen Gewicht verglichen werden. Somit ist eine Validierung der Ergebnisse möglich.

3.3.5 Ergebnisse und Auswertung

Verdunstung

Abbildung 67 zeigt den Verlauf der Trocknung bei Verdunstung ohne erzwungene Durchströmung der Dämmgranulatpackung und einer Wasserbeladung von 10 % (Masse) in dem später zur Trocknung genutzten Strömungskanal. Der Versuchsstandsaufbau unterschied sich zwischen diesem Verdunstungsversuch und den späteren Trocknungsversuchen nicht mehr.

Das Diagramm zeigt, dass die Verdunstung von einer eingebrachten Wasserbeladung von 10 % (Masse) am Versuchsstand Trocknungstechnik ca. 7 Tage dauert. Zu diesem Zeitpunkt sind über 90 % des Wassers verdunstet. Der Verlauf der Verdunstung ist näherungsweise asymptotisch.

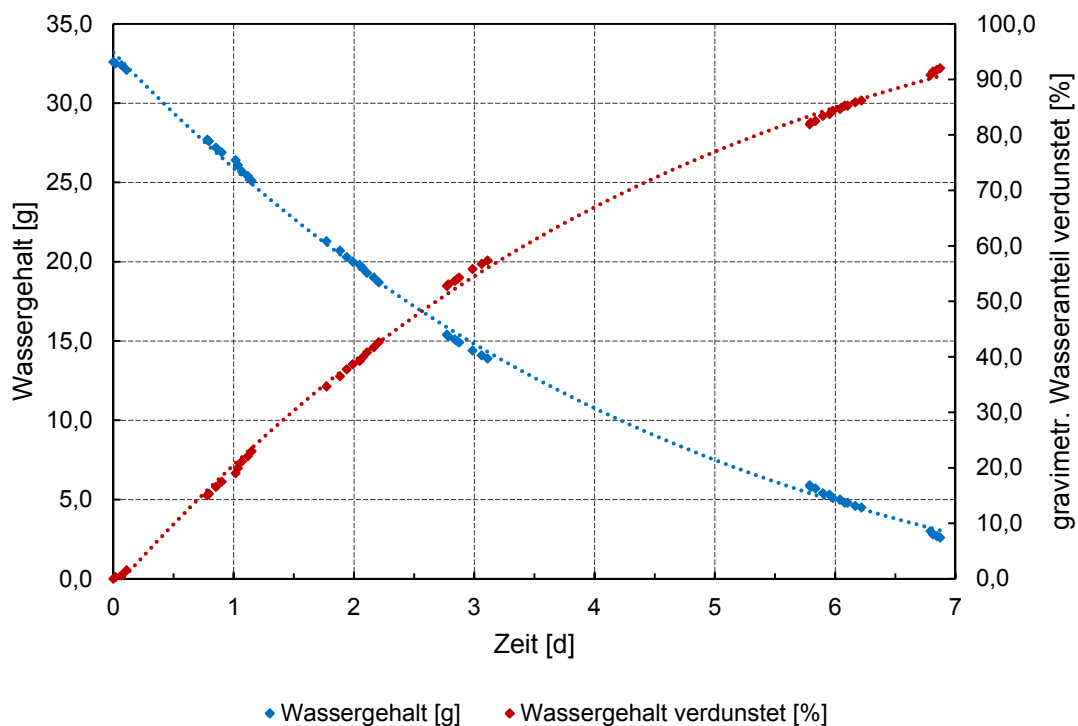


Abbildung 67: Verdunstung einer 10 %-igen (Masse) Wasserbeladung in einer 30 cm-Schüttung im Strömungskanal

Trocknung

Die Verläufe für die Berechnung der Wasserbeladung mittels Waage bzw. Feuchtefühler passen sehr gut zusammen. Die aufgenommenen Messwerte können daher als plausibel gelten. Bei einem Vergleich der unterschiedlichen Strömungsgeschwindigkeiten bei gleicher Wasserbeladung lässt sich feststellen, dass die Trocknung erwartungsgemäß schneller abläuft, je höher die Strömungsgeschwindigkeit ist (Abbildung 69, Abbildung 70). Als Vergleichskriterium soll hier ein Erreichen einer Austragung von 90 % der Wasserbeladung gelten.

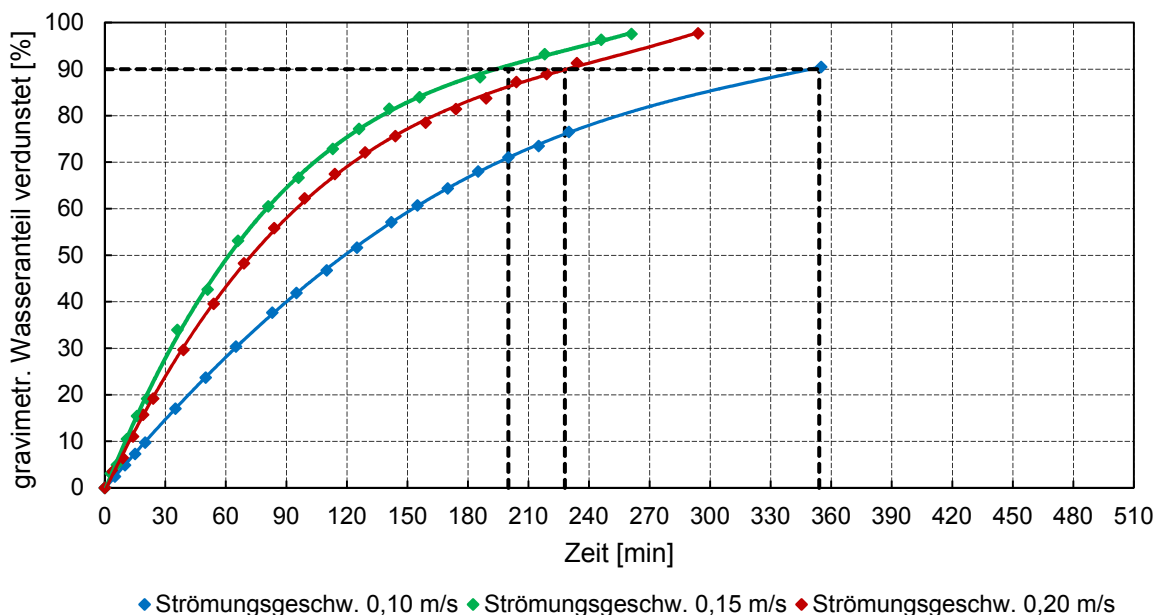


Abbildung 68: Trocknung einer Wasserbeladung von 5 % (Masse) bei 0,10 m/s, 0,15 m/s und 0,20 m/s Strömungsgeschwindigkeit

Abbildung 68 zeigt allerdings, dass bei niedrigen Wasserbeladungen möglicherweise bereits bei 0,15 m/s ein Maximum an auszutragender Wassermasse pro Zeiteinheit erreicht wird (unkonditionierte Umgebungsluft). Eine Trocknung ist hier bei höheren Strömungsgeschwindigkeiten (0,20 m/s) nicht intensiver. Dies könnte an Schwankungen der Eigenschaften der Granulatpackung liegen.

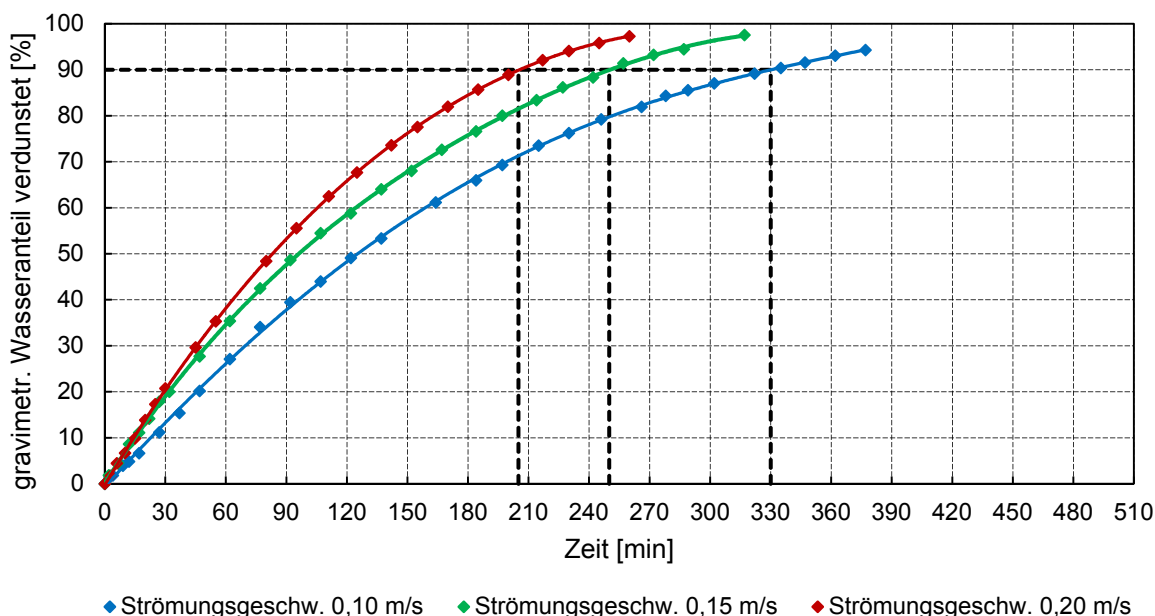


Abbildung 69: Trocknung einer Wasserbeladung von 10 % (Masse) bei 0,10 m/s, 0,15 m/s und 0,20 m/s Strömungsgeschwindigkeit

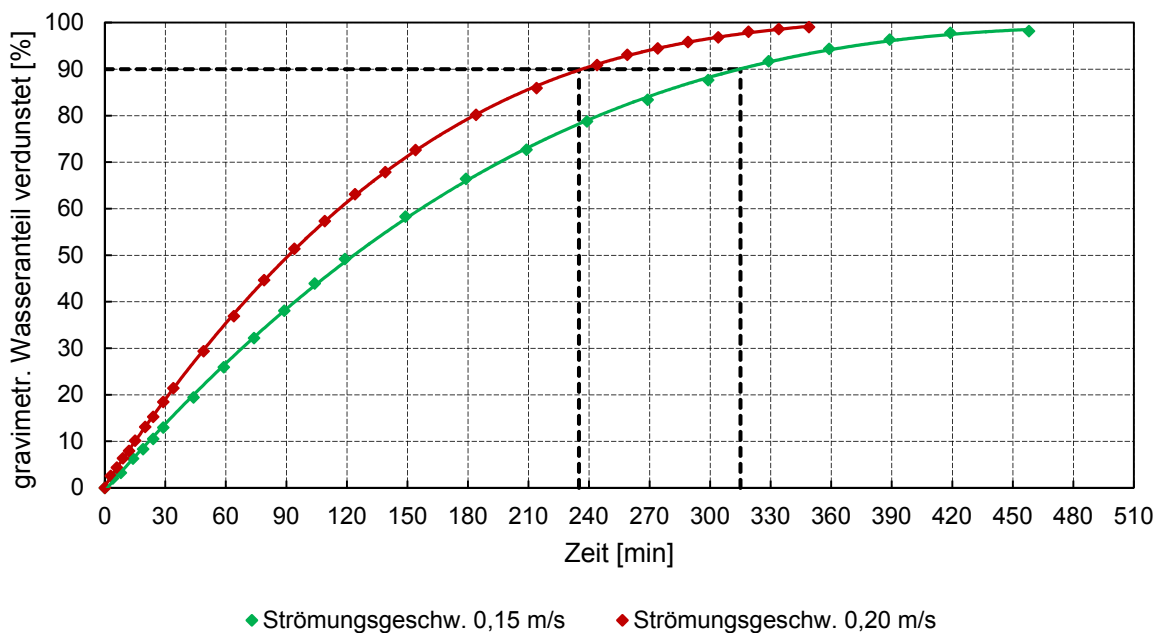


Abbildung 70: Trocknung einer Wasserbeladung von 15 % (Masse) bei 0,15 m/s und 0,20 m/s Strömungsgeschwindigkeit

3.3.6 Fazit

Tabelle 18 fasst die Ergebnisse zur Trocknung zusammen. Es ist bereits mit sehr niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten eine signifikante Beschleunigung des Trocknungsvorganges im Vergleich zur Verdunstung zu erzielen. Bei einer Durchströmung mit 0,10 m/s und einer anfänglichen Wasserbeladung von 10 % (Masse) dauert eine Trocknung im Vergleich zur Verdunstung ohne erzwungene Durchströmung beispielsweise nur ca. 3 % der ursprünglich benötigten Zeit.

Tabelle 18: Ergebnisse der Trocknungsversuche mit Raumluft

Wasserbeladung (Masse) [%]	Strömungsgeschwindigkeit [m/s]	90 % der Wasserbeladung getrocknet nach Δt [min]
5	0,10	355
	0,15	200
	0,20	230
10	0,00 (Verdunstung)	10080
	0,10	330
	0,15	250
	0,20	205
15	0,15	315
	0,20	235

Aufgrund der sehr wirksamen Hydrophobierung des Rathipur erscheint die Notwendigkeit einer speziellen Trocknungstechnik am Demonstrator jedoch nicht gegeben. Die Versuche zur Befeuchtung haben gezeigt, dass sich auch bei extremen Umgebungsbedingungen nahezu keine Feuchtigkeit im Schüttgut ansammelt. Es wurde daher beim weiteren Vorgehen der Schwerpunkt auf die Untersuchung der freien Konvektion im Wandaufbau gelegt.

3.4 Weiterentwicklung der Konstruktionen²⁴

3.4.1 Systematik

Basierend auf dem Ziel eine Speicherkonstruktion für die Speichergrößen von 1000 m³, 3500 m³ und 6000 m³ zu entwickeln, ist das Vorgehen im Projekt wie in Abbildung 71 dargestellt gegliedert.

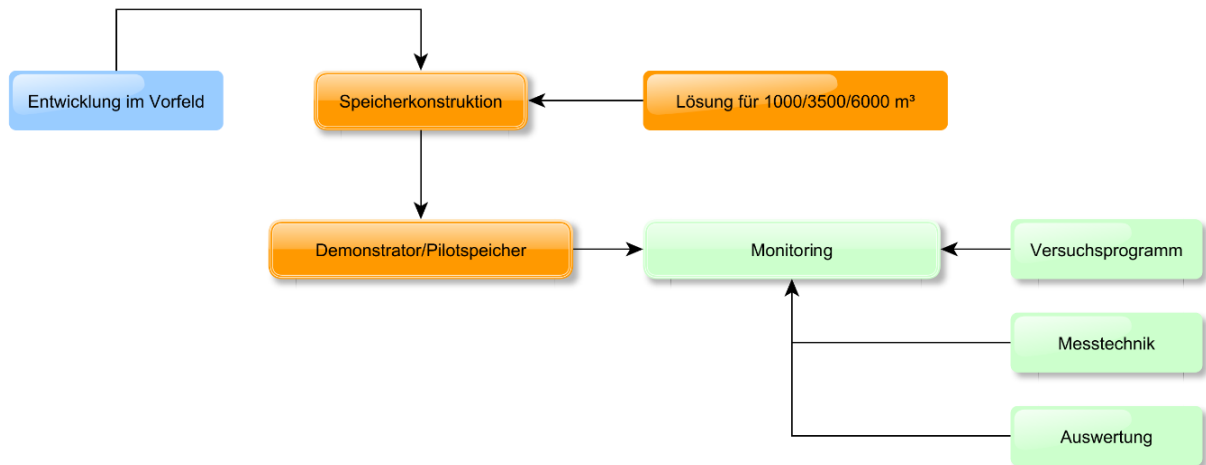


Abbildung 71: schematische Darstellung der Systematik zum Schwerpunkt Speicherkonstruktion

Die entwickelte Speicherkonstruktion wird dementsprechend zunächst in einem Demonstrator umgesetzt und getestet. Es erfolgte die Durchführung eines umfassenden Versuchsprogramms inklusive entsprechendem Monitoring und einer Auswertung der erhaltenen Messdaten. Die folgenden Abschnitte beschreiben die Weiterentwicklung der Konstruktion im Dachbereich und in den Bereichen der Schwimmdecke und des Wand- sowie Bodenaufbaus. Abbildung 72 zeigt zunächst eine schematische Darstellung des OBSERW-Speichers in Abbildung 73 ist der fertiggestellte Demonstrator in Nortorf zu sehen.

²⁴ Autoren des Abschnittes: Thorsten Urbaneck, Fabian Findeisen, Jan Mücke, Robert Beyer

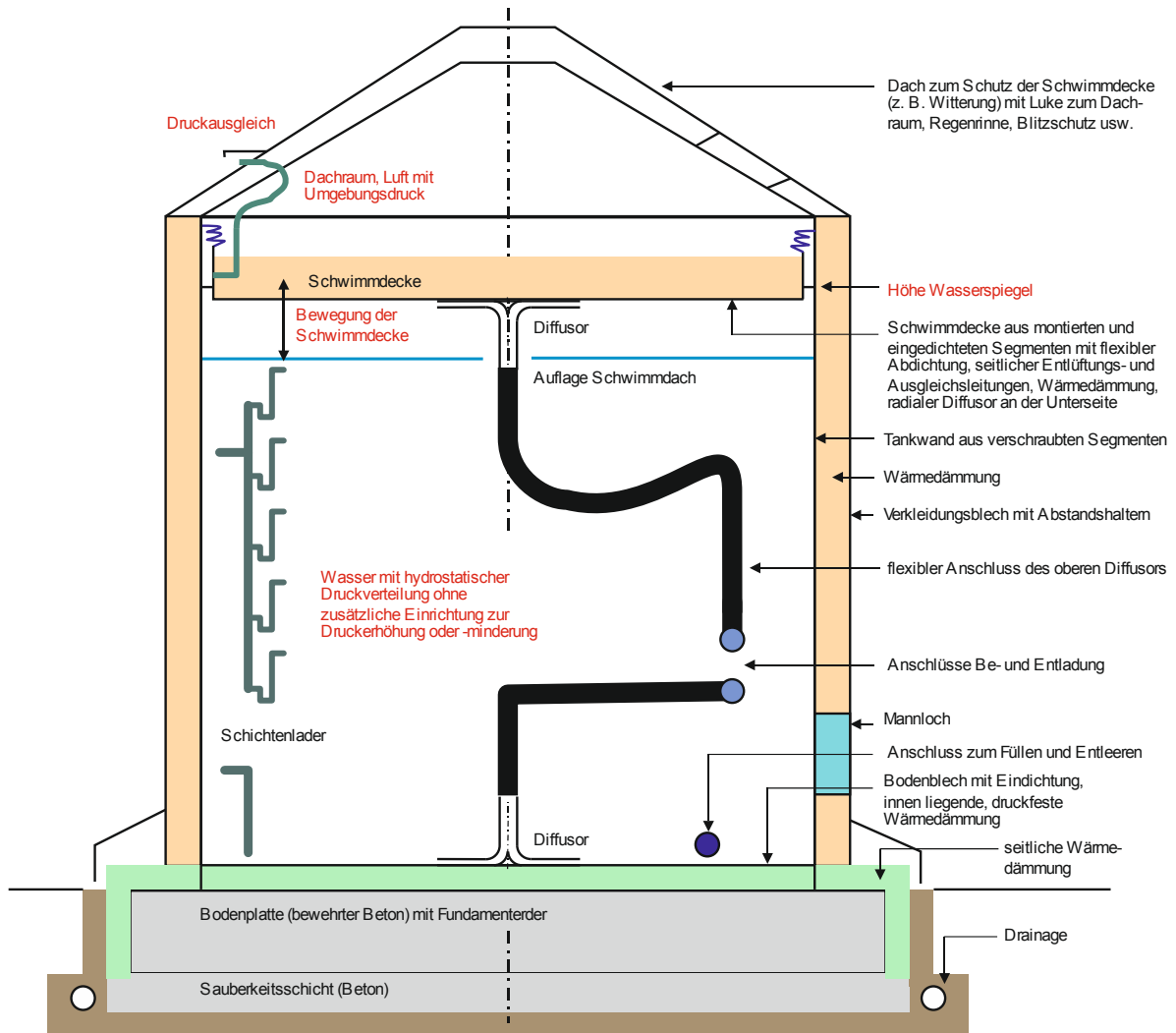


Abbildung 72: schematischer Aufbau des OBSERW-Speichers bzw. des Demonstrators



Abbildung 73: Demonstrator in Nortorf, Juli 2017

3.4.2 Analyse der Konstruktionen im Dachbereich

Aus Abbildung 2 wird deutlich, dass sich vor allem bei den Flachbodentanks die Konstruktionen im oberen Bereich (Dach, Gasraum, zweite Zone usw.) unterscheiden. Eine weitere wichtige Problematik ist die Vermeidung des Gaseintrags insbesondere über den Dachraum, um Korrosion im Speicher und im angeschlossenen Netz zu vermeiden. Bei Flachbodentanks kommen vor allem zwei Verfahren zum Einsatz:

- Die Verwendung von Schutzgasen (z. B. Stickstoff, z. B. a1, a2, a3 in Abbildung 2) hat folgende Nachteile: hohe Wasserdampfaufnahme bei hohen Temperaturen wegen des Partialdrucks, teure Bereitstellung bzw. Verfahren.
- Die Verwendung von Niederdruckdampf (z. B. a2, a3 in Abbildung 2) ist ebenfalls durch eine energie- und kostenintensive Bereitstellung gekennzeichnet. Hinzu kommen hohe Wärmeverluste im Dachraum (z. B. hoher Wärmeübergang durch Kondensation an der Dachinnenwand). Die oben genannte Problematik eines Gas-Dampf-Gemisches besteht hier nicht.

Die Recherchen [28], [32] zeigten, dass keine Wärmespeicher mit Schwimmdeckenkonstruktion in Kombination mit einer Flachbodentank-Konstruktion bisher vorgestellt oder realisiert wurden. Um weitere konstruktive Verbesserungen zu erreichen, war es wichtig, die nachteiligen Eigenschaften von Wärmespeichern im Bereich von Flachbodentanks zu analysieren.

Das Vorhalten einer Wasserschicht über der Oberkante der Be- und Entladeeinrichtung bei Variante a1 oder a2 in Abbildung 2 (Flachbodentanks) zur so genannten Druckauflastung für den Ansaugvorgang (Vermeidung der Kavitation²⁵) und für die Aufnahme des Wasservolumens bei thermischer Ausdehnung des Speichers und Netzinhaltes hat folgende Nachteile:

- relativ hohe Investitionskosten durch den höheren Speicheraufbau,
- Aufheizen des oberen Bereichs und thermische Verluste,
- keine Nutzung des Volumens oberhalb der Diffusoren²⁶.

Bei Variante a2 oder a3 in Abbildung 2 in Kombination mit dem Dampfeinsatz im Dachraum kommt es prozessbedingt zur Aufheizung des Dachraums, was einen zusätzlichen Energie- und Kostenaufwand bedeutet. Wird eine zweite Zone wie bei Variante a3 in Abbildung 2 (Zwei-Zonen-Speicher) vorgesehen, steigen die Investitionskosten signifikant²⁷.

Bei Variante a2 in Abbildung 2 ist nach [76] auch der untere Diffusor mit einem Abstand zum Boden angebracht. In diesem Fall kommt es zu einer Verringerung des nutzbaren Volumens um bis zu 2 % [77]. Aufgrund des Niederdruckdampfes im Dachraum kann der Speicher außerdem nicht vollständig entladen werden. Bei einer kalten Wasseroberfläche bricht die Dampfatmosfera zusammen, was zum Versagen des Schutzmechanismus führt. Das nutzbare Volumen verringert sich nochmals um bis zu 4 % (messtechnischer Nachweis in [78]).

²⁵ Beachte auch unterschiedliche Luftdrücke und die Abhängigkeit von der Höhe über dem Meeresspiegel.

²⁶ Ein Ansaugen von Speicherwasser oberhalb der Diffusoren ist nicht möglich.

²⁷ Das große Volumen wird in [75] mit einer hohen Ausgleichsleitung und einer Auffangeinrichtung mit Befüllanlage umgangen.

Bei Variante a1 und a2 in Abbildung 2 kommt es nach [76] für den oberen Diffusor und bei Variante a2 auch für den unteren Diffusor zu folgender nachteiligen Situation. Weil sich keine horizontale oder leicht geneigte Wand an der Unter- oder Oberkante des Diffusors befindet, bildet sich ein Freistrahл (idealerweise rotationssymmetrisch) mit Mischeffekten an der Ober- und Unterseite des Strahls aus. Die dreidimensionalen Mischeffekte sind größer als bei einem Dichtestrom an einer Decke oder einem Boden. Diese Problematik wird in Abschnitt 4 ausführlich diskutiert.

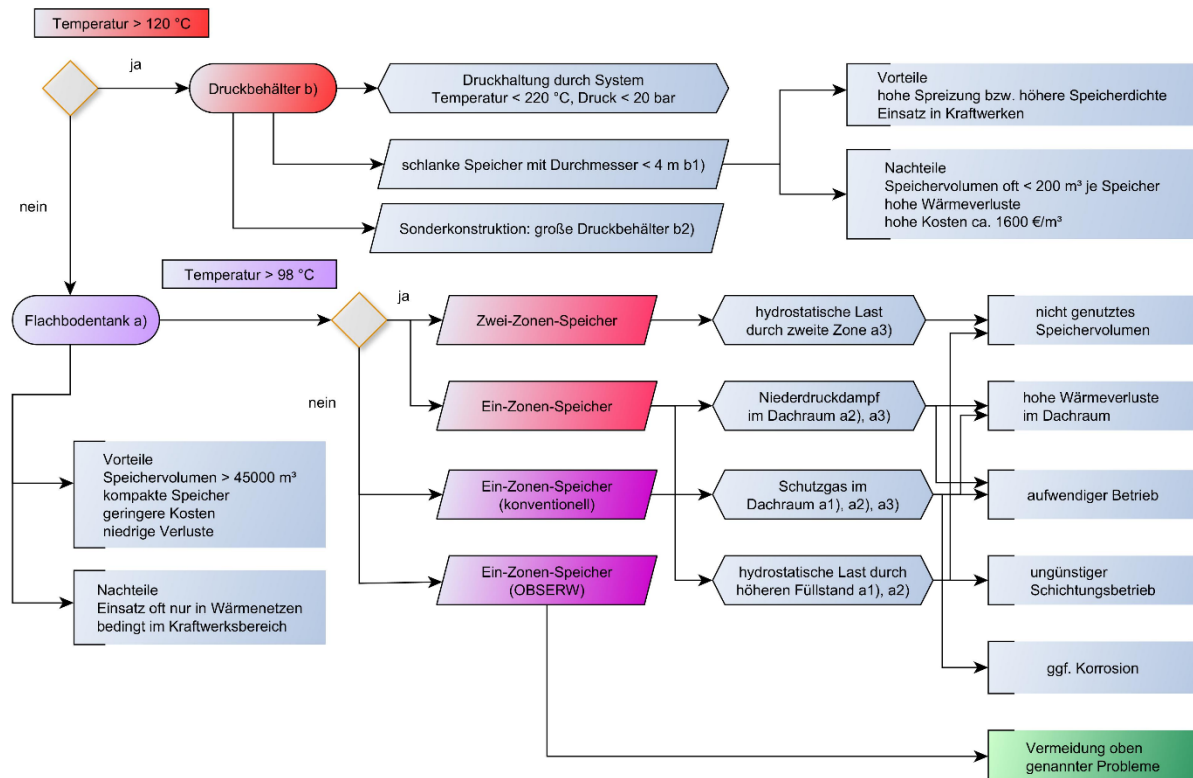


Abbildung 74: Systematisierung und Charakterisierung großer Warm- und Heißwasserspeicher

3.4.3 Neue Konstruktion mit Schwimmdecke

Innerhalb des Verbundprojektes haben die Autoren die Deckenkonstruktion vollständig überarbeitet. Erste Entwürfe zur konstruktiven Ausführung eines Tankspeichers (Ein-Zonen-Speicher) mit innen liegender Schwimmdecke unter Berücksichtigung der oben genannten Punkte zeigen Abbildung 72 und Abbildung 75. Die Neuheit [32] besteht in der Nutzung einer innen liegenden, geschützten Schwimmdecke für Wärmespeicher, wobei der obere Diffusor oder die oberen Diffusoren direkt an der Decke befestigt sind. Ein flexibler Anschluss²⁸ ermöglicht die freie Bewegung der Schwimmdecke zwischen dem unteren und oberen Totpunkt. Deswegen bildet sich bei der Beladung ein Dichtestrom direkt an der Decke aus, was eine wesentliche Voraussetzung für eine gute thermische Schichtung ist²⁹. Bei der Entladung kann das heiße Wasser direkt an der Speicherdecke angesaugt werden und ermöglicht eine vollständige Nutzung der warmen Zone. Hier besteht das Ziel, den Speicher mit einer maximalen Temperatur

²⁸ Die Strömung in runden Leitungsabschnitten erzeugt asymmetrische Strömungsprofile (z. B. hohe Geschwindigkeiten an der Außenseite). Diese beeinträchtigen die Anströmung des Diffusors und wirken sich auf die Strömungsverteilung aus.

²⁹ Störende Einbauten oder Absätze sollten möglichst vermieden werden.

von 98 °C zu betreiben. Dies steht in engem Zusammenhang mit der Vermeidung von Kavitation. Die Autoren sehen hier einen radialen Diffusor oder mehrere Diffusoren mit einer Freiformgestaltung vor (Abschnitt 4).

Einfache, konstruktive Maßnahmen, wie die flexible Abdichtung und die Druckausgleichsleitung, sichern den Volumenausgleich des Speicherwassers sowie den Druckausgleich im Speicher und Dachraum ab. Damit kann der Speicher in Verbindung mit einer Druckerhöhungs- bzw. Druckminderungsanlage (vgl. mit Abschnitt 6) Servicedienste wie die Druckhaltung mit einer Wasservorlage im Wärmeversorgungssystem übernehmen.

Die Druckausgleichsleitung dient auch zur selbstständigen Entlüftung (z. B. bei der Inbetriebnahme). Diese Leitung sichert den Speicher gegen Über- und Unterdruck ab. Das kann z. B. auch bei der Außerbetriebnahme vorkommen, wenn der Füllstand sinkt und die Schwimmdecke auf dem Träger aufliegt (unterer Totpunkt).

Die Schwimmdecke und die flexible Abdichtung vermeiden einen Gaseintrag in das Speicherwasser und damit Korrosion im System. Deswegen sollte der Querschnitt der Leitungen für den Druckausgleich, so gering wie möglich gehalten werden. Im Randbereich befinden sich weiterhin flexible Lippen (ggf. mit einzelnen Kanälen zum Druckausgleich). Diese sollen die freie Konvektion im Spaltbereich zwischen Schwimmdecke und Speicherwand unterdrücken. Damit sinken die Wärmeverluste und die flexible Abdichtung wird thermisch nicht so stark beansprucht. Für die Konstruktion der Schwimmdecke sind zurzeit verschraubte und eingedichtete Segmente vorgesehen. Hier lässt sich leicht ein schüttfähiger Wärmedämmstoff (Abschnitt 2, Abschnitt 3.2) einfüllen. Die Verwendung von Plattenmaterial ist auch denkbar. Gegenüber anderen Konstruktionen liegt die Wärmedämmung direkt auf der heißen Zone, was topologisch die beste Lösung ist. Das Speicherdach schützt die Wärmedämmung vor Witterungseinflüssen. Bei einer eventuellen Befeuchtung (z. B. Unterschreitung des Taupunkts im Winter) ist eine selbstständige Trocknung möglich, weil der Dachraum mit einer Hinterlüftung errichtet werden kann.

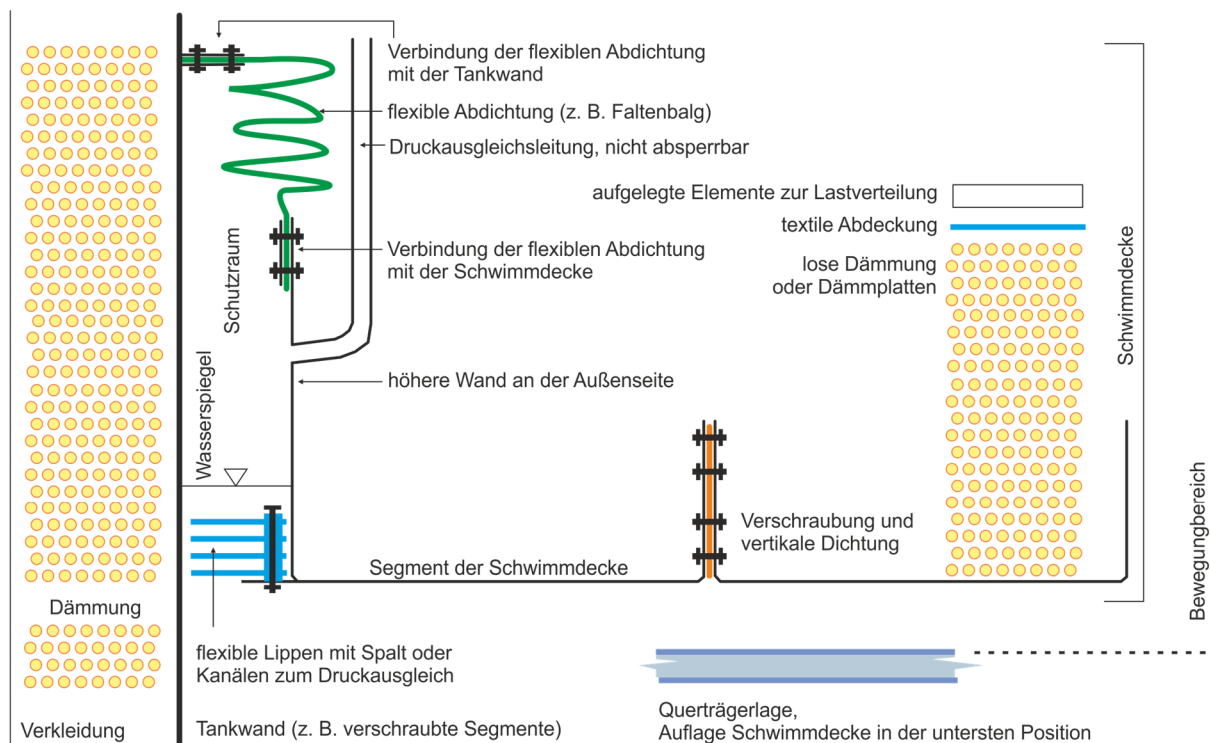


Abbildung 75: typische konstruktive Ausführung der Schwimmdecke und der Verbindung am Rand

3.4.4 Wand

Die Tankwand muss die Dicht- und Tragwerksfunktion erfüllen und wird aus verschraubten Segmenten hergestellt. Die Stahlsegmente sind typischerweise beschichtet, um den Korrosionsschutz bzw. eine ausreichende Wasserqualität zu gewährleisten. In den ersten Laboruntersuchungen wurden die Dichtstoffe hinsichtlich der thermisch-mechanischen Belastbarkeit getestet (siehe Abschnitt 2). Die Untersuchungen standen in engem Zusammenhang mit den Oberflächeneigenschaften der Segmentbeschichtungen. Das beste Ergebnis lieferte der Dichtstoff Sikasil AS-70 der Fa. Sika (kondensationsvernetzendes Silikon). Sämtliche im Labor getesteten Beschichtungen der Wandsegmente wurden auch bei dem Demonstrator eingesetzt. Zusätzlich erfolgte der Einbau von Segmenten der Firma JOTUN® mit der Produktbezeichnung Epoxy-HR. Eine Liste der verwendeten Segmentbeschichtungen sowie deren Beständigkeit ist Abschnitt 8.3 zu entnehmen.

Parallel zu den Stoffuntersuchungen bzgl. der Wandsegmentbeschichtungen und Dichtstoffe fanden umfangreiche Sondierungen zu Wärmedämmstoffen statt (siehe Abschnitt 2). Aus technischen, wirtschaftlichen und ökologischen Gründen wählten die Autoren ein schüttfähiges Recycling-Material für den Decken- und Wandaufbau aus. Das Material Rathipur der Fa. Rathi besteht aus Polyurethan-Partikeln (Abschnitte 2 und 3.1 bis 3.3) und besitzt relativ niedrige Materialkosten. Die Schrauben auf der Segmentaußenseite sowie die Abstandshalter und weitere Bauelemente erschweren eine Montage von Wärmedämmplatten. Eine Anpassung an die Oberfläche wäre sehr aufwendig. Mit dem Schüttgut können Zwischenräume, wie sie zwischen dem Verkleidungsblech und der geschraubten Wand auftreten, einfach gefüllt werden (s. a. Abschnitt 7.1). Das heißt, durch die Einfülltechnik lassen sich auch die Montagekosten reduzieren.

3.4.5 Boden

Den Aufbau des Speicherbodens zeigt Abbildung 76. Die Speicherwand steht direkt auf dem Fundament. Diese ist dort mit Schrauben befestigt. Die Wärmedämmung der Wand wird bis nach unten geführt. Die Wärmedämmung des Bodens realisiert eine innen liegende Dämmschicht.

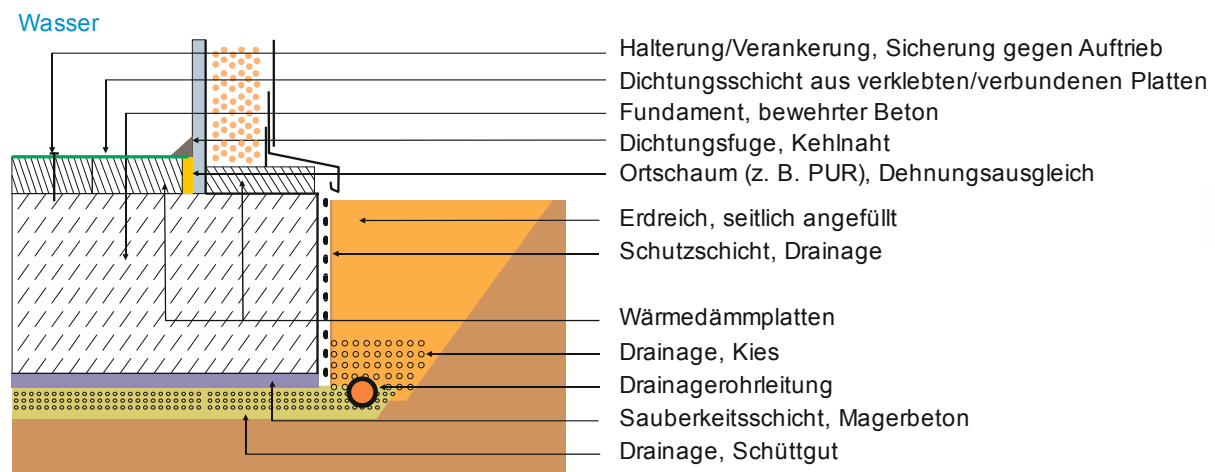


Abbildung 76: Konstruktion des Speicherbodens

Diese Anordnung ist nahezu frei von Wärmebrücken und die Dämmschichten liegen sehr nah an der Speicherzone. Es kommt deswegen zu keinen Aufheizverlusten usw. Der Lastabtrag der Speicherwand findet direkt in das Fundament statt. Die druck- und temperaturbeständige

Wärmedämmung innerhalb der Speicherwand wird nicht wie bei anderen Speicherkonstruktionen dreidimensional durch die Speicherwand belastet. Die einzige mechanische Belastung, welche diese innen liegende Wärmedämmung aufnehmen muss, ist die statische Last der Wassersäule. Ein Edelstahlblech schützt die innen liegende Dämmung gegen den Eintritt von Speicherwasser. Diese ist mit der gleichen Dichttechnik wie die Wandsegmente eingebaut. Der gesamte Wandaufbau dehnt sich weiterhin bei Temperaturerhöhung aus und zieht sich bei einer Temperaturabsenkung wieder zusammen. Deswegen gilt dieser Bereich als besonders anspruchsvoll.

4 Be- und Entladung mit Radialdiffusoren³⁰

Radialdiffusoren bauen die Geschwindigkeit des in den Speicher einströmenden Warmwassers in radialer Richtung ab und leiten es horizontal in den Speicher ein. In umgekehrter Strömungsrichtung entnehmen sie Fluid aus dem Speicher. Sie dienen daher für Anwendungen mit konstanter Beladetemperatur als Be- und Entladeeinrichtung³¹ und können dort hohe Volumenströme bereitstellen. Vorzugsweise finden radiale Diffusoren Anwendung in der Kurzzeit-Speicherung von Wärmeenergie, bspw. in Wärmespeichern in Verbindung mit Kraft-Wärme-Kopplung oder in der Nutzung von industrieller Abwärme. Aber auch der Betrieb in Solarthermieanlagen nach dem matched-flow-Prinzip stellt ein Anwendungsfeld dar.

4.1 Numerische Untersuchungen mittels CFD

Für die Simulation der Strömungsvorgänge bei der Be- und Entladung von Warmwasserspeichern mit Radialdiffusoren fanden CFD-Berechnungen (Computational Fluid Dynamics) an 2D- und 3D-Modellen mit der Software ANSYS CFX statt. Die Modellerstellung erfordert die Beachtung einiger Grundsätze. 2D-Rechnungen erfolgen in ANSYS CFX mit einem Quasi-2D-Modell, welches eine Gitterebene in Umfangsrichtung besitzt. Hier muss das rotationssymmetrische repräsentative Elementarvolumen unbedingt achsensymmetrisch sein. Für die Turbulenzmodellierung ist vor allem das $k-\omega$ -SST Modell in Großspeichern geeignet, da es auch das laminare Strömungsregime korrekt abbildet. Eine Anpassung der Turbulenzproduktions- und -dissipationsterme für dichtegetriebene Strömungen ist weiterhin notwendig.

4.1.1 Geometriestudien mit einem 2D-Simulationsmodell

Abbildung 77 zeigt ein vereinfachtes 3D-Speichermodell und das daraus abgeleitete repräsentative Elementarvolumen für die Quasi-2D-Simulation. Die Randbedingungen am Einlass sowie der Anfangszustand im Speicher werden durch die Betriebsbedingungen in Tabelle 19 bestimmt (Annahme: konstanter Volumenstrom und konstante Beladetemperatur).

Tabelle 19: Betriebsparameter im Auslegungspunkt und charakteristische Maße des Demonstratormodells

\dot{V}_{ein} [m ³ /h]	19,44	T_{ein} [°C]	70	h_{D} [mm]	40	d_{Sp} [m]	5,12
V_{Sp} [m ³]	116,76	T_{Sp} [°C]	40	d_{AL} [mm]	68,8	d_{D} [m]	0,96

³⁰ Autoren des Abschnittes: Fabian Findeisen, Thorsten Urbaneck. Eine ausführliche Darstellung der Untersuchungsergebnisse und ein Vergleich der angewandten Methoden findet sich in [29]. Teilergebnisse wurden außerdem in [20], [21], [22], [23], [24], [25], [26] und [27] veröffentlicht bzw. zur Veröffentlichung eingereicht.

³¹ Im Folgenden wird der Begriff Belader vereinfachend für die Be- und Entladeeinrichtung verwendet. Ein Belader kann demzufolge auch Wasser ansaugen und den Speicher so entladen.

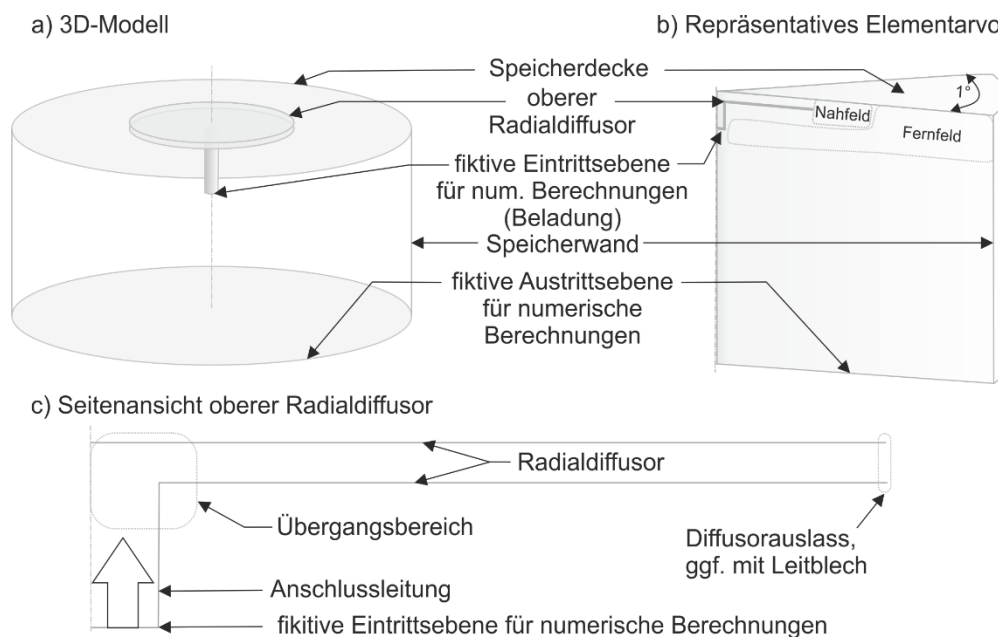


Abbildung 77: Schematische Darstellung des Simulationsmodells

Positionierung des Beladers im Speicher

Radiale Diffusoren in Warmwasserspeichern sind in der Regel schwimmend oder fest und ohne bewegliche Teile im Speicher montiert. Der Diffusor befindet sich dabei unterhalb der Wasseroberfläche. Zur Untersuchung des Einflusses des Abstandes zur Wasseroberfläche bzw. zur Speicherdecke, insbesondere im Vergleich zur Montage des Beladers direkt an der Decke, wurde ein vereinfachtes Simulationsmodell verwendet, welches eine freie Wasseroberfläche nicht berücksichtigt. Dieses Modell geht von einem konstanten Geschwindigkeitsprofil am Einlass des Speichers aus (entspricht dem Diffusorauslass). Daher wird der Radialdiffusor hier noch nicht simuliert.

Abbildung 78 zeigt die berechneten Temperaturfelder für drei verschiedene Fälle. Mit zunehmendem Abstand zur Decke wächst die Übergangsschicht (türkiser bis oranger Bereich) und die Durchschnittstemperatur in der warmen Zone sinkt, während sich ein ungünstiger, nicht-isothermer, Freistrahlfeld infolge von Konvektion entwickelt. Dieser Freistrahlfeld bewirkt eine starke Vermischung von warmen Beladefluid und kaltem Speicherfluid, wodurch die Schichtungsqualität deutlich abnimmt.

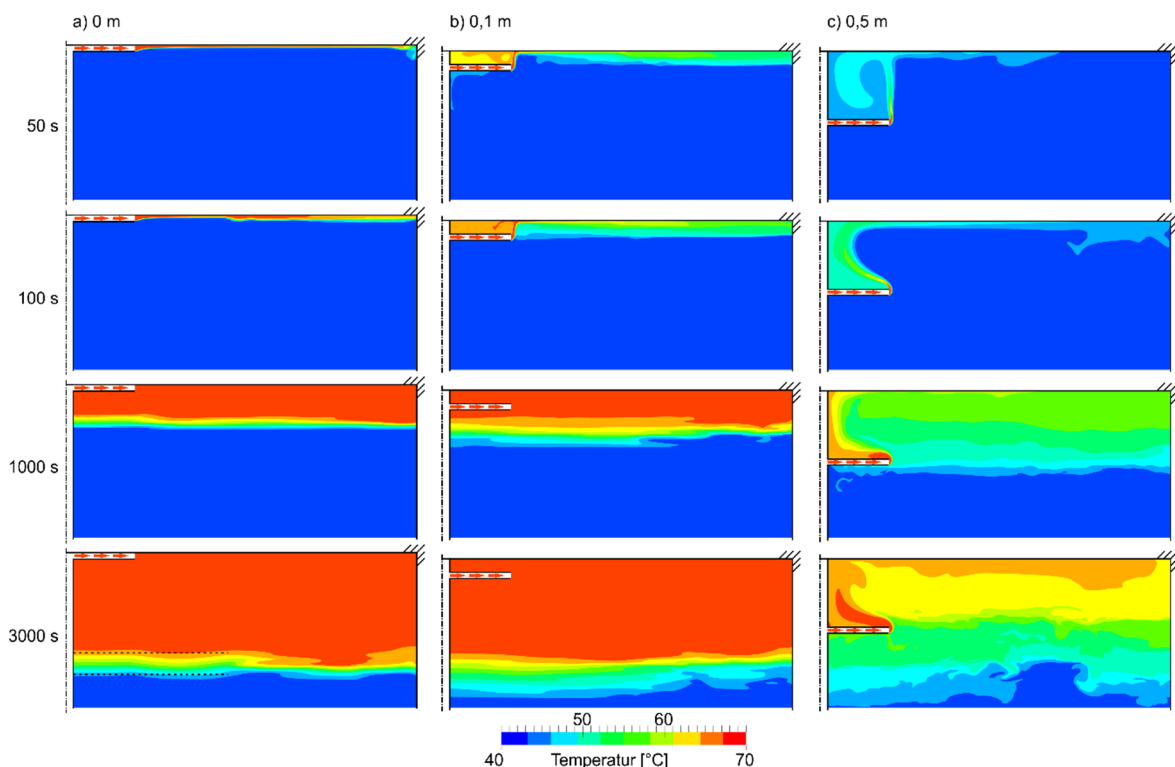


Abbildung 78: Vergleich der Temperaturfelder im Querschnitt des rotationssymmetrischen 2D-Speichermodells mit fortschreitender Beladedauer für verschiedene Deckenabstände (a, b, c)

Zur Bestimmung der Qualität der Schichtung werden die volumengemittelte Temperatur in der warmen Zone sowie die mittlere Höhe der Übergangsschicht herangezogen. Die Höhe entspricht einer volumengemittelten Höhe über den gesamten Radius des Simulationsmodells nach dem 90/10 %-Prinzip³² [64]. Tabelle 20 vergleicht die Ergebnisse. Die Übergangsschicht verdoppelt ihre Höhe gegenüber der Montage an der Speicherdecke, wenn der Abstand zwischen Auslass und Decke 10 cm beträgt und verzehnfacht sich bei einem Abstand von 50 cm. Gleichzeitig sinkt die Durchschnittstemperatur in der warmen Zone. Die Qualität der Schichtung hängt demzufolge stark von der Position der Beladeeinrichtung im Speicher ab. Da warmes Fluid nicht von oberhalb des Radialdiffusors entnommen werden kann, sind das entsprechende Speichervolumen sowie die dort gespeicherte Wärme nicht nutzbar. Außerdem kann eine thermische Inversion, sobald das Warmwasser abgekühlt ist, die Schichtung im Speicher dauerhaft zerstören. Das Beladen direkt an der Speicherdecke (Abschnitt 3.4.3) eliminiert diese Nachteile vollständig und verspricht daher erhebliche Verbesserungen, auch weil die Schwimmdecke sehr gut gedämmt ist.

Tabelle 20: Ergebnisse der Bewertungskriterien, $t = 3000 \text{ s}$

Abstand zwischen Belader und Speicherdecke [m]	0,0	0,1	0,5
mittlere Höhe der Übergangsschicht (90/10%-Methode) [m]	0,09	0,18	0,99
mittlere Temperatur in der warmen Zone [°C]	69,99	69,64	67,42

³² Nach dem 90/10 %-Prinzip werden eine obere und eine untere Grenztemperatur zur Bestimmung der Ausdehnung der thermischen Übergangsschicht ermittelt.

Einfluss der Diffusorgeometrie auf die Be- und Entladung

Bei einem minimalen Abstand zwischen dem Radialdiffusor und der Schwimmdecke wird bei der Entladung direkt an der Decke warmes Wasser angesaugt, was die volle Nutzung der warmen Zone ermöglicht. Die Montage der Beladeeinrichtung an der Decke geht jedoch einher mit dem Wegfall einer hydrostatischen Druckentlastung über der Beladeeinrichtung. Da der Speicher mit einer maximalen Temperatur von bis zu 98 °C betrieben werden soll, besteht die Gefahr einer Unterschreitung der Dampfdruckgrenze. Die Pumpe befindet sich im Zulaufbetrieb, der Radialdiffusor saugt an und entlädt so den Speicher. Dabei kann die Strömung durch lokale Dampfbildungen (z. B. Kavitation) oder andere instationäre Effekte gestört werden, die zu Betriebsstörungen oder sogar zum Ausfall der gesamten Anlage führen können. Um die Betriebssicherheit bei der Entladung zu gewährleisten, ist es daher notwendig, die Diffusorgeometrie zu optimieren, um die lokale Druckabsenkung zu minimieren. Ein Risiko für das Beladeverhalten besteht in der Regel nicht. Stattdessen wird für diesen Einsatzfall der Einfluss unterschiedlicher Diffusorgeometrien auf die Qualität der thermischen Schichtung untersucht.

Die verschiedenen Geometrien von Belade- und Entladesystemen (BES) sind in Abbildung 79 dargestellt. Ausgehend von einem Referenzfall mit einer scharfen Kante zwischen Anschlussleitung und Radialdiffusor sowie geraden Diffusorwänden (BES_0) wird der Übergangsbereich zwischen Anschlussleitung und Diffusor verändert. BES_1 weist bspw. einen runden Übergang mit konstantem Radius auf und BES_2 bis BES_4 besitzen einen Freiform-Übergangsbereich. Weiterhin werden verschiedene Diffusorwände (BES_2a/b) sowie Einbauteile (BES_5) und Leitbleche am Auslass untersucht. Neben dem Demonstrator sind auch drei repräsentative Speichergrößen Teil der Untersuchung (Tabelle 21).

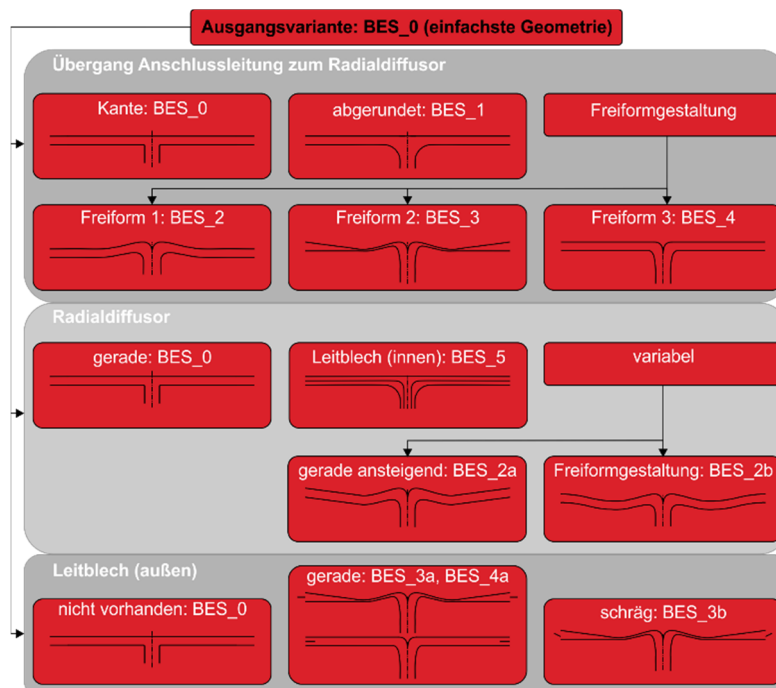


Abbildung 79: Varianten der Beladeroptimierung

Tabelle 21: Übersicht der untersuchten Speichergrößen

Name	V_{Sp} [m ³]	d_{Sp} [m]	d_D [m]	h_D [mm]	d_{AL} [mm]	\dot{V}_{ein} [m ³ /h]	Fr_D [-]	Re_D [-]
Demonstrator (D)	116	5,12	0,96	40	68,8	20	0,57	4209
Speicher 1 (Sp1)	1000	10,84	2,00	80	200,0	167	0,86	17658
Speicher 2 (Sp2)	3500	16,46	3,60	120	371,0	583	0,91	34334
Speicher 3 (Sp3)	6000	19,69	5,00	120	486,0	1000	1,12	42378

Ziel der Untersuchung ist es, die Führung der Strömung innerhalb des Beladers zu verbessern, da der statische Druck im Belader nicht unter die Dampfdruckgrenze fallen darf. Daher ist es wichtig, die lokale Druckabsenkung zu minimieren. Neben unterschiedlichen Speichergrößen werden bei der Untersuchung auch unterschiedliche Atmosphärendrücke (abhängig von der Höhe über Normalhöhennull, ü. NHN) berücksichtigt.

Der minimale Absolutdruck im Radialdiffusor für drei verschiedene Atmosphärendrücke sowie die Dampfdruckgrenze für 95 °C bzw. 98 °C ist in Abbildung 80 für ausgewählte Geometrien dargestellt. Für den Freiformbelader BES_4 findet sich im Diagramm die weiterentwickelte Freiformvariante BES_4opt [29]. Hier fand basierend auf einer Variation des Krümmungsradius bereits eine Anpassung der Geometrie statt.

In der Darstellung ist zu erkennen, dass es stark vom Atmosphärendruck abhängt, ob der lokale Druck im Belader unter den Dampfdruck von 98 °C fällt. Während bei 0 m ü. NHN nur ein Risiko für den Referenzdiffusor mit scharfer Kante (BES_0) besteht, unterschreitet bei 500 m ü. NHN fast jeder simulierte Belader, mit Ausnahme der optimierten Freiformvariante BES_4opt, die Dampfdruckgrenze. Bei einem atmosphärischen Druckniveau von 1000 m ü. NHN ist der statische Druck in BES_1 bzw. BES_4opt derart niedrig, dass er nur dann noch über dem Dampfdruck liegt, wenn die Entladetemperatur 95 °C nicht übersteigt.

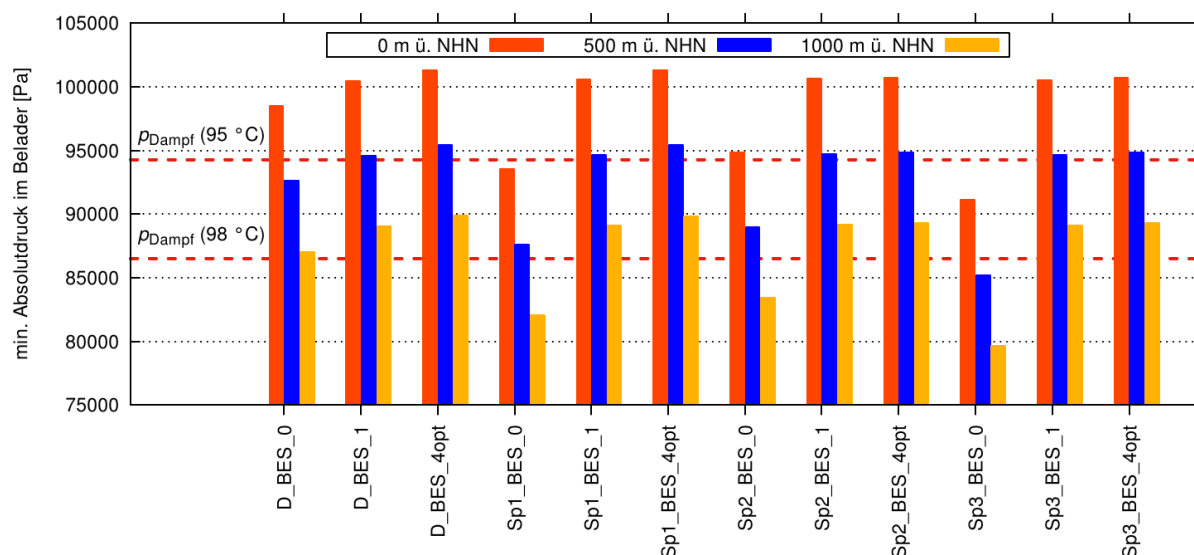


Abbildung 80: Minimaler Druck in den Beladern bei Entladung mit unterschiedlichen Atmosphärendrücken für unterschiedliche Speichergrößen (Tabelle 21)

Abbildung 81a zeigt das Druckfeld für den Referenzfall BES_0. Der Druck fällt hier lokal um ca. 10 kPa ab. Durch die Geometrieoptimierung reduziert der Freiformdiffusor BES_4opt (Abbildung 81b) diesen Wert auf 1,2 kPa. Er entspricht dabei ausschließlich dem dynamischen Druckanteil infolge der Beschleunigung der Flüssigkeit in der Anschlussleitung. Durch den Einsatz eines Freiformdiffusors kann die lokale Druckabsenkung im Inneren der Beladeeinrichtung demnach vollständig eliminiert werden.

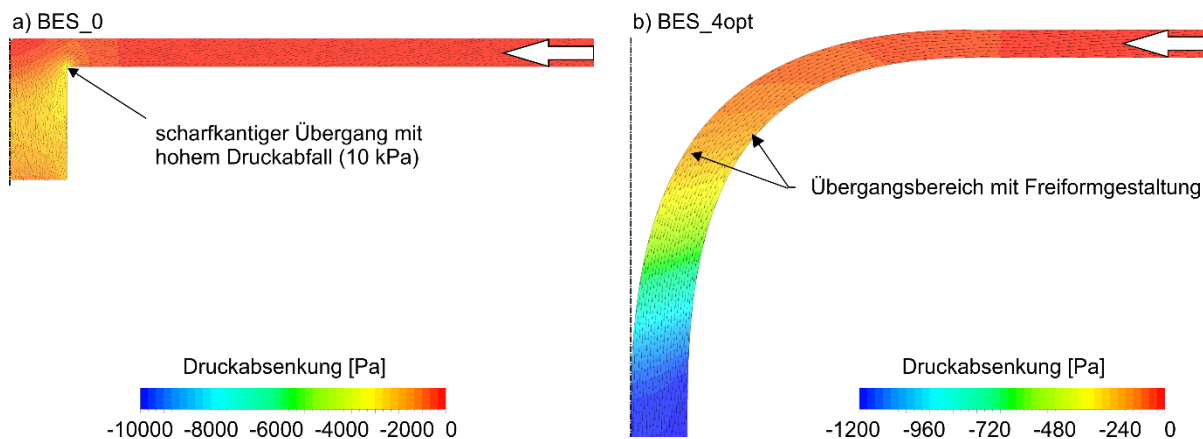


Abbildung 81: Druckabsenkung in BES_0 und BES_4opt während des Entladens mit 98 °C warmen Wasser

Die Diffusorgeometrien wurden neben des Entladeverhaltens auch hinsichtlich ihres Beladeverhaltens untersucht. Abbildung 82 zeigt hierzu die zeitliche Entwicklung der gemittelten Höhe der Übergangsschicht am Beispiel des Demonstrators. Es gilt zu beachten, dass das Auswertekriterium erst nach einer vollständigen Ausbildung der Übergangsschicht anwendbar ist. Hier trifft dies nach den ersten 500 s zu. In der weiteren Entwicklung sind keine signifikanten Unterschiede zwischen den untersuchten Beladervarianten zu beobachten. Gleiches gilt für die anderen untersuchten Speichergrößen. Auch hier gibt es keinen bemerkenswerten Unterschied zwischen den einzelnen Geometrien. Da die Schichtungsqualität durch die direkte Montage des Beladers an der Speicherdecke bereits sehr hoch ist, sind demnach keine weiteren Verbesserungen zu beobachten. Wie Testsimulationen mit unterschiedlichen Diffusor-spalthöhen zeigen, gilt dies jedoch nur, solange keine negativen Geschwindigkeiten und damit verbundene Ansaugeffekte am Diffusorauslass auftreten. Die korrekte Dimensionierung des Diffusors ist daher nach wie vor von großer Bedeutung.

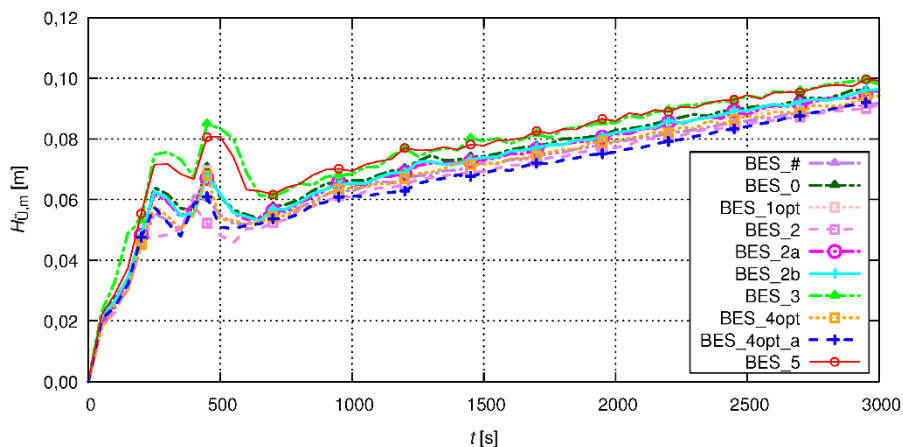


Abbildung 82: Zeitlicher Verlauf der mittleren Höhe der Übergangsschicht für verschiedene Beladertypen am Beispiel des Demonstrators

Um die zugrundeliegenden Mechanismen beim Aufbau der thermischen Schichtung besser zu verstehen und die Effekte zu veranschaulichen, fand eine sog. Large Eddy Simulation (LES) statt. Diese hat den Vorteil, größere turbulente Wirbelstrukturen direkt numerisch zu simulieren und damit nicht auf die vereinfachende RANS-Turbulenzmodellierung zurückgreifen zu müssen. Das verwendete LES-Turbulenzmodell heißt WALE (Wall-Adapting Local Eddy-Viscosity). Abbildung 83a zeigt eine sich entlang der Speicherdecke ausbildende Dichteströmung mit ihren charakteristischen Eigenschaften. Das Ergebnis dieser Detailstudie weist darauf hin, dass im Wesentlichen zwei Mischungsbereiche die Höhe der thermischen Übergangsschicht bestimmen. Der erste Mischungsbereich erstreckt sich über der Höhe des Radialdiffusors (Abbildung 83c) und der zweite Bereich liegt unterhalb des Radialdiffusors vor (Abbildung 83d). Bemerkenswert ist, dass zumindest bei Flachbodentanks mit relativ großen Durchmessern die Kollision der Dichteströmung mit der Behälterseitenwand die Durchmischung im Speicher nicht wesentlich beeinflusst.

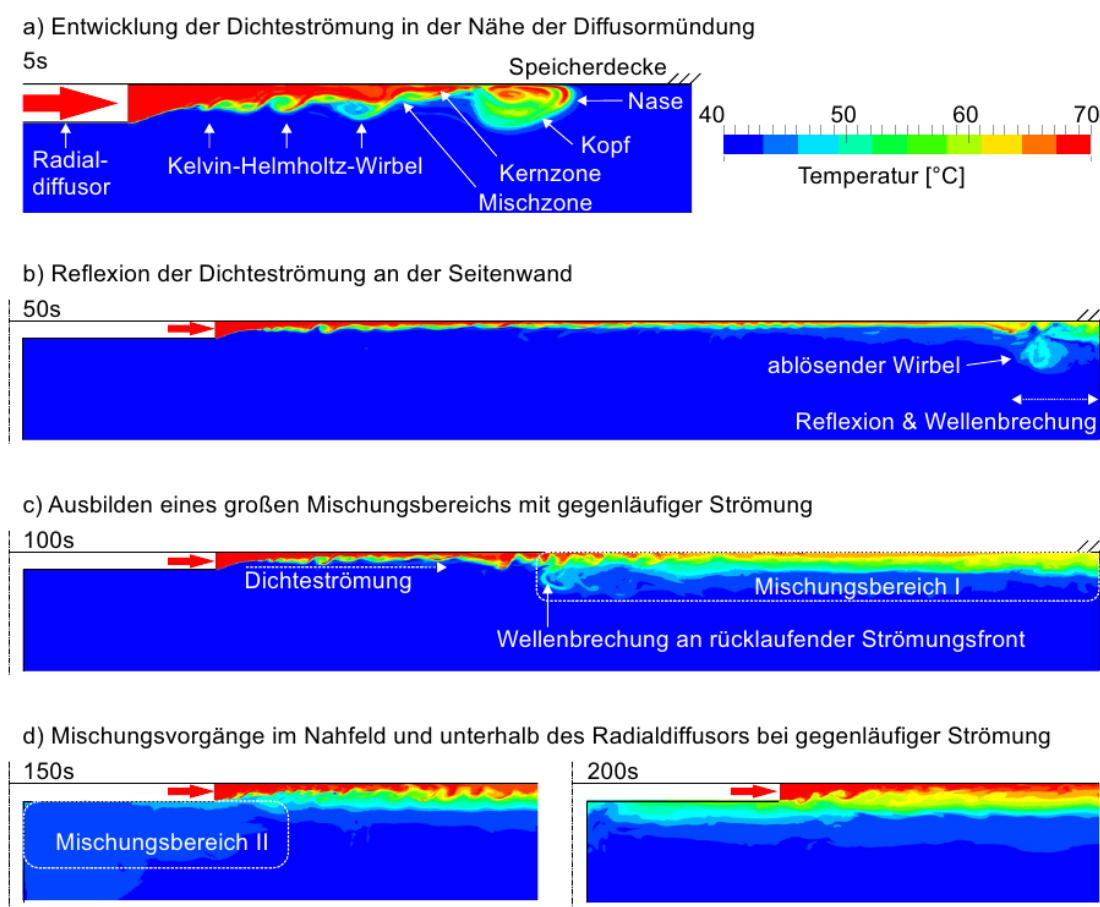


Abbildung 83: Temperaturfelder im Speicherquerschnitt zur Darstellung des Schichtungsbaus (Rechnung mit LES)

Eine Gesamtübersicht zur Schichtungsqualität im Auslegungspunkt für alle Speicher liefert Abbildung 84. Die Darstellung veranschaulicht den Zusammenhang zwischen der Schichtungsqualität und der zur Beladerauslegung herangezogenen Froude-Zahl

$$Fr_D = \frac{\dot{V}_D}{h_D \cdot \sqrt{g \cdot h_D^3 \frac{\rho_{Sp} - \rho_{ein}}{\rho_{ein}}}} \quad (13)$$

sowie zum Speichervolumen und zur Spalthöhe des Diffusors h_D . Im Demonstrator liegt aufgrund der hohen Dichtedifferenz und des moderaten Beladevolumenstroms mit $Fr = 0,57$ eine eher konservative Auslegung vor. Im Speicher 3 ist die Froude-Zahl mit 1,06 deutlich höher,

aber noch in der Nähe der üblichen Empfehlung von $Fr \leq 1$. Die Übergangsschicht nimmt mit doppelter Froude-Zahl ungefähr um das Dreifache zu. Da in den dargestellten Beispielen derselbe Dichteunterschied existiert, ist die Schichthöhe in diesem Vergleich vom Impuls des Beladevolumenstroms abhängig. Zwischen der Höhe der Übergangsschicht und dem Speichervolumen lässt sich der Zusammenhang ablesen, dass in größeren Speichern mehr Vermischung stattfindet³³. Dies ist auf die zunehmende Mischungsfläche an der Strahlunterseite zurückzuführen.

Die Spalthöhe wirkt sich mit ähnlicher Tendenz wie die Froude-Zahl auf die Schichtungsqualität aus. Dieser Zusammenhang liegt nahe, denn wie zuvor festgestellt, ist bei gleichem Dichteunterschied der Impuls des Beladevolumenstroms ausschlaggebend. Da in den Speichern eine ähnliche Ausströmgeschwindigkeit vorliegt³⁴ bestimmt die Spalthöhe nun den Strömungsimpuls. Die LES-Simulation verdeutlicht diesen Zusammenhang qualitativ (Abbildung 83): Der Mischungsbereich I ist näherungsweise so hoch wie der Spalt am Diffusorauslass. Kurz nach Ende des Schichtungsaufbaus (bspw. bei $t = 1000$ s in Abbildung 82) besitzt die Übergangsschicht ungefähr die doppelte Höhe. Die zusätzliche Vermischung entsteht im Mischungsbereich II. Auch die Unterschiede zwischen den Varianten von Speicher 1 und 2 sowie bei den Varianten von Speicher 3 werden durch den Mischungsbereich II bestimmt.

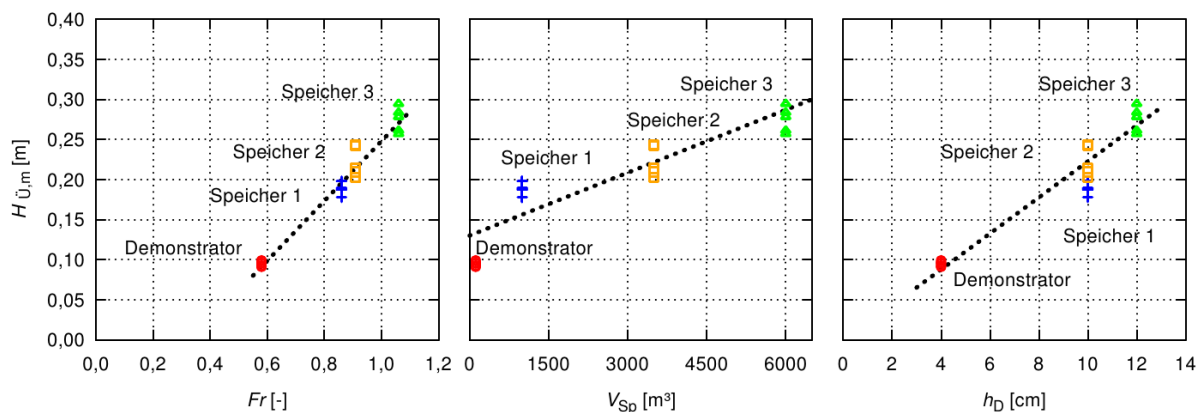


Abbildung 84: Abhängigkeit der mittleren Höhe der Übergangsschicht für die untersuchten Beladervarianten (Ergebnisse nach 3000 s Beladedauer) von der Froude-Zahl, vom Speichervolumen und von der Spalthöhe des Diffusorauslasses

Die dargestellten Zusammenhänge zeigen für einen ausgewählten Betriebspunkt, dass die Schichtungsqualität zwar vom Speicherdurchmesser abhängt, die Froude-Zahl und die darin enthaltene Höhe des Diffusorauslasses h_D jedoch einen größeren Einfluss besitzen. Die Froude-Zahl enthält neben der Spalthöhe auch die Betriebsparameter. Sie ist daher gut für die Auslegung von Radialdiffusoren geeignet, wie auch bereits in früheren Arbeiten gezeigt wurde [64]. Allgemein gilt, dass Auftriebskräfte gegenüber Trägheitskräften überwiegen sollten und daher kleinere Froude-Zahlen zu bevorzugen sind. Für den vorliegenden Fall (Montage des Beladers an der Speicherdecke) ist eine konservativere Auslegung empfehlenswert ($Fr \leq 1$), wie die extrem niedrige Schichthöhe des Pilotspeichers beweist.

³³ Die hier betrachteten kompakten Speicher besitzen ein Höhe-Durchmesser-Verhältnis von ungefähr 1. Mit zunehmender Speichergröße steigt die Lauflänge der Dichteströmung daher in gleichem Maße.

³⁴ Die Definition der Froude-Zahl nimmt ein konstantes Geschwindigkeitsprofil an. In der Realität ist dies nicht der Fall und bei ungünstiger Auslegung können sogar Ansaugeneffekte und negative Geschwindigkeiten auftreten. Dies führt zu deutlich mehr Vermischung im Speicher.

4.1.2 Dreidimensionale Strömungseffekte im Beladesystem

Dieser Abschnitt thematisiert das dreidimensionale Strömungsverhalten am Beispiel eines isothermen und eines nicht-isothermen Falls. Der isotherme Fall stellt den Zustand dar, in dem sich die Schichtung innerhalb des Speichers vollständig entwickelt hat und demzufolge keine signifikanten Temperaturunterschiede vorliegen. Der nicht-isotherme Fall berücksichtigt auch die Entwicklung der Schichtung zu Beginn des Beladevorgangs, wenn das Fluid im Speicher noch eine niedrigere Temperatur besitzt.

Für den isothermen Fall findet eine Rechnung mit LES statt. Abmessungen, Randbedingungen am Einlass sowie der Anfangszustand im Speicher sind identisch zu den 2D-Simulationen (Tabelle 19). Die Untersuchung des nicht-isothermen Falls berücksichtigt zwei verschiedene Beladegerometrien (Abbildung 85):

- BES_0: Referenzgeometrie mit scharfkantigem Übergang von Anschlussleitung zum Radialdiffusor und
- BES_1: Radialdiffusor mit einem runden Übergangsbereich (konstanter Radius, 75 mm).

Der neue Freiformdiffusor BES_4opt (Abschnitt 0) mit rundem Übergangsbereich, aber variierendem Radius ist nicht Teil dieser Untersuchung. Da die Strömungseffekte jedoch qualitativ ähnlich zu BES_1 sind, ist eine Übertragbarkeit der Ergebnisse gegeben.

Um sicherzustellen, dass die Strömungstopologie in der Anschlussleitung den realen Bedingungen ähnelt, besitzt die Zuleitung des Radialdiffusors einen 90°-Rohrkrümmer. Die Untersuchung beschreibt daher nicht nur die Strömung im Radialdiffusor, sondern erweitert die Betrachtungsgrenzen auch auf die Anschlussleitung, durch welche eine nicht ideale Einlaufströmung in den Radialdiffusor vorliegt.

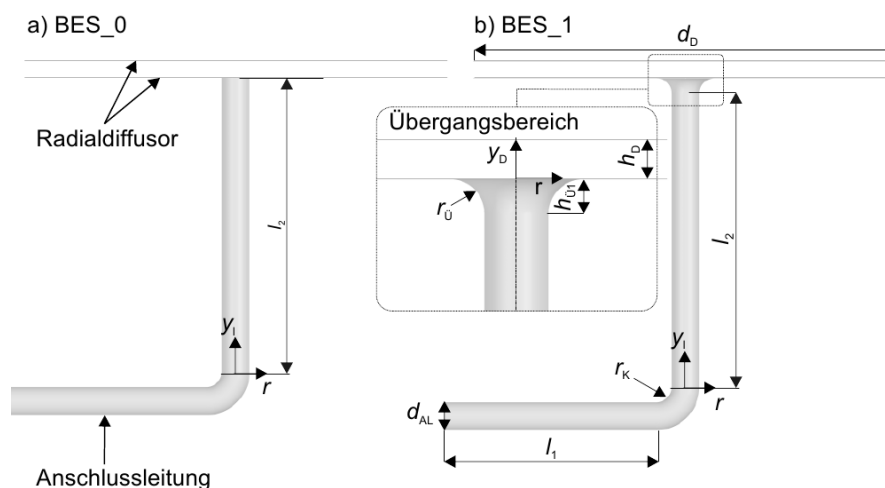


Abbildung 85: Schematische Darstellung der untersuchten Belader mit Einlaufstrecke und Rohrkrümmer

Isotherme Simulation mit LES

Abbildung 86 zeigt die Strömungsverteilung im Radialdiffusor sowie die sich dabei ausbildenden Wirbelstrukturen. Die horizontale Ausströmung ist relativ gleichmäßig verteilt, wobei Wirbel unterschiedlicher Intensität in Umfangs- und Radialrichtung auftreten. Solche räumlichen Strukturen sind typisch für wirbelaufgelöste Simulationen, da sie dem chaotischen, dreidimensionalen und instationären Verhalten turbulenter Strömungen entsprechen.

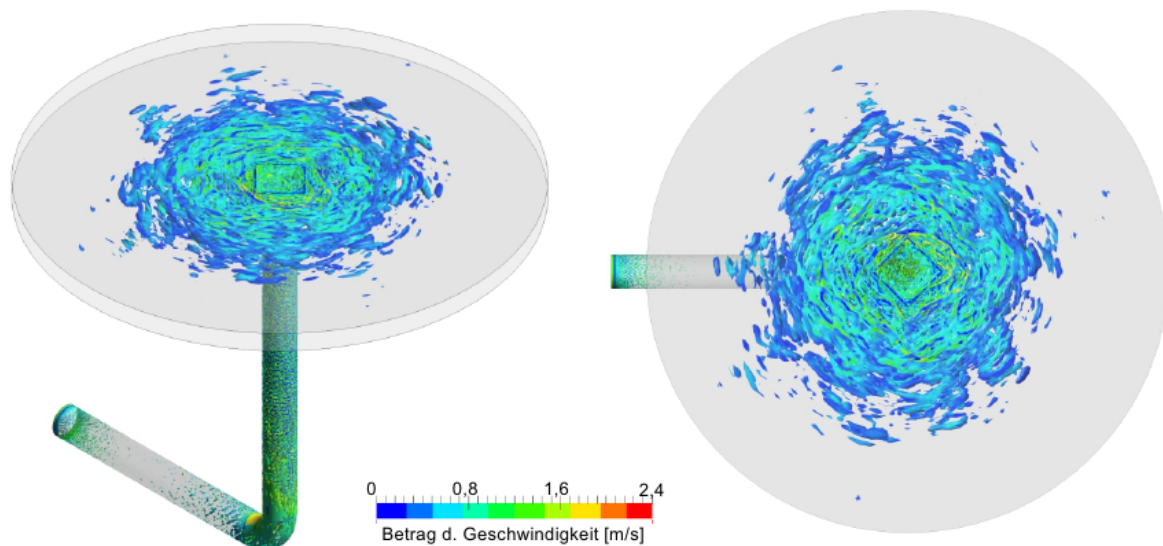


Abbildung 86: Wirbelstrukturen in BES_1 (eingefärbt nach dem Betrag der Geschwindigkeit), $t = 6 \text{ s}$

Der Vergleich von LES mit den Ergebnissen eines isothermen RANS-Modells in begleitenden Untersuchungen zeigt weiterhin, dass im einfacheren $k-\omega$ -SST-Modell nach dem 90° -Rohrkrümmung eine zu starke Ausdehnung des Ablösegebietes vorliegt und die Strömungsablösung im Übergangsbereich des Radialdiffusors zu früh erfolgt. Insgesamt liefert der RANS-Ansatz aber ein gutes Ergebnis, das im Wesentlichen mit dem LES-Ergebnis übereinstimmt und deutlich weniger Rechenaufwand erfordert. Wichtig ist die richtige Auflösung der Strömungsgrenzschicht. Der RANS-Ansatz kann daher im Folgenden auch zur dreidimensionalen Speicherberechnung verwendet werden.

Nicht-isotherme Simulation mit RANS

Die nicht-isothermen 3D-CFD-Simulationen berücksichtigen neben dem Radialdiffusor mit Anschlussleitung auch den Speicher. Abbildung 87 zeigt hierzu das Temperaturfeld in einer vertikalen Ebene sowie ein Isovolumen (rot) über der warmen Zone. In Abbildung 87a (BES_0) liegt noch ein praktisch symmetrisches Ausströmen vor, wie es aufgrund der isothermen Untersuchung auch zu erwarten ist. Bei einem rundem Übergang zwischen Anschlussleitung und Radialdiffusor (BES_1) erfolgt nun jedoch ein stark asymmetrisches und einseitiges Ausströmen (Abbildung 87b). Der Hauptstrahl tritt mit deutlich höherer Geschwindigkeit aus und wird dadurch auch stärker an der Seitenwand des Speichers reflektiert. Der Aufbau der warmen Zone benötigt aufgrund starker Mischeffekte insgesamt deutlich mehr Zeit.

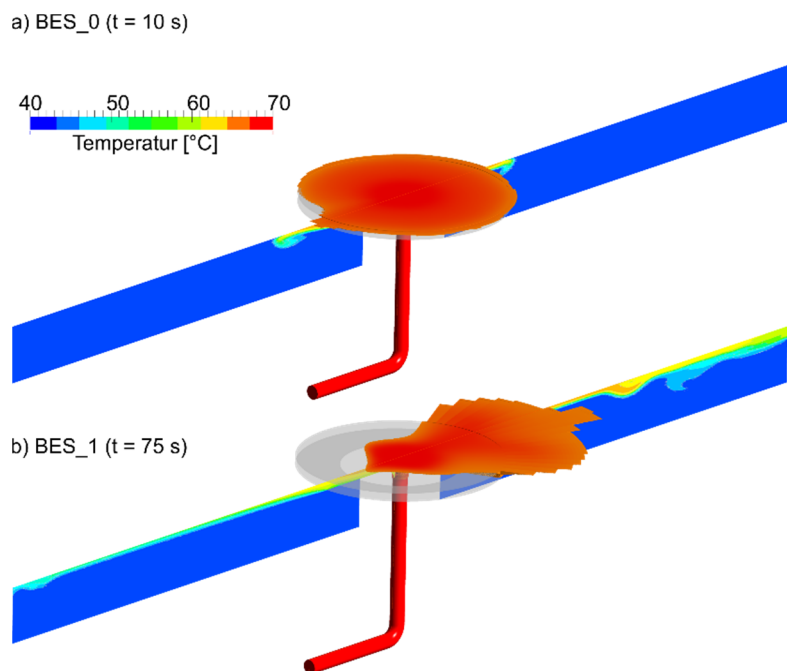


Abbildung 87: Vergleich des Ausströmverhaltens bei einem scharfkantigen (BES_0) und einem runden Übergangsbereich (BES_1), rot: Volumen über der warmen Zone mit $T > 67\text{ °C}$ und Temperaturfeld im vertikalen Schnitt

Abbildung 88 zeigt den Beginn des Beladevorgangs im vertikalen Schnitt von BES_1. Trifft das warme Beladefluid auf die obere Diffusorwand, wird sie analog zu einem Prallstrahl auf einer flachen Platte verteilt. Nach 5 s bewegt sich der Strahl jedoch mehr und mehr auf die rechte Wand des Übergangsbereichs zu und nach 10 s hat sich schließlich ein Hauptstrahl in eine Richtung entwickelt. Der Strahl ist nun schräg zur oberen Diffusorwand ausgerichtet und nicht mehr symmetrisch über den Diffusorumfang verteilt.

Dass überhaupt ein derart einseitiges Ausströmen existiert, war bislang nur eine Annahme, basierend auf einzelnen Experimenten. So zeigte [65] durch eine dreidimensionale Messung des Strömungsfeldes in einem Warmwasserspeicher eine stark asymmetrische Ausströmung. Aus der Fachliteratur ist dabei bekannt, dass ein Flüssigkeitsstrahl in Richtung einer angrenzenden Wand abgelenkt werden kann und sich unter bestimmten Bedingungen (Abstand, Winkel, Strömungsgeschwindigkeit) auch an diese anlegt. Dieser Effekt wird auch Coandă-Effekt genannt. Ist der Strahl einmal ausgebildet, bleibt er meist stabil und ändert seine Richtung nicht mehr, da viskose Kräfte in der Grenzschicht stabilisierend wirken.

Aus den isothermen Simulationen ist bekannt, dass das Strömungsprofil am Ende der Einlaufstrecke keine axiale Symmetrie aufweist, sondern entlang einer Rohrseite leicht erhöht ist. Dennoch zeigen die Berechnungen mit einem homogenen Temperaturfeld eine nahezu gleichmäßige Ausströmung. Das einseitige Ausströmen im nicht-isothermen Fall kann daher nicht allein auf die Entwicklung des Geschwindigkeitsfeldes in der Einlaufstrecke zurückgeführt werden.

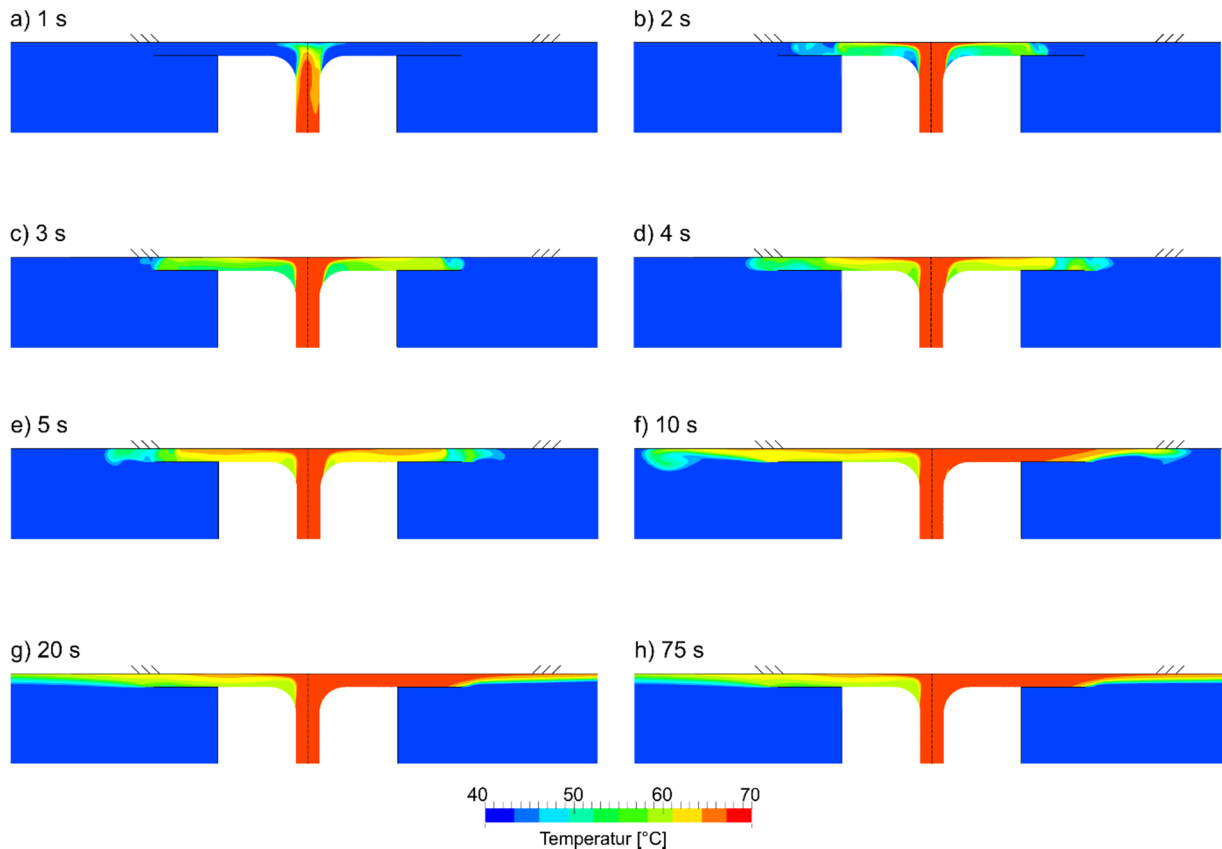


Abbildung 88: Temperaturen im Modellquerschnitt von BES_1 zu Beginn des Schichtungsaufbaus, Ausschnitt von Belader und Nahfeld in einer vertikalen Schnittebene

Laut Coandă legt sich ein Strahl nur dann an eine Fläche an, wenn das System aus Strahl und Umgebung nicht im Gleichgewicht ist [66]. Da sich im isothermen Fall die Ausströmung nicht verändert hat, kann dort von einem stabilen System ausgegangen werden. Im nicht-isothermen Fall ist die Strömung in den Bereichen mit Temperatur- oder Dichteunterschieden jedoch instabil. Dieser instabile Strömungszustand liegt dabei nicht erst im Radialdiffusor, sondern bereits in der Anschlussleitung vor. Dies verdeutlicht Abbildung 89. Entgegen der Vorstellung einer Pfropfenströmung bewegt sich die Flüssigkeit nicht mit einer stabilen Strömungsfrent durch die Einlaufstrecke. Nach dem 90 °-Rohrkrümmer entstehen im Simulationsmodell einzelne Strahlen, wie in Abbildung 89b zu erkennen ist.

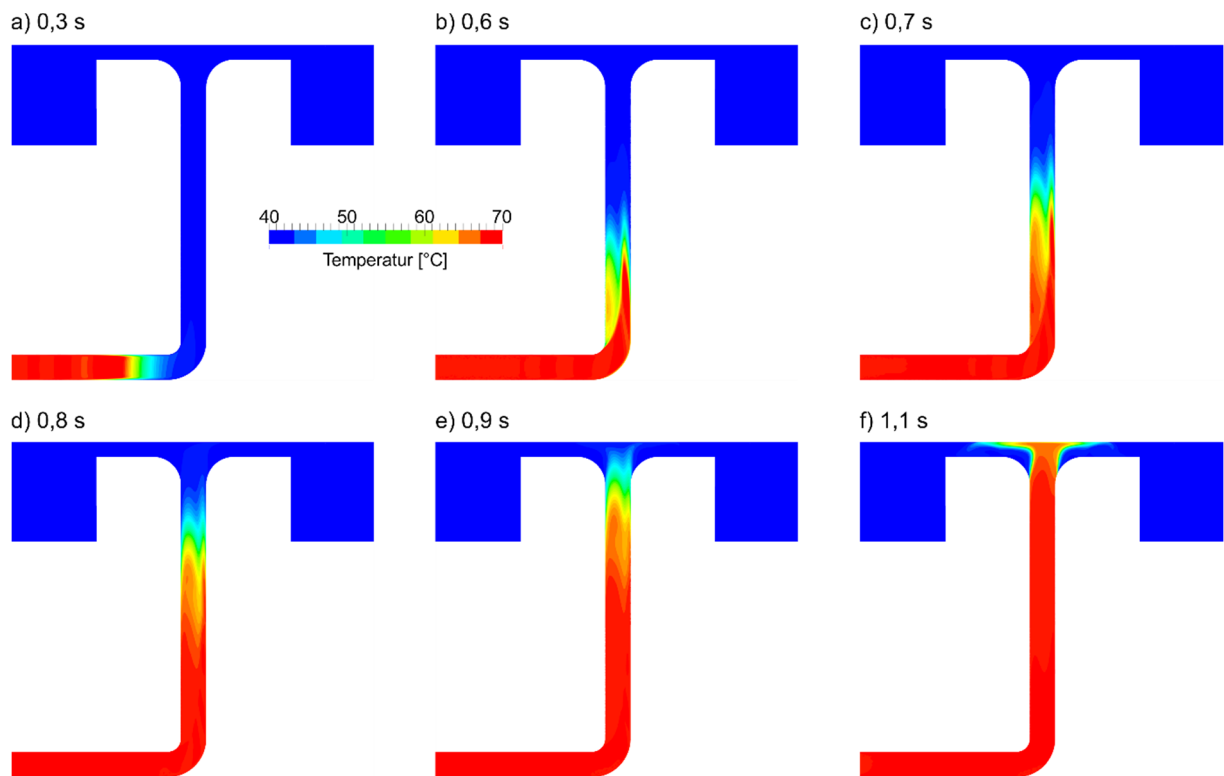


Abbildung 89: Entwicklung des Temperaturfeldes innerhalb der Anschlussleitung von BES_1, vertikaler Schnitt

Um das einseitige Ausströmen zu vermeiden, wurden verschiedene Ansätze verfolgt, wobei sich herausstellte, dass Maßnahmen innerhalb der Einlaufstrecke wirkungslos sind. Letztendlich kann der Einbau von Leitblechen [67] in den Übergangsbereich des Diffusors eine Führung der Strömung in verschiedene Umfangsrichtungen erzwingen. Deshalb wurden im Übergangsbereich acht um 45 ° versetzte vertikale Bleche angeordnet, so dass im Prinzip acht einzelne Kanäle oder Segmente entstehen. Wie in Abbildung 89 dargestellt, führt diese Maßnahme zur Bildung mehrerer Einzelstrahlen über dem Radialdiffusorumfang verteilt. Die Strömung folgt dabei den Leitblechen, anstatt sich an der Wand des Übergangsbereiches anzulegen. Allerdings liegt noch keine gleichmäßige Strömung über den gesamten Diffusorumfang vor, sodass noch keine quantitative Verbesserung der Schichtungsqualität zu beobachten ist. Dies ist ein Thema der nachfolgenden experimentellen Untersuchungen.

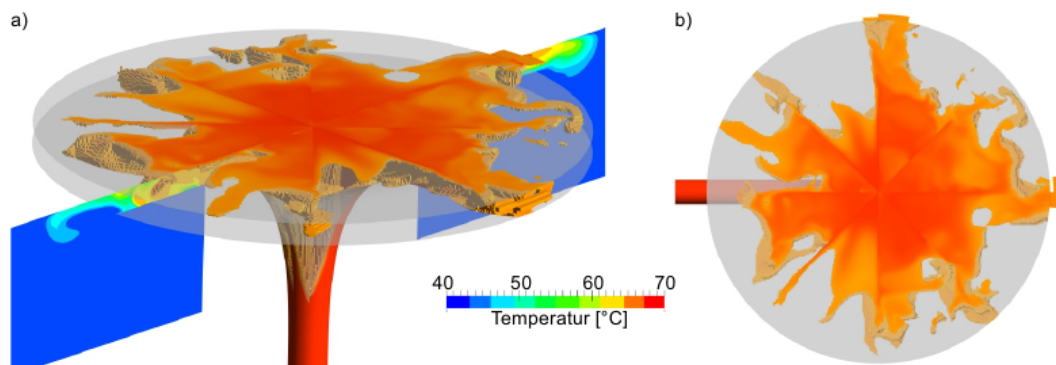


Abbildung 90: BES_1 mit Leitblechen im Übergangsbereich, rot: Volumen über der warmen Zone ($T > 67\text{ °C}$) und Temperaturfeld im vertikalen Schnitt

4.2 Experimentelle Untersuchungen im Labor

Experimentelle Untersuchungen sind unerlässlich, um die Entwicklung von Beladesystemen voranzutreiben. Im Zusammenhang mit den durchgeführten Modellrechnungen können Annahmen und Ergebnisse aus den Simulationen überprüft werden. Im Mittelpunkt der folgenden Untersuchungen stehen Themen, die in den Simulationen besonders aufgefallen sind. Dazu gehören

- dreidimensionale Strömungseffekte,
- der Einfluss von Betriebsparametern,
- der Abstand zwischen Belader und Speicherdecke,
- unterschiedliche Beladergeometrievarianten,
- die Variation der Spalthöhe sowie
- die Wirkung von Lochblechen.

Mit einem Versuchsstand zur experimentellen Untersuchung von Strömungen (sog. Plexi II) der Professur Technische Thermodynamik, erfolgt dazu die qualitative Bewertung der Strömung mittels Tintenverfahren³⁵ und eine quantitative Bewertung der Schichtungsqualität anhand des vertikalen Temperaturverlaufs. Abbildung 91 zeigt den Versuchsstand, hier noch ohne den Belader.

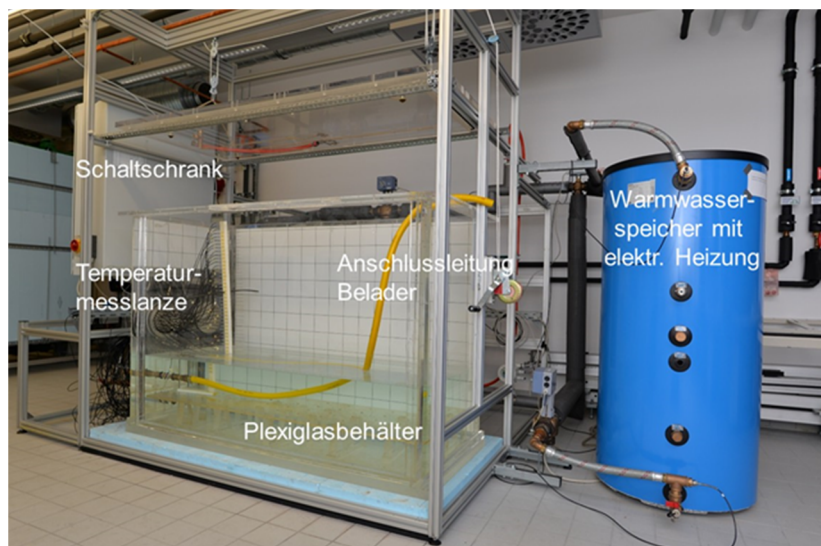


Abbildung 91: Versuchsstand Plexi II; teilweise entleert; ohne Belader

In den CFD-Simulationen diente je nach Speichergröße ein Radialdiffusor mit mindestens ca. 1 m Durchmesser als Untersuchungsobjekt. Für die Laboruntersuchungen sind die Belademaße jedoch durch die Größe des Behälters begrenzt. Damit die Ergebnisse insbesondere auf den Demonstrator übertragbar sind, kann die Geometrie nicht einfach nur skaliert werden. Gemäß der Ähnlichkeitstheorie und der Zielstellung des Versuchs ist eine Anpassung von Diffusordurchmesser und -spalthöhe unter Berücksichtigung der möglichen Betriebsbedingungen notwendig. Abbildung 92 veranschaulicht die Dimensionen des Plexiglas-Behälters und zeigt die möglichen Beladervarianten.

³⁵ Beim Tintenverfahren erfolgt die Zugabe einer farbigen Flüssigkeit mit ähnlicher Dichte in die Strömung. Es wird angenommen, dass der Strömungsimpuls stets größer ist als eine Auf- oder Abtriebswirkung infolge geringer Dichteunterschiede zwischen Tinte und Trägermedium. Der sichtbare Strömungsverlauf ist daher repräsentativ für die reale Strömung. Vergleichsexperimente zeigen außerdem keinen Einfluss auf die Schichtungsqualität.

Dies sind:

- a) 360°-Beladermodell in einem verkleinerten Maßstab,
- b) 36°-Segment als 1:1-Modell (Segmentmodell).

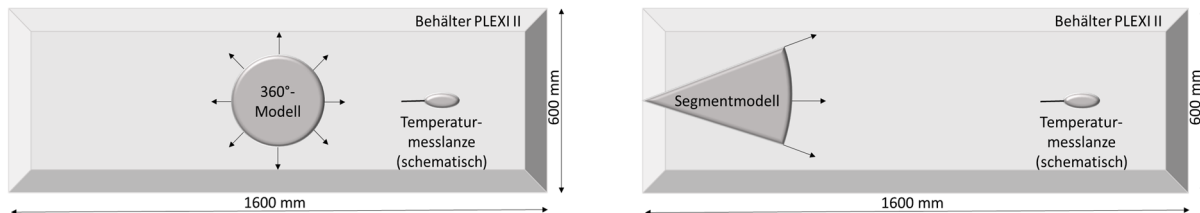


Abbildung 92: Maßstabsgerechte Draufsicht beider Beladervarianten im Bezug zum Behälter des Versuchsstands

Maße und Parameter beider Varianten sind in Tabelle 22 gegenübergestellt. Das Segmentmodell entspricht mit einem Winkel $\alpha = 36^\circ$ einem 1/10-Ausschnitt des Beladers aus dem Demonstrator. Da die charakteristischen Maße von Original und Modell somit übereinstimmen, lässt sich eine Ähnlichkeit von Reynolds- und Froude-Zahl prinzipiell gut erreichen. Für Plexiglas existiert jedoch eine Obergrenze der maximal zulässigen Temperatur von ca. 55°C , ab welcher es massiv an Festigkeit verliert. Da es bereits bei niedrigeren Temperaturen zur Eintrübung des Materials kommen kann und eine Sicherheit bzgl. der Festigkeit notwendig ist, gilt im Laborbetrieb eine Maximaltemperatur von 40°C . Bei einer minimalen Rücklauftemperatur von ca. 12°C (hausinterner Kälteanschluss) können daher nur relativ kleine Temperaturdifferenzen untersucht werden. Vor den Versuchen erfolgt dabei immer eine Konditionierung des Speichers auf 20°C . Im Segmentmodell liegt die Temperaturdifferenz mit 20 K somit 10 K unter der Differenz im Auslegungspunkt des Demonstrators. Außerdem ist das Temperaturniveau niedriger. Die Ähnlichkeitskennzahlen zwischen Segmentmodell und Demonstrator sind daher verschieden und es liegt keine perfekte Ähnlichkeit vor. Da die untersuchten Temperaturdifferenzen jedoch auch im realen Betrieb auftreten können und weil es vor allem auch um die qualitative Untersuchung der Strömungseffekte im Belader geht, ist die Vorgehensweise dennoch sinnvoll. Ein wesentlicher Vorteil dieses Modells ist auch, dass es die zur Behandlung des asymmetrischen Ausströmens eingeführten Leitelemente aus der Beladeroptimierung (Abschnitt 4.1.2) direkt beinhaltet. Den Experimenten liegt dabei die Annahme zu Grunde, dass die Strömung über alle von den Leitblechen gebildeten Segmente in gleichen Teilen ausströmt. Dass dies nur näherungsweise der Realität entspricht, verdeutlichte bereits die qualitative Verteilung der Strahlen im Simulationsmodell (vgl. mit Abbildung 90). Da die Effekte in allen Segmenten grundlegend identisch und nur unterschiedlich stark ausgeprägt sind, ist die Annahme dennoch gerechtfertigt. Die Versuche sollen letztlich auch zeigen, ob das Simulationsmodell das Anlegen der Strömung an die Trennwände korrekt vorhersagt.

Das 360°-Modell entspricht einem verkleinerten und angepassten Modell des Beladers aus dem Demonstrator. Zielstellung für dieses Modell ist vor allem, das dreidimensionale Strömungsverhalten und das einseitige Ausströmen qualitativ nachzuvollziehen. Hierfür hat sich in begleitenden CFD-Rechnungen zur Auslegung des Diffusors ein sehr schmaler Spalt als notwendig erwiesen. Dies führt zu einem ungünstigen Verhältnis von Diffusordurchmesser zu Spalthöhe und die Froude-Zahl nimmt einen sehr großen Wert an. Die Reynolds-Zahl³⁶

³⁶ Die charakteristische Länge ist die Spalthöhe am Diffusorauslass [29].

$$Re_D = \frac{u_D \cdot h_D}{\nu} \quad (14)$$

liegt dafür näherungsweise beim Wert des Segmentmodells. Weiterhin ist aus der schematischen Darstellung ersichtlich, dass es beim verkleinerten Modell in Abbildung 92a aufgrund der unterschiedlichen Kantenlängen des Behälters zu einer stärkeren Interaktion mit der Front- und Rückwand kommen kann. Daher wird der Behälter für die 360°-Beladermodelltests noch durch eine zusätzliche Trennwand abgegrenzt, sodass eine quadratische Grundfläche entsteht.

Tabelle 22: Auslegungsparameter des im Demonstrator verwendeten Beladers gegenüber dem 360°-Beladermodell und dem Segmentmodell

	h_D [mm]	d_D [mm]	d_D/h_D [-]	\dot{V}_{ein} [m ³ /h]	T_{ein} [°C]	T_{Sp} [°C]	Fr_D [-]	Re_D [-]
Demonstrator	40	980	23,5	19,5	70	40	0,58	4207
360°-Beladermodell	5	325	65,0	2,0	40	20	16,57	2165
Segmentmodell	40	980	23,5	2,0	40	20	0,93	2761

4.2.1 Segmentmodell

Einfluss der Diffusorgeometrie auf das Beladeverhalten

In den 2D-Rechnungen hat sich gezeigt, dass die Beladergeometrie zwar prinzipiell das Geschwindigkeitsprofil am Diffusorauslass beeinflusst, die Wirkung auf die Schichtungsqualität jedoch gering ausfällt. In den dreidimensionalen Untersuchungen wurde allerdings deutlich, dass sehr wohl räumliche Strömungseffekte auftreten und diese ggf. massiv die Schichtungsqualität beeinträchtigen können.

Abbildung 93a veranschaulicht die sich einstellende Übergangsschicht im Behälter. Zur Einfärbung wurde während des Schichtungsaufbaus kurzzeitig Tinte in das Segmentmodell hinzugegeben. Unterhalb des relativ scharf abgegrenzten dunklen Bereichs hat das Wasser noch eine Temperatur von ca. 20 °C. Oberhalb befindet sich die warme Zone mit ungefähr 40 °C.

Interessant ist auch der Blick von oben in den Belader (Abbildung 93b). Hier kann man erkennen, dass die Strömung nicht gleichmäßig über den Diffusorquerschnitt austritt, sondern sich an die Seitenwände des Segments anlegt. Zwischen den zwei Strahlen entwickelt sich ein Mischungsgebiet, wodurch sich mittig am Diffusorauslass eine Rückströmung ausbildet. Die Charakteristik war bereits im Strömungsfeld der simulierten Beladervariante mit Leitblechen zu beobachten. Dieses komplexe Verhalten, welches höchstwahrscheinlich auf den Coandă-Effekt zurückzuführen ist, geben die Simulationen demnach korrekt wieder.

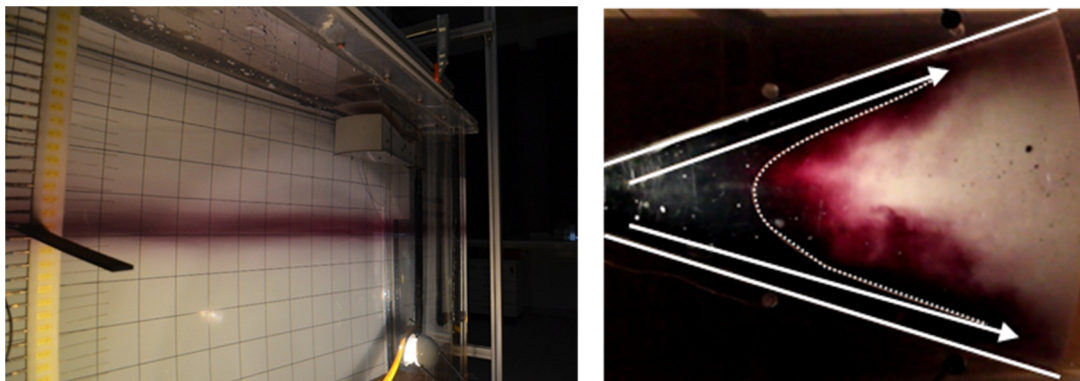


Abbildung 93: a) Beladeversuch im abgedunkelten Labor und mit Tinte eingefärbte Übergangsschicht; links im Bild befindet sich die Messlanze; b) Draufsicht durch die Decke in den Belader hinein; Anlegen der mit Tinte eingefärbten Strömung an die Seitenwände

Eine umfangreiche Diskussion aller durchgeführten Experimente findet sich in [29]. Für unterschiedliche Betriebsbedingungen und Beladegerometrien haben sich folgende Kernaussagen herausgestellt:

- Beladevolumenstrom und Temperaturdifferenz: Bei Montage des Beladers an der Speicherdecke besteht im betrachteten Parameterfeld kaum eine Abhängigkeit der Schichtungsqualität von den Betriebsgrößen. Insbesondere bei hohen Volumenströmen ist jedoch der Einfluss des Speicherdurchmessers zu beachten, da eine weitreichende Reflexion der Strömung an der Behälterwand die Schichtungsqualität beeinflussen kann.
- Diffusorgeometrie: Die Gestaltung des Beladers bestimmt die Strömung im Diffusor. Im Versuch mit dem Segmentmodell ist der Einfluss auf die Schichtungsqualität gering.
- Spalthöhe des Diffusors: Das Kriterium $d_D/h_D = 20$ stellt eine geeignete Empfehlung zur Auslegung des Diffusorspalts dar. Bei großen Speicherdurchmessern kann der Wert ggf. auch höher sein. Geringe Spalthöhen führen zu hohen Austrittsgeschwindigkeiten, was bei einem geringen Abstand zur Speicherwand mit starker Vermischung einhergeht.

Anordnung des Beladers im Speicher

In den CFD-Simulationen hat sich gezeigt, dass mit zunehmendem Deckenabstand die Mischungsvorgänge signifikant zunehmen und die Schichtungsqualität abnimmt (Abschnitt 4.1.1). Dass tatsächlich deutlich größere Mischungsbereiche in den Randzonen des nicht-isothermen Freistrahls auftreten, lässt sich mit Hilfe des Tintenverfahrens in Abbildung 94 beobachten. Der Belader hat hier einen Abstand von ca. 200 mm zur Behälterdecke.



Abbildung 94: Schichtungsaufbau bei einem Deckenabstand von 200 mm ($\Delta T = 20 \text{ K}$, $\dot{V} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$)

Befindet sich der Belader nicht an oder in der Nähe der Decke, so dauert es relativ lange, bis sich eine thermische Schichtung ausbilden kann. Der Grund dafür ist, dass das warme Volumen erst das entstehende Mischvolumen verdrängen muss. Weil das Beladefluid bei Eintritt in den Speicher jedoch stark abkühlt, liegt die Maximaltemperatur im Speicher deutlich unter der Eintrittstemperatur des Beladefluids.

Einsatz von Lochblechen

In Abbildung 93b wurde deutlich, dass sich die Strömung wie im Simulationsmodell an die Begrenzungswände des Segments anlegt. Um der dabei auftretenden Strähnenbildung und der damit einhergehenden Vermischung entgegenzuwirken, wird in diesem Abschnitt untersucht, ob die Kombination mit einem oder mehreren Lochblechen sinnvoll ist, um eine gleichmäßige Ausströmung über dem Diffusorauslass wieder herzustellen. Die Verwendung von Gittern oder Lochblechen und auch der Einsatz von Leitblechen ist bereits von Kaltwasserspeichern bekannt [67]. Dabei dienen die Einbauten ebenfalls zur Erzeugung einer gleichmäßigen Ausströmung, allerdings ist die Strömungscharakteristik eine andere. So können sich bei Kaltwasserspeichern im Diffusorspalt aufgrund der dort i. d. R. vorliegenden niedrigeren Geschwindigkeiten³⁷ axialsymmetrische Wirbelstrukturen ausbilden. In Warmwasserspeichern reicht aufgrund der deutlich höheren Temperaturdifferenzen dagegen häufig ein Radialdiffusor auf einer Ebene des Speichers aus, wobei die mittlere Ausströmgeschwindigkeit dann auch deutlich höher ist. Wesentlicher Nachteil einer konstruktiven Lösung mit Leit- und Lochblechen ist der zusätzliche Strömungswiderstand. Dass dies insbesondere für den Entladefall mit Temperaturen bis zu 98 °C zu keinem Nachteil führt, ist Thema in [29].

In den Untersuchungen am Beladersegment ergibt sich bei Verwendung eines Lochblechs³⁸ gegenüber dem in Abbildung 93b gezeigten Strömungsbild wie erwartet eine nahezu ideale Gleichverteilung (Abbildung 95a). Als wichtig erweist sich die Positionierung des Lochbleches. So stellt sich ein positiver Effekt nur ein, wenn sich das Blech nicht zu weit stromabwärts befindet. In Abbildung 95b sind daher bei einem am Diffusorauslass positioniertem Lochblech noch immer deutlich zwei Strahlen zu beobachten.

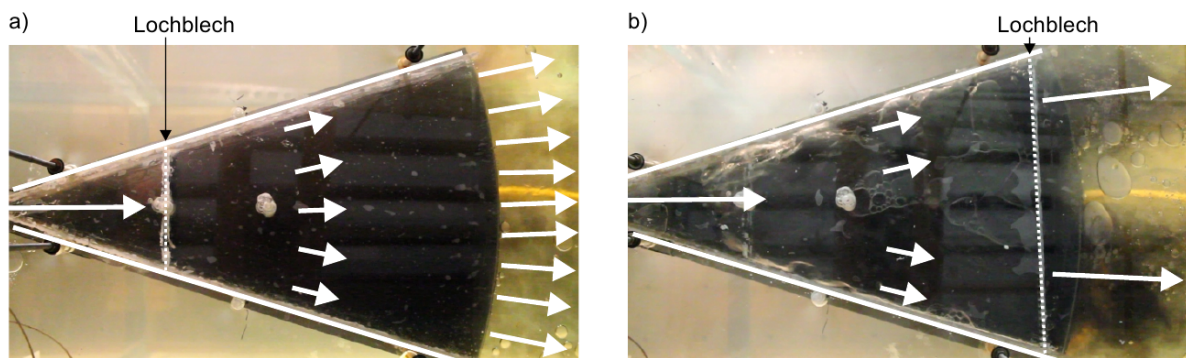


Abbildung 95: Draufsicht auf den Belader bei Zugabe von Tinte mit einem Lochblech a) innen ($r = d_b/4$) und b) außen ($r = d_b$)

³⁷ In Kaltwasserspeichern liegen i. d. R. relativ kleine Temperaturdifferenzen vor. Um eine hohe Schichtungsqualität zu erreichen, muss auch die Geschwindigkeit am Diffusorauslass relativ niedrig sein [64].

³⁸ Zum Einsatz kam ein Lochblech mit einem Lochdurchmesser von 4 mm, einer Dicke von 2 mm und einem Anteil der Lochfläche bezogen auf die Gesamtfläche von ca. 40 %.

Validierung der CFD-Simulationen

Um die im Rahmen der CFD-Modellierung getroffenen Annahmen zu überprüfen, ist ein Vergleich mit experimentellen Ergebnissen wichtig. Hierfür fanden Simulationen des Beladevorgangs im Versuchsstandbehälter statt, um die dort berechnete thermische Schichtung mit dem Resultat des Experiments zu vergleichen.

Der Temperaturverlauf entlang der Messlanze im Behälter (Versuch) bzw. einer vertikalen Linie über der Höhe des Speichers (Simulation) zu zwei ausgewählten Beladezuständen (25 % und 50 %) ist in Abbildung 96 dargestellt. Mit zunehmender Beladedauer verläuft der Übergang in die warme Zone in beiden Beispielen weniger steil. Die Simulationen bilden dieses Verhalten fast identisch ab und auch der Verlauf der Übergangsschicht stimmt sehr gut mit dem Experiment überein. Geringe Abweichungen zwischen Simulation und Versuch finden sich nur im Temperaturverlauf in der warmen und kalten Zone. So ist bspw. im Versuch nach einer 50 %-igen Beladung ($t^* = 0,5$) die Temperatur in der kalten Zone etwas höher als in der Simulation. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass in der Simulation Volumenstrom und Beladetemperatur als konstant angenommen werden, was im Versuch nur näherungsweise zutrifft. Auch ist das simulierte Temperaturfeld im Speicher zum Startzeitpunkt homogen, was im Versuch selbst mit langen Konditionierungs- und Ruhezeiten nicht vollständig der Realität entspricht. Eine andere Fehlerquelle liegt in der Modellierung der Strömung im Belader. Diese erfolgt stationär und nur das Strömungsprofil am Diffusorauslass wird auf den Einlass des separaten Speichermodells übertragen. Instationäre Effekte bleiben so unberücksichtigt. Trotz dieser Fehlerquellen stimmen die Temperaturprofile der Simulationen sehr gut mit den Versuchsergebnissen überein. Die Versuche bestätigen somit den Modellierungsansatz und das CFD-Modell kann auch komplexe Strömungen in thermischen Speichern sehr gut wiedergeben. Die Trennung von Belader- und Speichermodell ist selbst bei derartig komplizierten und instationären Strömungen demzufolge gerechtfertigt.

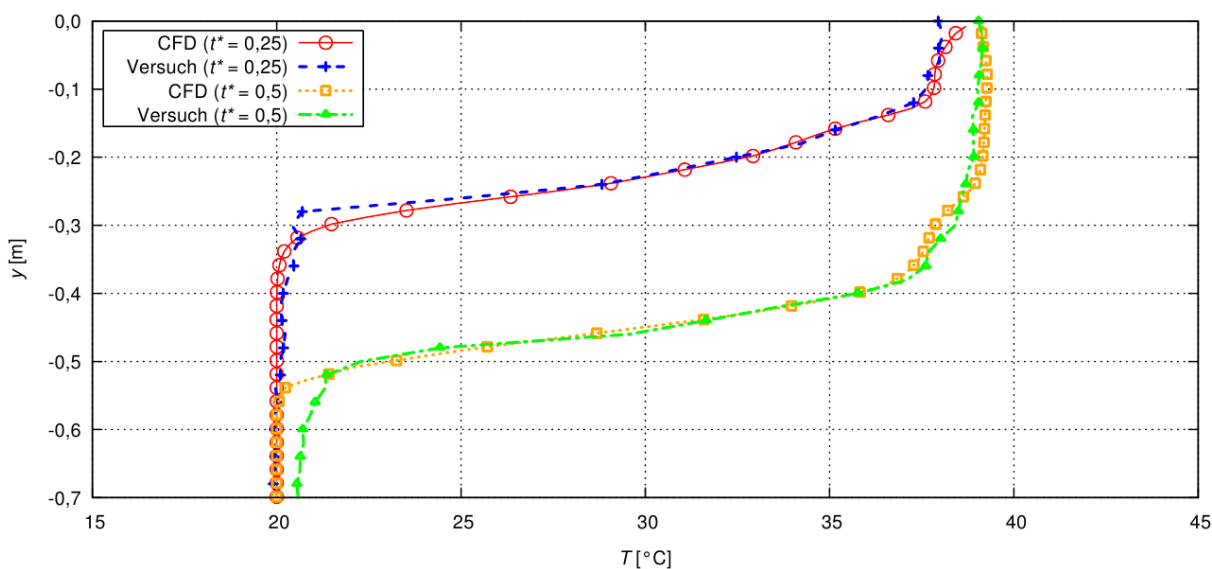


Abbildung 96: Vertikaler Temperaturverlauf für Versuch und CFD-Simulation, $t = 350 \text{ s}$ ($t^* = 0,25$) bzw. $t = 700 \text{ s}$ ($t^* = 0,5$), $\Delta T = 20 \text{ K}$; $\dot{V} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$

4.2.2 360°-Beladermodell

Um die dreidimensionale Strömungscharakteristik in Radialdiffusoren näher zu beschreiben, folgen Untersuchungen an einem verkleinerten 360°-Beladermodell. Hierzu wurde der quaderförmige Plexiglasbehälter so umgebaut, dass durch eine Trennwand ein Behälterabteil mit

quadratischer Grundfläche entsteht. Da die Grundfläche nicht rotationssymmetrisch ist, liegt noch ein geringer Einfluss der unterschiedlich vom Diffusorauslass entfernten Seitenwände vor. Zur Abstützung der Trennwand befindet sich im ungenutzten Behälterteil ein Gestell. Den Versuchsaufbau zeigt Abbildung 97. Im abgetrennten Behälterteil existieren zwei Anschlussleitungen (oben/unten), um den Einfluss der Länge der Einlaufstrecke zu untersuchen.

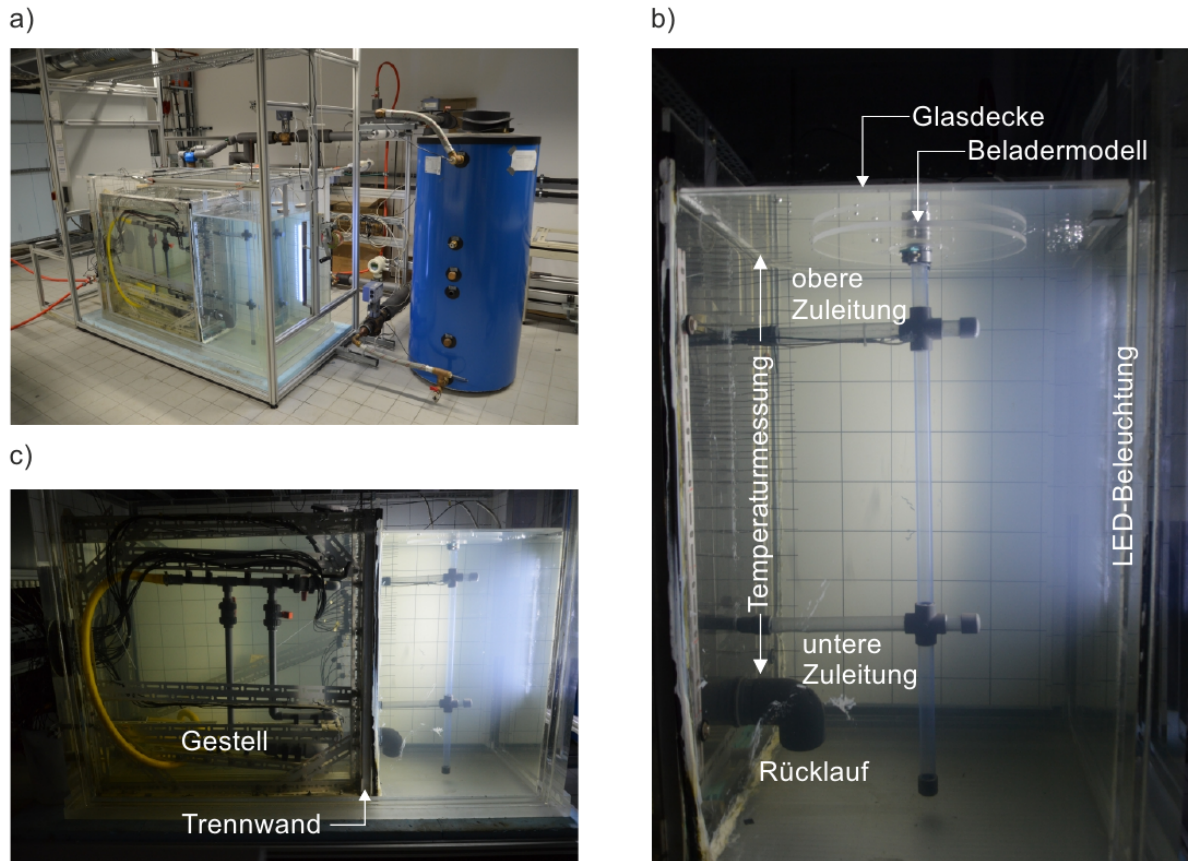


Abbildung 97: Versuchsaufbau (a) mit abgetrenntem Behälterteil (b, c) im abgedunkelten Labor

Für die Versuche kommen zwei verschiedene Beladegerometrien zum Einsatz:

- BES_0: Referenzgeometrie mit scharfkantigem Übergang von der Anschlussleitung zum Radialdiffusor und
- BES_1: Belader mit rundem Übergangsbereich.

Die Beladervarianten orientieren sich an den im Rahmen der Demonstrator-CFD-Simulationen untersuchten Geometrien (Abbildung 98). Der Belader BES_1 wurde mittels 3D-Druck (Stereolithografie) gefertigt und besteht aus einem halbtransparenten Kunststoff. Im Übergangsbereich besitzt der Radius mit 75 mm den gleichen Wert wie im Demonstratormodell von BES_1.

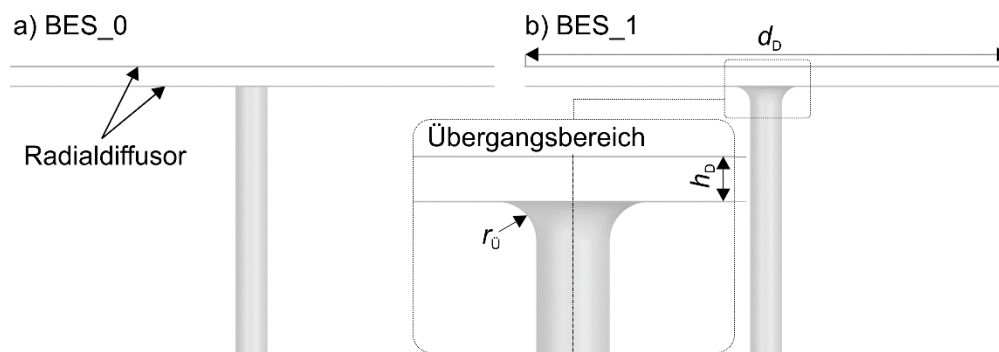


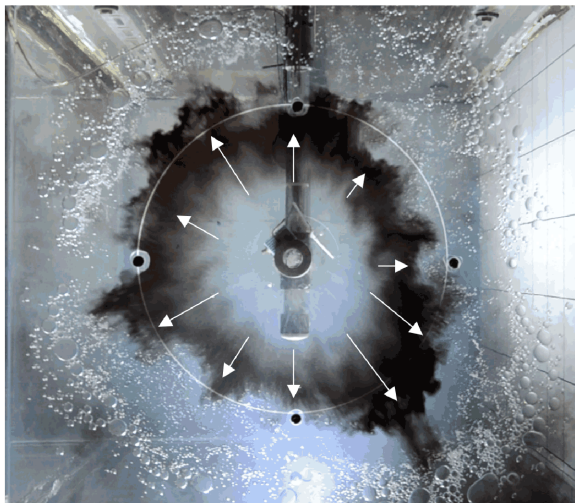
Abbildung 98: Schematische Darstellung der untersuchten Beladervarianten mit scharfkantigem (BES_0) und rundem Übergangsbereich (BES_1)

Abbildung 99 vergleicht die Strömungscharakteristik beider Beladervarianten anhand der Zugabe von Tinte in den Belader. Beim scharfkantigen Übergang (BES_0, Abbildung 99a) verteilt sich die Strömung über den gesamten Diffusorumfang. Das Ausströmen erfolgt jedoch nicht rotationssymmetrisch, da mehrere einzelne Strahlen entstehen. Das Strömungsbild ähnelt qualitativ dem Ergebnis der LES-Rechnung in Abbildung 86. Bei einem runden Übergangsbereich (BES_1, Abbildung 99b) wird die Strömung in eine Richtung abgelenkt, während auf der gegenüberliegenden Seite der Diffusor Flüssigkeit ansaugt. Damit einher geht eine deutliche Abnahme der Schichtungsqualität. Die Ergebnisse sind insgesamt sehr gut vergleichbar mit den Resultaten der 3D-CFD-Simulationen.

Dennoch finden sich Unterschiede zwischen Simulation und Experiment. Während die 3D-LES-Berechnung zeigte, dass in BES_1 für isotherme Bedingungen ein nahezu gleichmäßiges Ausströmen vorliegt, kann dies im verkleinerten Beladermodell nicht bestätigt werden. Im Experiment bleibt die Wirkung auch dann bestehen, wenn es praktisch keinen Unterschied zwischen den Temperaturen des Beladefluids und der Flüssigkeit im Speicher gibt. Dies deutet darauf hin, dass sowohl die Strömungsgeschwindigkeit als auch die jeweiligen Dimensionen einen signifikanten Einfluss auf das Auftreten des Effekts haben. Zur Klärung der Zusammenhänge zwischen den lokalen Strömungseigenschaften und den thermischen Bedingungen sowie der Geometrie sind weitere Untersuchungen erforderlich.

Die Ergebnisse zeigen trotzdem deutlich, dass hohe lokale Strömungsgeschwindigkeiten und die Bildung von Strahlen für die Schichtungsqualität nachteilig sind. Ein beschleunigter Strahl geht immer einher mit erhöhten Mischeffekten entlang der Strahlengrenzen und einer stärkeren Reflexion an den Seitenwänden des Speichers. Um eine geringere Durchmischung und eine bessere Schichtungsqualität zu erreichen, ist ein homogenes Ausströmen mit geringen Geschwindigkeiten notwendig. Der Radialdiffusor funktioniert demnach am besten, wenn der Strömungsimpuls durch ein Ausbreiten und Verteilen des Beladefluids infolge der radialen Querschnittserweiterung reduziert wird. Voraussetzung hierfür ist in jedem Fall die Montage des Beladers an der Decke des Speichers, um die Ausbildung einer Dichteströmung sicherzustellen (vgl. mit Abbildung 83).

a) BES_0



b) BES_1

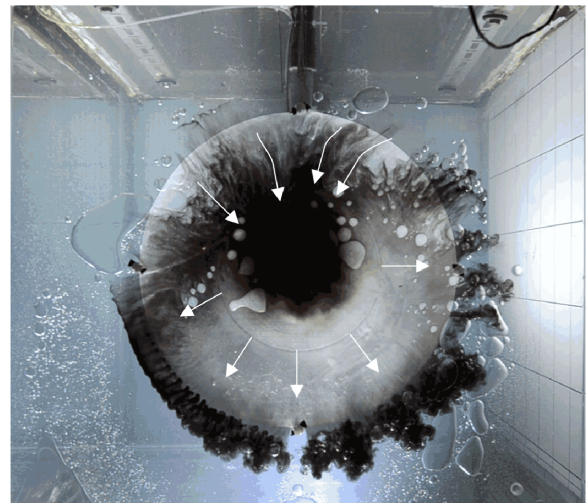


Abbildung 99: Ausströmen aus BES_0 mit scharfkantigem und BES_1 mit rundem Übergangsbereich bei Zugabe von Tinte in das 360°-Beladermodell, $\dot{V}_{\text{ein}} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta T = 20 \text{ K}$

Neben der Validierung der Simulationsergebnisse können auch Maßnahmen zur Wiederherstellung eines symmetrischen Ausströmens im Labor untersucht werden. In den 3D-CFD-Simulationen aus dem letzten Abschnitt führte z. B. der Einbau von Leitblechen zu einem sternförmigen Ausströmen. Um dieses Verhalten in den Experimenten nachzuvollziehen, wurde ein solches Einbauteil im Übergangsbereich von BES_1 installiert. Wie in der Simulation aus Abbildung 87 ist nun das Aufteilen des Hauptstrahls und die Bildung mehrerer Einzelstrahlen zu beobachten (Abbildung 100). Die Strahlen haben noch eine vergleichsweise hohe Austrittsgeschwindigkeit und dazwischen entstehen Mischungsbereiche. Die Ergebnisse zeigen, dass sich der Einbau von Leitblechen in den Übergangsbereich des Beladers sehr positiv auf die Strömungsverteilung im Radialdiffusor auswirkt und letztlich auch die Schichtungsqualität im Speicher deutlich verbessert.

a) 2 s



b) 6 s

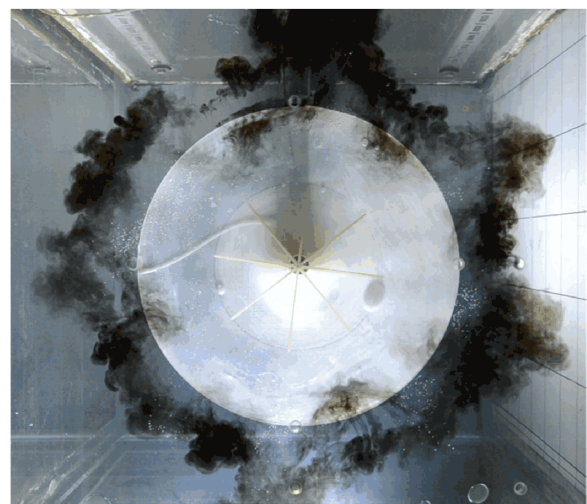
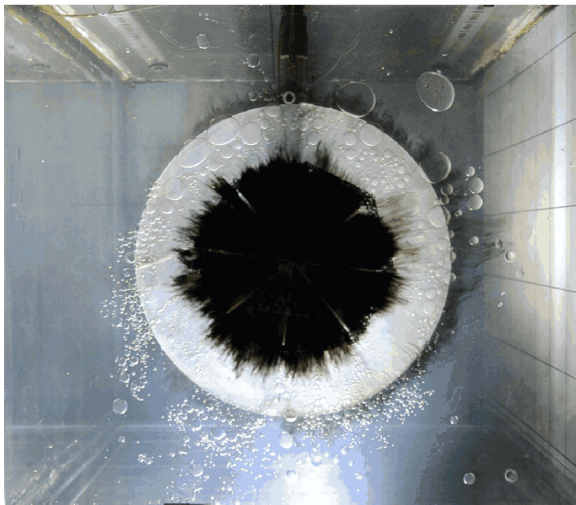


Abbildung 100: Ausströmen aus BES_1 mit Leitblechen bei Zugabe von Tinte in den Belader, $\dot{V}_{\text{ein}} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta T = 20 \text{ K}$

Um das Strömungsverhalten weiter zu verbessern und die Strahlenbildung zu vermeiden, wird BES_1 um ein zusätzliches Einbauteil erweitert, welches ähnlich dem Lochblech aus Abschnitt 4.2.1 einen zusätzlichen Druckverlust im Radialdiffusor erzeugt. Aufgrund des schmalen Diffusorspalts im verkleinerten Modell ist ein Lochblech in diesem Fall allerdings nicht praktikabel,

so dass in den Versuchen ein Metallschaum zum Einsatz kommt. Dass dieser Metallschaum zu einer sehr guten Vergleichmäßigung der Ausströmung führt, verdeutlicht Abbildung 101. Bevor die schwarz gefärbte Strömung den Metallschaum erreicht, ist sie noch relativ chaotisch. Kurz darauf (Abbildung 101a) passiert die Strömung den Metallschaumring und tritt nahezu symmetrisch aus ihm heraus. Im Gegensatz zu den großen Turbulenzstrukturen im Fall von BES_0 (Abbildung 99a) können nun sehr feine Strahlen beobachtet werden, was auf die kleinporige Struktur des Schaums zurückzuführen ist. Schließlich entsteht eine sehr gleichmäßige Strömung über den gesamten Diffusorumfang und im weiteren Verlauf (Abbildung 101b) entwickeln sich auch wieder größere Turbulenzstrukturen. Insgesamt ist die Ausströmung deutlich gleichmäßiger als bei BES_0.

a) 1 s



b) 8 s

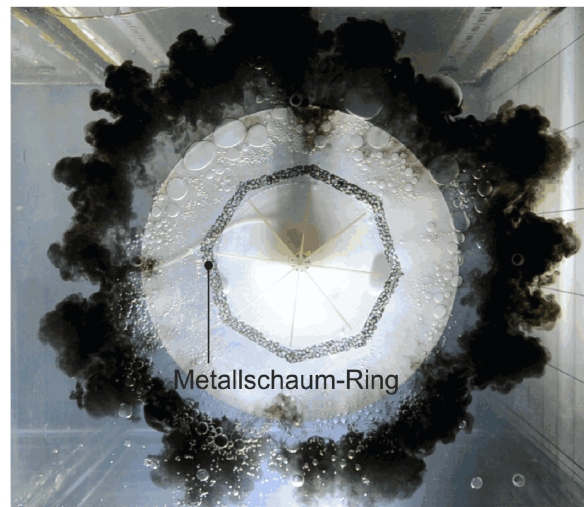


Abbildung 101: Ausströmen aus BES_1 mit Leitblechen und einem Ring aus Metallschaum bei Zugabe von Tinte in den Belader, $\dot{V}_{ein} = 2 \text{ m}^3/\text{h}$, $\Delta T = 20 \text{ K}$

Abbildung 102 zeigt den Einfluss der verschiedenen Einbauteile auf das vertikale Temperaturprofil im Behälter. Durch den Einsatz von Leitblechen verbessert sich die Temperaturverteilung erwartungsgemäß gegenüber BES_1 ohne zusätzliche Einbauten deutlich. Die Temperatur in der warmen Zone ist sogar höher als in der Referenzvariante BES_0. Das Ergebnis bei Verwendung eines Metallschaums ist dabei etwas besser als nur bei Einsatz von Leitblechen. Letztendlich geht die qualitative Verbesserung des Strömungsmusters mit einer quantitativen Verbesserung einher. Die Kombination mit Einbauteilen bietet für hohe Volumenströme ($V2_T20$ in Abbildung 102) sogar eine bessere Schichtungsqualität gegenüber dem Referenzbelader BES_0.

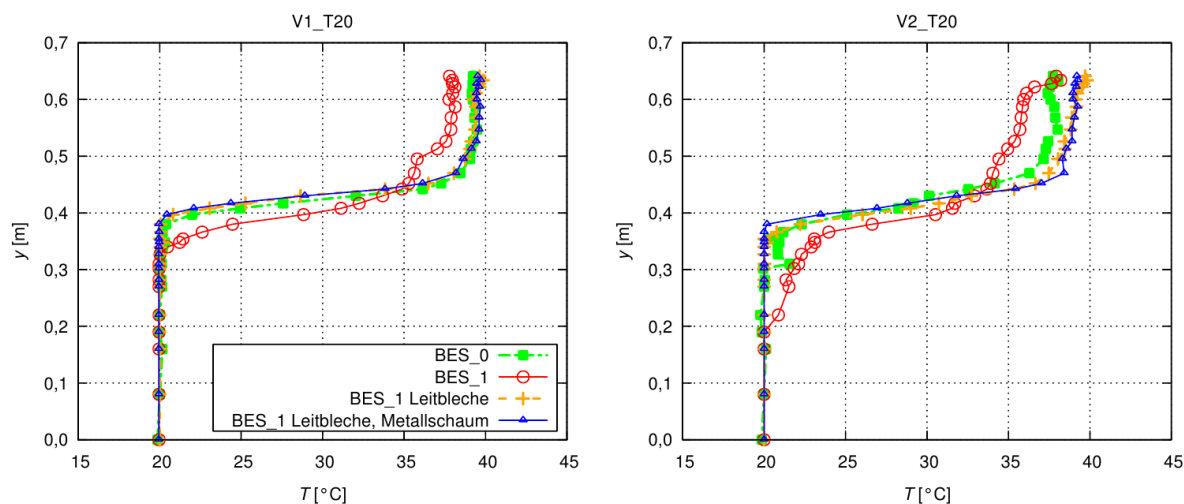


Abbildung 102: Vertikaler Temperaturverlauf für BES_0 und BES_1 mit verschiedenen Einbauteilen bei unterschiedlichen Volumenströmen, $t^* = 0,25$, $\Delta T = 20\text{ K}$ links: $\dot{V}_{\text{ein}} = 1\text{ m}^3/\text{h}$ und rechts: $\dot{V}_{\text{ein}} = 2\text{ m}^3/\text{h}$

4.3 Fazit

Gegenstand dieses Kapitels waren numerische und experimentelle Studien zur Untersuchung der Strömungsvorgänge bei der Be- und Entladung von Warmwasserspeichern mit Radialdiffusoren. Im Mittelpunkt der Betrachtung stand dabei insbesondere die Wirkung auf die Schichtungsqualität und damit auf die internen Verluste des Speichers. Für die Simulationen fanden Berechnungen an 2D- und 3D-Modellen mit der CFD-Software ANSYS CFX statt und für die Experimente wurden Tests im Labor durchgeführt.

Die Simulationsrechnungen konnten verschiedene Strömungsphänomene sichtbar machen. So zeigte eine LES-Rechnung die detaillierte Ausbildung der Dichteströmung entlang der Speicherdecke sowie den weiteren Schichtungs Aufbau. Besonders aufschlussreich waren die 3D-Rechnungen des gesamten Beladesystems. Durch einen großzügig gestalteten Übergangsbereich, bspw. mit großem Radius zwischen Anschlussleitung und Radialdiffusor, kann ein stark asymmetrisches und einseitig gerichtetes Ausströmen auftreten. Ausgeprägte Mischefekte entlang des entstehenden Hauptstrahls reduzieren die Schichtungsqualität. Ein derartiger Übergangsbereich ist bei Betrieb mit Beladetemperaturen bis 98 °C allerdings notwendig, da sonst bei Entladung des Speichers innerhalb des Beladers eine Unterschreitung des Dampfdruckes droht. Der damit einhergehende Strömungsabriss kann zu einem Ausfall der Anlage führen. Durch den entworfenen Freiformbelader wird dieses Risiko minimiert. Zur Vermeidung des einseitigen Ausströmens sind Leit- und Lochbleche im Belader vorzusehen. Wie die Laborexperimente zeigten, können günstig positionierte Lochbleche [67] die Ausströmung über dem Radialdiffusorumfang gleichmäßiger machen und das dreidimensionale Mischungsverhalten signifikant verbessern. Die Untersuchungen verdeutlichten weiterhin, dass unterschiedlich gestaltete Radialdiffusoren, bspw. mit variierten Spalthöhen, horizontalen Leitblechen oder anderen Einbauten, im Rahmen der Geometrievariation mit einem vereinfachten rotationssymmetrischen 2D-Simulationsmodell keinen signifikanten Vorteil im Beladeverhalten gegenüber einem geometrisch einfacheren Referenzbelader besitzen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen fließen direkt in die Entwicklung des Demonstrators ein. So findet dort die erste Variante eines Freiformbeladers zur Verbesserung des Entladeverhaltens Einsatz. Außerdem konnten die Simulationsrechnungen nachweisen, dass sich die Montage des Beladers an der Schwimmdecke sehr positiv auf die Schichtungsqualität auswirkt.

5 Beladung mit einem Schichtenlader³⁹

Schichtenlader sind Beladesysteme mit variabler Beladehöhe und daher besonders geeignet für solarthermische Anwendungen mit schwankenden Beladetemperaturen. Einschränkungen existieren bei den Beladevolumenströmen und bedienbaren Speichergrößen. Schichtenlader besitzen im Wesentlichen zwei Aufgaben:

- Schichtungsaufbau: Beladung mit warmen Fluid in einem „kalten“ Speicher;
- Schichtungserhalt: Einschichtung von Fluid mit geringerer Temperatur als der maximalen Speichertemperatur in eine bestehende Schichtung.

Die Einschichtung des Beladefluids erfolgt über verschiedene Öffnungen des Schichtenladers ohne zusätzliche Steuerungs- und Regelungsmechanismen, allein aufgrund der vorherrschenden Dichteverteilung im Speicher (passives Wirkprinzip). Hierzu ist eine auf den Speicher und die vorgesehenen Betriebsbedingungen abgestimmte Auslegung erforderlich.

Der hier untersuchte Schichtenlader (Abbildung 103) ist gekennzeichnet durch eine oben angebrachte Anschlussleitung, fünf über der Höhe verteilte Auslassrohre mit variierenden Schenkellängen sowie der besonderen Form der Auslassrohre [71], [72]. Der Schichtenlader ist im Simulationsmodell in der Mitte des Speichers positioniert. Die zur Simulation verwendeten physikalischen Modelle sind identisch mit den Modellen der radialen Beladeeinrichtung aus Abschnitt 4.1. Das Simulationsmodell ist symmetrisch aufgebaut.

Für den Demonstrator lässt sich nach den Auslegungsrichtlinien aus [73] ein Schichtenlader dimensionieren. Die Richtlinien sind für Speicher bis zu einer Höhe von 5 m anwendbar und beziehen Speicherhöhe, Beladevolumenstrom und Temperaturdifferenz in die Dimensionierung ein. Die Auslegung ist für jeden Speicher individuell durchzuführen. Für den Demonstrator gilt bspw. ein Beladevolumenstrom von $1 \text{ m}^3/\text{h}$ und eine Temperaturdifferenz von $\Delta T = 30 \text{ K}$ bzw. 20 K bzgl. einer Speichertemperatur von 40 °C (Tabelle 23). Der Schichtenlader ist in Abbildung 103 dargestellt und die zugehörigen Maße sind in Tabelle 24 aufgeführt.

Tabelle 23: Betriebsbedingungen für den Low-Flow-Schichtenlader (entsprechender Auslegungspunkt des Demonstrators für den Einsatz als Langzeitspeicher)

\dot{V}_{ein}	$1 \text{ m}^3/\text{h}$
T_{ein}	$70/60 \text{ °C}$
T_{Sp}	40 °C

³⁹ Autoren des Abschnittes: Fabian Findeisen, Thorsten Urbaneck.

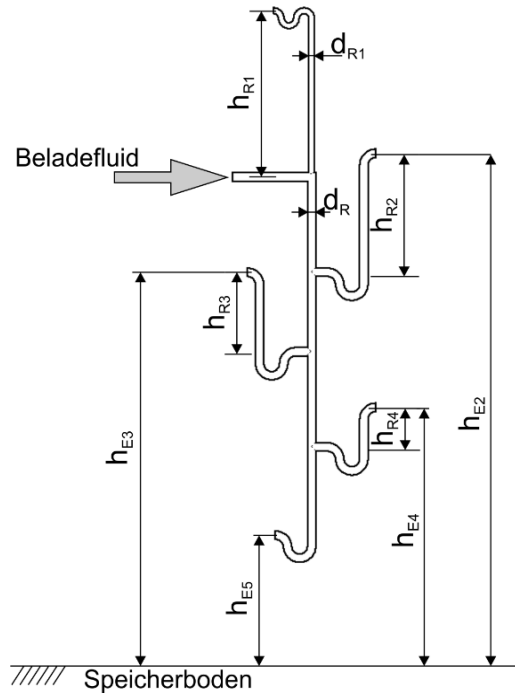


Abbildung 103: Schematische Darstellung des Schichtenladers mit charakteristischen Maßen

Tabelle 24: Charakteristische Maße des Schichtenladers SL_1

d_{R1}	DN32	d_R	DN50
h_{R1}	1,00 m	h_{E1}	4,75 m
h_{R2}	0,75 m	h_{E2}	3,9 m
h_{R3}	0,50 m	h_{E3}	3,1 m
h_{R4}	0,25 m	h_{E4}	2,3 m
h_{R5}	0,00 m	h_{E5}	1,5 m

5.1.1 Temperaturvarianten

Die vorliegenden Strömungseffekte werden nachfolgend in Nah- und Ferneffekte unterteilt. Alle Effekte im Belader sowie dessen näherer Umgebung sind Naheffekte. Vorgänge außerhalb der Beladeinheit heißen Ferneffekte. Der reale Speicher findet Einsatz als Langzeitspeicher mit Beladezyklen von mehreren Tagen bis Wochen. Solche Zyklen sind auf Grund des enormen Rechenaufwandes nicht simulierbar, weshalb die Strömung innerhalb des Beladers anhand von Kurzzeittests bewertet wird [71], [74]. Hierzu erfolgt die Vorgabe einer bestehenden Schichtung durch ein definiertes Temperaturprofil. Das Verhalten des Beladefluids im Nah- und Fernbereich dient dann zur Bewertung des Beladeverhaltens. Die Temperaturvarianten sind in Tabelle 25 dargestellt. Als Sollauslassesebenen werden die horizontalen Ebenen in Höhe der Auslässe bezeichnet, die sich auf einer für die Beladung oder Einschichtung günstigen Höhe befinden.

Die Sprungfunktion berechnet sich mit

$$T_{Sp}(y) = T_{Sp,min} + \frac{T_{Sp,max} - T_{Sp,min}}{2} (1 + \tanh\{C(y - y_s)\}). \quad (15)$$

Der Parameter C beschreibt die Breite der Übergangsschicht und wird mit 10 angenommen.

Tabelle 25: Temperaturvarianten für die Kurzzeittests des Schichtenladern

Bezeichnung	Art	$T_{Sp,max}$ [°C]	$T_{Sp,min}$ [°C]	T_{ein} [°C]	Lage der thermischen Übergangsschicht	Sollauslass-ebene
TV1	konstant	40	40	70	-	1
TV2	konstant	40	40	60	-	1
TV3	Sprungfunktion	70	40	70	$y_s = 3,75$ m	1, 2
TV4	Sprungfunktion	60	40	60	$y_s = 3,75$ m	1, 2
TV5	Sprungfunktion	70	40	70	$y_s = 2,5$ m	1, 2, 3
TV6	Sprungfunktion	60	40	60	$y_s = 2,5$ m	1, 2, 3
TV7	Sprungfunktion	70	40	70	$y_s = 1,25$ m	1, 2, 3, 4
TV8	Sprungfunktion	60	40	60	$y_s = 1,25$ m	1, 2, 3, 4

5.1.2 Bewertungskriterien

Bei der Beladung thermischer Speicher mit Hilfe von Schichtenladern kommt es sowohl im Nahbereich, als auch innerhalb des Beladers zu Mischungseffekten. Wird ein Speicher mit wärmeren Fluid beladen, so strömt dieses idealerweise über die Auslassebenen oberhalb der Übergangsschicht in den Speicher. Ist das Auslassrohr nicht vollständig mit heißem Fluid gefüllt, bildet sich innerhalb des Schichtenladern eine freie Scherschicht zwischen kalten und heißen Fluid aus, wodurch Fluid mitgerissen wird. Diese Effekte lassen sich qualitativ als sog. Ansaugeffekte klassifizieren (Abbildung 104) [71], [74]. Das Mitreißen von kaltem Fluid in das Auslassrohr ist auch als Ansaugeffekt 1 bekannt. Als Ansaugeffekt 2 wird bei einer Einschichtung in eine bestehende Schichtung mit heißerem Fluid, das Mitziehen von Speicherfluid aus höheren Schichten in den Belader hinein bezeichnet.

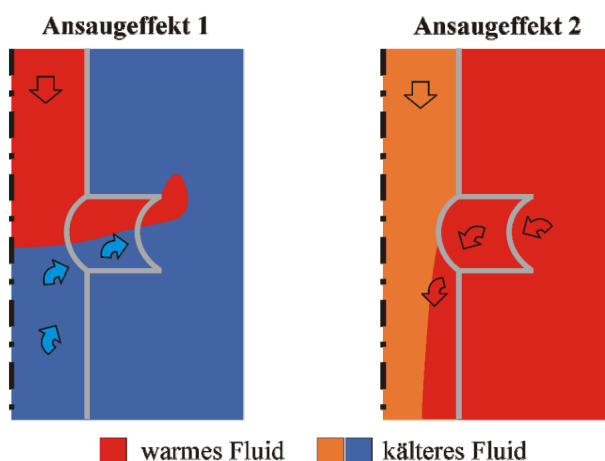


Abbildung 104: Skizze der zwei dominanten Ansaugeffekte innerhalb von Schichtenladern [74]

Quantitativ lassen sich Effekte im Belader über eine Bilanzierung der Massenströme oder über ein Ansaug- bzw. Ausströmverhältnis bewerten. Nach [74] wird das Ansaugverhältnis aus dem angesaugten Massenstrom und dem Belademassenstrom gebildet. Dabei kann unterschieden werden, ob die Ansaugung bedingt durch den Ansaugeffekt 1 (ϕ_1) oder 2 (ϕ_2) auftritt.

Es gilt:

$$\phi_{\text{ges}} = \phi_1 + \phi_2 = \sum_{i=1}^n \phi_{\text{Ans},i} \quad \text{mit} \quad \phi_{\text{Ans},i} = \begin{cases} \frac{\dot{m}_i}{\dot{m}_{\text{ges}}} & \dot{m}_i < 0 \\ 0 & \dot{m}_i \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

Die Zuordnung der Anteile ϕ_1 und ϕ_2 erfolgt dabei je nach Belader und Beladesituation.

Außerhalb des Beladers kann die Schichtungsqualität über einen Gütegrad verglichen werden. Der Gütegrad η_G ist ein Maß für die inneren Verluste während der Beladung und beschreibt die Abweichung vom in der Simulation berechneten Ergebnis zum theoretischen Idealfall. Basierend auf dem Temperaturverlauf über der Speicherhöhe wird hierzu im Diagramm die integrale Fläche beider Temperaturprofile berechnet. Die Differenz ist gleich der Abweichung zwischen Simulation und Idealwert und somit ein Maß für die Vermischung.

$$\eta_G = 1 - \frac{\int T_{\text{Ideal}}(h)dh - \int T_{\text{Simulation}}(h)dh}{\int T_{\text{Ideal}}(h)dh} \quad (17)$$

Ein Gütegrad von 1 entspricht somit dem idealen Temperaturprofil, 0 ist dementsprechend gleich der größtmöglichen Abweichung hierzu.

5.1.3 Beladung

In Abbildung 105 ist das Temperaturfeld für die Temperaturvarianten mit $\Delta T = 30$ K dargestellt. Bei TV1 (Beladung) entsteht eine freie Scherschicht im Bereich Übergang der Anschlussleitung in das oberste Auslassrohr. Es wird jedoch kein kaltes Fluid mitgerissen, sodass die Temperatur im Auslassrohr nicht abfällt. Im Fall von TV3 befindet sich die Übergangsschicht knapp unter der Auslassebene 2. Am Übergang zum Auslassrohr 2 wird kaltes Fluid mitgerissen (Ansaugeneffekt 1), wodurch die Temperatur des Beladefluids unter die Temperatur des Speicherfluids in der Auslassebene abfällt. Nach Verlassen der Auslassöffnung sinkt das Fluid in die entsprechende Schicht mit gleicher Temperatur ab. Bei TV5 und TV7 existieren keine Ansaugeneffekte. Die Beladung erfolgt hier über die vorgesehenen Sollauslassebenen. Das Temperaturfeld für $\Delta T = 20$ K (TV2, TV4, TV6 und TV8) verhält sich identisch.

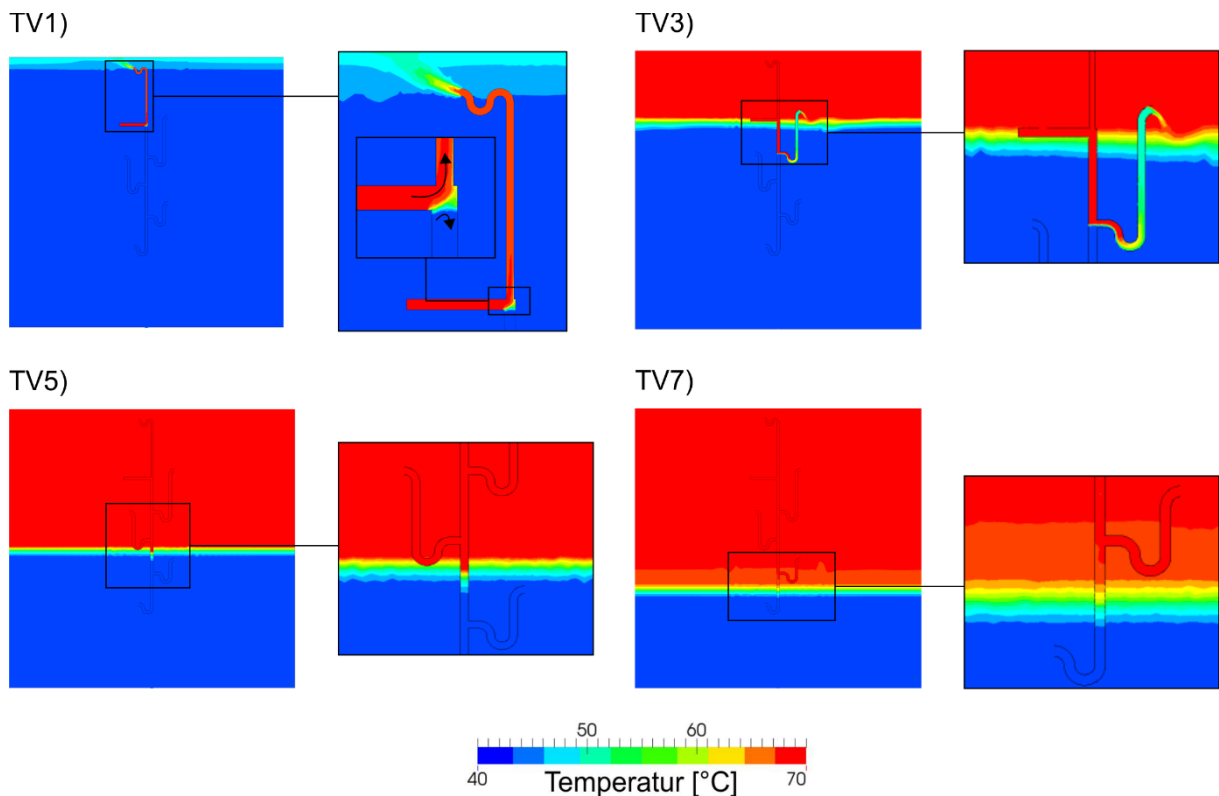


Abbildung 105: Temperaturfeld in der Symmetrieebene des Schichtenladens SL_{1a} ($\Delta T = 30 \text{ K}$) bei verschiedenen Temperaturvarianten

Für die verschiedenen Temperaturvarianten ist in Abbildung 106 der Gütegrad, in Tabelle 26 der Mischvolumenanteil und in Abbildung 107 das Ausströmverhalten dargestellt.

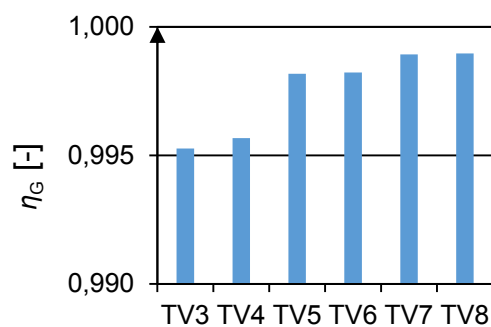


Abbildung 106: Ergebnis des Gütegrads für die Temperaturprofile TV3 bis TV8

Für die Temperaturvarianten TV1 und TV2 wird kein Gütegrad angegeben, da sich in der Anfangsphase der Beladung noch keine Übergangsschicht ausbilden konnte. Bei Varianten mit gleicher Lage der Übergangsschicht und unterschiedlicher Temperaturdifferenz unterscheidet sich der Gütegrad nicht (TV5 und TV6 bzw. TV7 und TV8) bzw. nur sehr gering (TV3 und TV4). Mit fortschreitender Beladung des Speichers (Verschiebung der Übergangsschicht) nimmt der Gütegrad im Allgemeinen zu (z.B. TV3, TV5, TV7).

Tabelle 26: Resultierender Mischvolumenanteil bei verschiedenen Temperaturprofilen

	TV1	TV2	TV3	TV4	TV5	TV6	TV7	TV8
ϕ_{ges}	0,02	0,02	0,05	0,16	-	-	-	-

Der Mischvolumenanteil bei TV1 und TV2 beträgt 0,02. Bei TV3 und TV4 ist er mit 0,05 bzw. 0,16 höher und geht für die restlichen Varianten gegen Null.

Das Ausströmverhältnis von TV1 und TV2 zeigt, dass das heiße Fluid fast vollständig über die oberste Auslassebene in den Speicher gelangt. Ein sehr geringer Anteil strömt jedoch über die Auslassebenen 2 und 3 (TV1) bzw. 2, 3, 4 und 5 (TV2) in den Speicher. Dieser Anteil entspricht dem Mischvolumenanteil von ca. 0,02, d. h. ca. 2 % des Beladestroms verlässt den Schichtenlader nicht über die Sollauslassebene. Für die Variante TV3 und TV4 ergibt sich der niedrigste Gütegrad im Vergleich. Wie die qualitative Betrachtung zeigte (TV3 in Abbildung 107), liegt am Einlass des Auslassrohres 2 der Ansaugeffekt 1 vor, was sich quantitativ in dem Mischvolumenanteil von 0,05 bzw. 0,16 äußert. Bei einer niedrigen Temperaturdifferenz (TV4) ist der Ansaugeffekt sehr viel stärker ausgeprägt, sodass kaltes Fluid zu einem vergleichsweise großen Teil aus den Auslassebenen 3 und 4 angesaugt wird. Für die Varianten TV7 und TV8 ergibt sich der höchste Gütegrad, die Beladung erfolgt ausschließlich über die vorgesehenen Sollauslassebenen und der Mischvolumenanteil ist gleich Null.

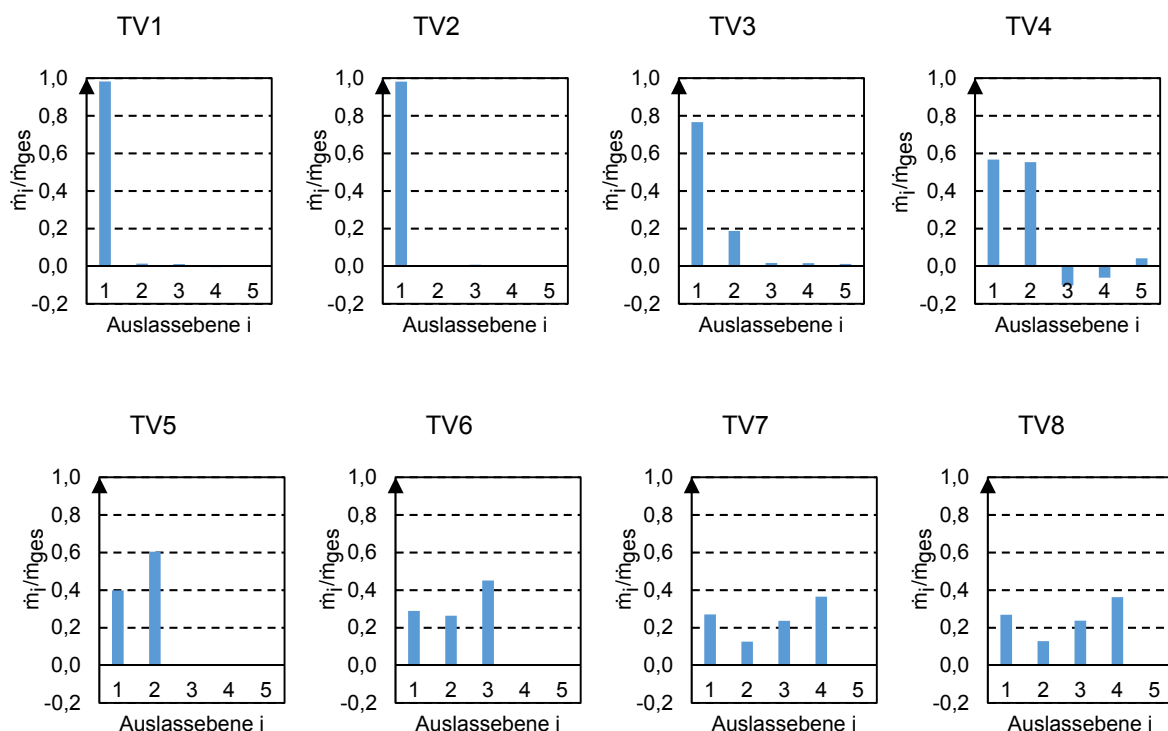


Abbildung 107: Ausströmverhalten in verschiedenen Auslassebenen für die Temperaturvarianten TV1 bis TV8

Der Unterschied zwischen den Varianten mit gleicher Lage der Übergangsschicht, jedoch verschiedener Temperaturdifferenz folgt aus der geänderten Dichtedifferenz und den unterschiedlichen Auftriebskräften. Daher übersteigt das Auftriebsvermögen bei Varianten mit $\Delta T = 30\text{ K}$ die Auftriebskräfte bei $\Delta T = 20\text{ K}$. Deswegen ist das Fluid bei höheren Dichtedifferenzen auch eher bestrebt, durch die oberen Auslassebenen in den Speicher zu gelangen.

In den Simulationen zum Beladeverhalten des Schichtenladers zeigte sich die Eignung des Beladers für einen Beladevolumenstrom von 1 m³/h sowie für die Temperaturdifferenzen 20 K und 30 K. Die Beladung erfolgt fast vollständig über die vorgesehenen Sollauslassebenen. Nur wenn sich die Übergangsschicht auf Höhe bzw. knapp unter der Auslassebene befindet sowie in der Anfangsphase der Beladung, tritt der Ansaugeffekt 1 auf.

5.1.4 Einschichtung

Die für die Einschichtung untersuchten Temperaturvarianten sind in Tabelle 27 aufgeführt.

Tabelle 27: Übersicht der Temperaturvarianten

Bezeichnung	Art	$T_{Sp,max}$ [°C]	$T_{Sp,min}$ [°C]	T_{Ein} [°C]	Lage der thermischen Übergangsschicht	Sollauslassebene
TV9	Sprungfunktion	70	40	55	$y_s=3,75$ m	2
TV10	Sprungfunktion	60	40	50	$y_s=3,75$ m	2
TV11	Sprungfunktion	70	40	55	$y_s=2,50$ m	4
TV12	Sprungfunktion	60	40	50	$y_s=2,50$ m	4
TV13	Sprungfunktion	70	40	55	$y_s=1,25$ m	5
TV14	Sprungfunktion	60	40	50	$y_s=1,25$ m	5

Abbildung 108 zeigt das Temperaturfeld bei der Einschichtung in eine bestehende Schichtung, wobei das Beladefluid eine Temperatur von 50 °C hat und die maximale Temperatur im Speicher 60 °C beträgt. Bei allen Temperaturvarianten ist zu erkennen, dass der größte Teil des Beladefluids aus der Auslassebene austritt, die sich am nächsten an der Übergangsschicht befindet. Innerhalb des Beladesystems bilden sich zwei Übergangsschichten aus (z. B. TV10). Eine Übergangsschicht befindet sich begrenzend zum kalten Fluid im unteren Bereich und eine Zweite im oberen Bereich zum warmen Fluid. TV12 zeigt, wie das Beladefluid mittlerer Temperatur aus den ober- und unterhalb der Übergangsschicht befindlichen Auslassebenen in Richtung der Übergangsschicht strömt, während sich in dem Auslassrohr darüber eine weitere Übergangsschicht ausbildet, die ein Ansaugen von heißem Fluid verhindert. In TV14 befindet sich die Übergangsschicht schließlich unterhalb des untersten Auslasses, sodass ein Großteil des Beladefluids über diesen ausströmt. Jedoch tritt am Übergang der Anschlussleitung zum Hauptrohr der Ansaugeffekt 1 und am Übergang Hauptrohr zu Auslassrohr 1 der Ansaugeffekt 2 auf, sodass die Temperatur des Beladefluids bis zum Erreichen des Auslasses um ca. 5 K zunimmt.

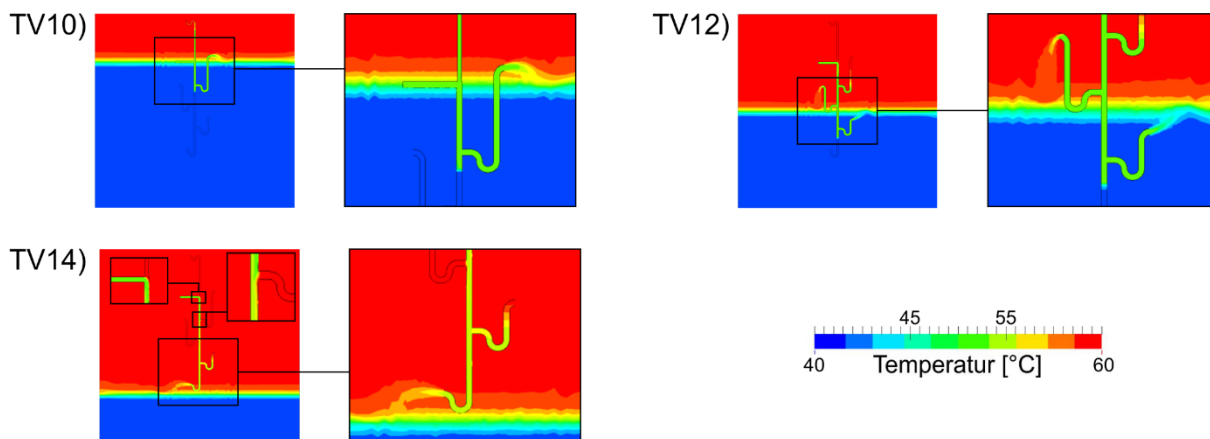


Abbildung 108: Temperaturfeld bei der Einschichtung für verschiedene Temperaturvarianten

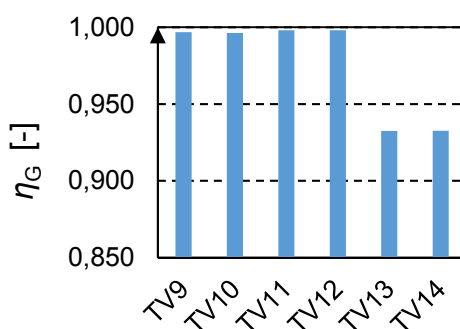


Abbildung 109: Gütegrad für die Temperaturvarianten TV9 bis TV14

Der Gütegrad (Abbildung 109) beträgt bei den Temperaturvarianten TV9 bis TV12 ca. 0,96 und nimmt bei den Varianten TV 13 und TV14 auf ca. 0,93 ab. Tabelle 26 zeigt den Mischvolumenanteil. Während dieser bei TV9 und TV10 mit 0,01 gering ist, steigt er bei TV11 auf 0,17 und bei TV12 auf 0,10 an und erreicht bei TV13 schließlich 0,56 bzw. 0,43 bei TV14.

Tabelle 28: Resultierender Mischvolumenanteil bei verschiedenen Temperaturprofilen

	TV9	TV10	TV11	TV12	TV13	TV14
ϕ_{ges}	0,01	0,01	0,17	0,10	0,56	0,43

In Abbildung 110 ist das Ausströmverhalten für verschiedene Temperaturvarianten dargestellt. Bei TV9 und TV10 strömt das Beladefluid fast vollständig über die Auslassebene 2 aus. Dadurch ist der Mischvolumenanteil für diese Varianten gering und der Gütegrad hoch. Für TV11 und TV12 teilt sich die Strömung auf die Auslassebenen 3 und 4 auf, während über die Auslassebene 1 heißes Fluid aus dem Speicher angesaugt wird. Es steigt der Mischvolumenanteil für diese Varianten an, wobei der Ansaugeneffekt im Fall von TV11 stärker ausgeprägt ist. Der Gütegrad der Schichtung nimmt hierbei nicht ab, vermutlich da beide Auslassebenen nicht im Bereich der Übergangsschicht liegen und das Beladefluid somit direkt nach Ausströmen in den Speicher die Temperatur des umgebenden Speicherfluids annimmt und dadurch nicht zu einem Wachstum der Übergangsschicht beiträgt. Im Fall von TV13 und TV14 erfolgt die Ansaugung von heißem Speicherfluid über die Ebenen 1 bis 3. Die Ausströmung findet vollständig über die Auslassebene 5 statt. Einhergehend steigt der Mischvolumenanteil an und der Gütegrad für diese Varianten sinkt ab.

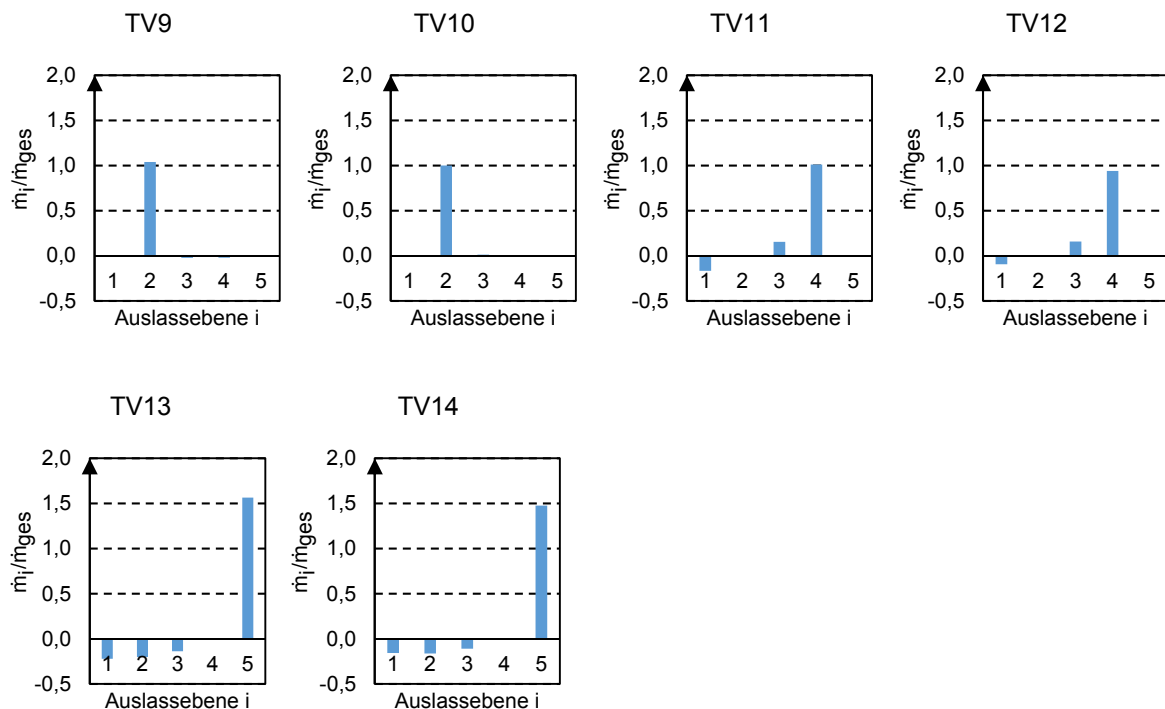


Abbildung 110: Ausströmverhalten für die Temperaturvarianten TV9 bis TV14

5.1.5 Erweiterung auf große Speicherhöhen

Die im vorherigen Abschnitt durchgeführte Auslegung für Schichtenlader orientierte sich an einer maximalen Speicherhöhe von ungefähr 6 m. Der Schichtenlader im Demonstrator, nachfolgend als SL_1 bezeichnet, wurde für eine Speicherhöhe von ca. 5 m konzipiert. Für die nachfolgende Untersuchung wird nun eine Speicherhöhe von 10 m angenommen. Ziel des Abschnittes ist es, die Eignung der Auslegungsrichtlinien nach [73] für eine derartige Speicherhöhe zu überprüfen sowie mögliche Alternativen basierend auf einfachen konstruktiven Anpassungen zu untersuchen.

In einem ersten Schritt erfolgt zunächst die Simulation des Schichtenladers SL_1 mit einer hydrostatischen Druckbeaufschlagung entsprechend einer darüber befindlichen Wassersäule von ca. 5 m. Dies soll die grundsätzliche Eignung des Schichtenladers für Druckverhältnisse zeigen, wie sie in höheren Speichern infolge einer größeren hydrostatischen Druckauflastung herrschen können. Die Simulationen zeigen dabei ein identisches Resultat wie im vorhergehenden Abschnitt. Demnach spielt die Höhe der Wassersäule über dem Schichtenlader keine Rolle und die Eignung von SL_1 unter derartigen Druckverhältnissen ist gegeben. Entscheidend für eine optimale Einschichtung mit minimalen Ansaugeffekten ist vielmehr, dass über der jeweiligen Auslassebenen günstige Druckverhältnisse herrschen. Nach [74] sollte der Druckverlust der Auslassstutzen folgende Bedingung erfüllen.

$$\Delta p \leq g (\rho_{\text{ein}} - \rho_{\text{Sp,min}}) \Delta h_E \quad (17)$$

Für die Auslegung eines Schichtenladers für große Speicher bedeutet dies: Der Schichtenlader kann über zusätzliche Auslässe verfügen und eine größere Speicherhöhe abdecken, jedoch sind die Druckverluste in den Auslässen und der vertikale Abstand zwischen den Auslassebenen (Δh_E) anzupassen.

Eine andere Möglichkeit stellt die Kombination mehrerer Schichtenlader des Typs SL_1 dar. Für die Speicherhöhe von 10 m können zwei Belader des Typs SL_1 kombiniert werden (kommunizierender Doppellader), wobei eine vorgeschaltete Verteilstrecke notwendig ist.

Die Untersuchung umfasst drei Ansätze (Abbildung 111):

- SL_2a: Anpassung von SL_1 an eine Speicherhöhe von 10 m basierend auf den Auslegungsvorschriften nach [73].
- SL_2b: Einsatz von SL_1 als kommunizierender Doppellader mit gemeinsamer Zuleitung von der Seite (horizontaler Verteiler).
- SL_2c: Wie SL_2b, jedoch mit Zuleitung von oben (vertikaler Verteiler).

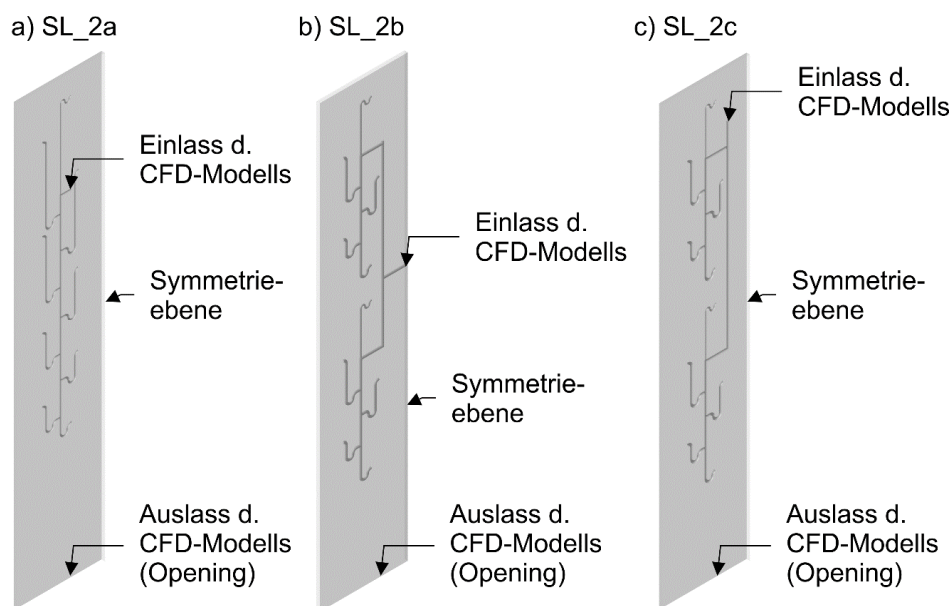


Abbildung 111: Darstellung der Simulationsmodelle

Die vorangegangenen Simulationen des Schichtenladers SL_1 zeigten, dass die Beladung mit Warmwasser (Temperatur des Beladefluids entspricht der Speichertemperatur) i. d. R. unkritisch ist, während die Einschichtung (Temperatur des Beladefluids niedriger als die maximale Speichertemperatur) den anspruchsvolleren Anwendungsfall darstellt. Da nachfolgend mehrere Geometrien betrachtet werden, beschränken sich die Untersuchungen auf den Fall der Einschichtung, um den Simulationsaufwand zu verringern. Außerdem wird nur die Temperaturdifferenz von 30 K betrachtet (zuvor: 30 K und 20 K). Tabelle 29 zeigt die untersuchten Temperaturvarianten.

Tabelle 29: Übersicht der untersuchten Temperaturvarianten für jeden Schichtenladertyp

Bezeichnung	Art	$T_{Sp,max}$ [°C]	$T_{Sp,min}$ [°C]	T_{Ein} [°C]	Lage der thermischen Übergangsschicht
TV9	Sprungfunktion	70	40	55	$y_s=3/4 h_{Sp}$
TV11	Sprungfunktion	70	40	55	$y_s=1/2 h_{Sp}$
TV13	Sprungfunktion	70	40	55	$y_s=1/4 h_{Sp}$

Abbildung 112 bis Abbildung 114 zeigen die Temperaturfelder bei der Einschichtung in eine bestehende Schichtung. Bei allen Geometrie- und Temperaturvarianten ist zu erkennen, dass der größte Teil des Beladefluids aus der Auslassebene austritt, die sich am nächsten an der Übergangsschicht befindet. Alle Schichtenlader erfüllen somit die minimale Funktionsanforderung. Unterschiede existieren in der Ausprägung der Ansaugeffekte innerhalb des Beladesystems.

Bei SL_2a findet sich der Ansaugeffekt 1 am Übergang der Anschlussleitung zum Hauptrohr und der Ansaugeffekt 2 am Übergang des Hauptrohrs zu den Auslassrohren. Dies führt bei TV13 zu einer Temperaturerhöhung des Beladefluids innerhalb des Schichtenladers von bis zu 5 K. Bei SL_2b und SL_2c tritt der Ansaugeffekt 1 zusätzlich im Verteilerstück vor den Schichtenladern auf. Während im Fall von SL_2b bei TV9 und TV11 kaum eine Erwärmung des Beladefluids stattfindet, ist bei TV13 eine Temperaturerhöhung um ca. 5 K vorzufinden. Im Fall von SL_2c und TV9 bzw. TV11 tritt ebenfalls kaum eine Temperaturerhöhung durch den Verteiler ein, während bei TV13 ein starkes Mitreißen von wärmeren Fluid stattfindet und sich das Beladefluid um bis zu 10 K erwärmt. Bei SL_2c TV11 geschieht dieses Mitreißen erst innerhalb des oberen Schichtenladers. Dies konnte bei den Simulationen zu SL_1 nicht beobachtet werden und ist vermutlich auf eine geringere Eintrittsgeschwindigkeit des Fluids in das Hauptrohr oder einen induzierten Drall zurückzuführen, welcher aus der Strömungsaufteilung resultiert.

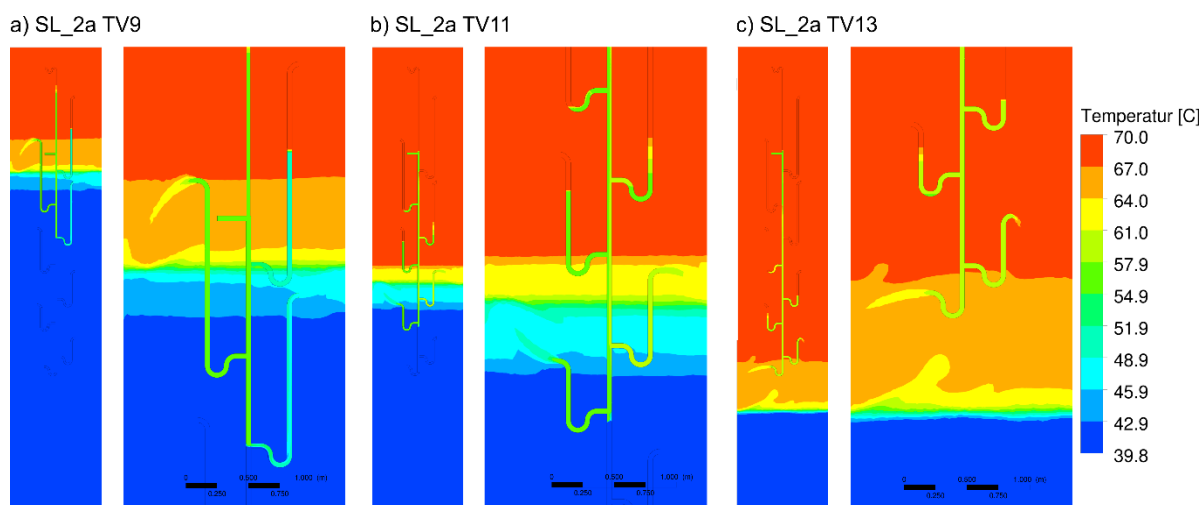


Abbildung 112: Einschichtung mit SL_2a - Temperaturfelder für verschiedene Temperaturverläufe in der Symmetrieebene und Detaildarstellungen

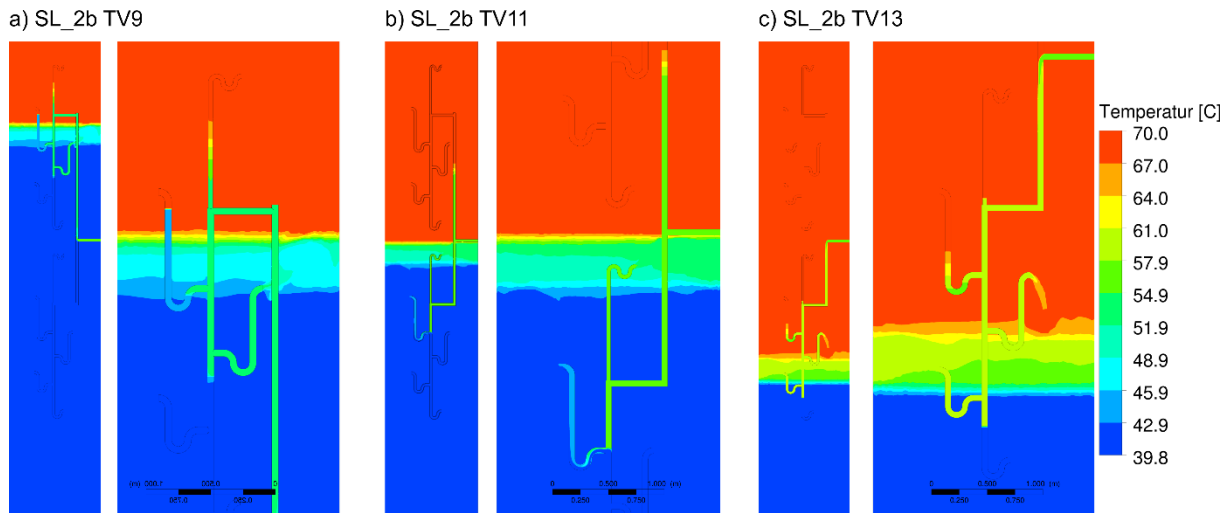


Abbildung 113: Einschichtung mit SL_2b (horizontale Verteilung) - Temperaturfelder für verschiedene Temperaturverläufe in der Symmetrieebene und Detaildarstellungen

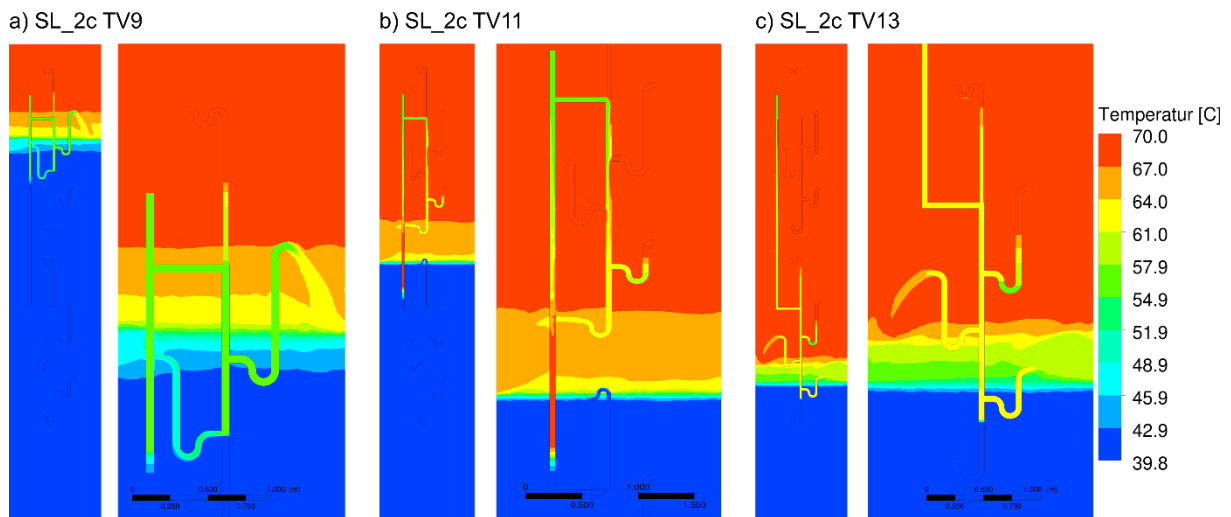


Abbildung 114: Einschichtung mit SL_2b (vertikale Verteilung) - Temperaturfelder für verschiedene Temperaturverläufe in der Symmetrieebene und Detaildarstellungen Abbildung 115 bis Abbildung 117 zeigen das Ausströmverhalten im Vergleich mit SL_1.

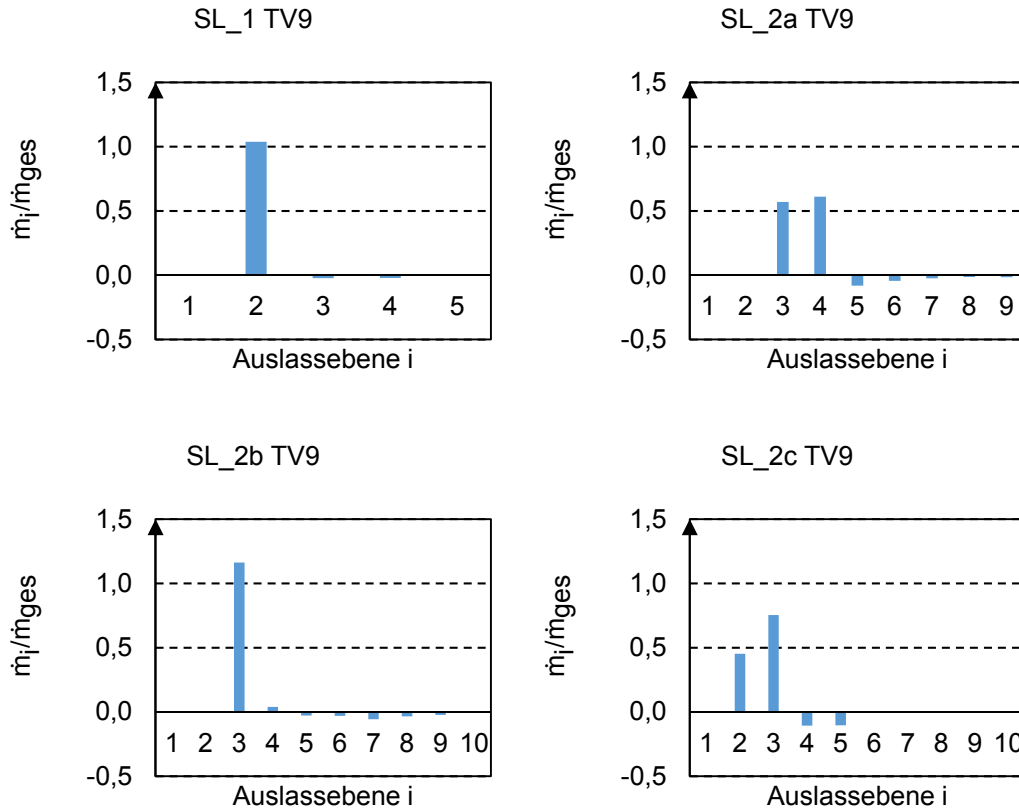


Abbildung 115: Vergleich des Ausströmverhaltens am Beispiel von TV9

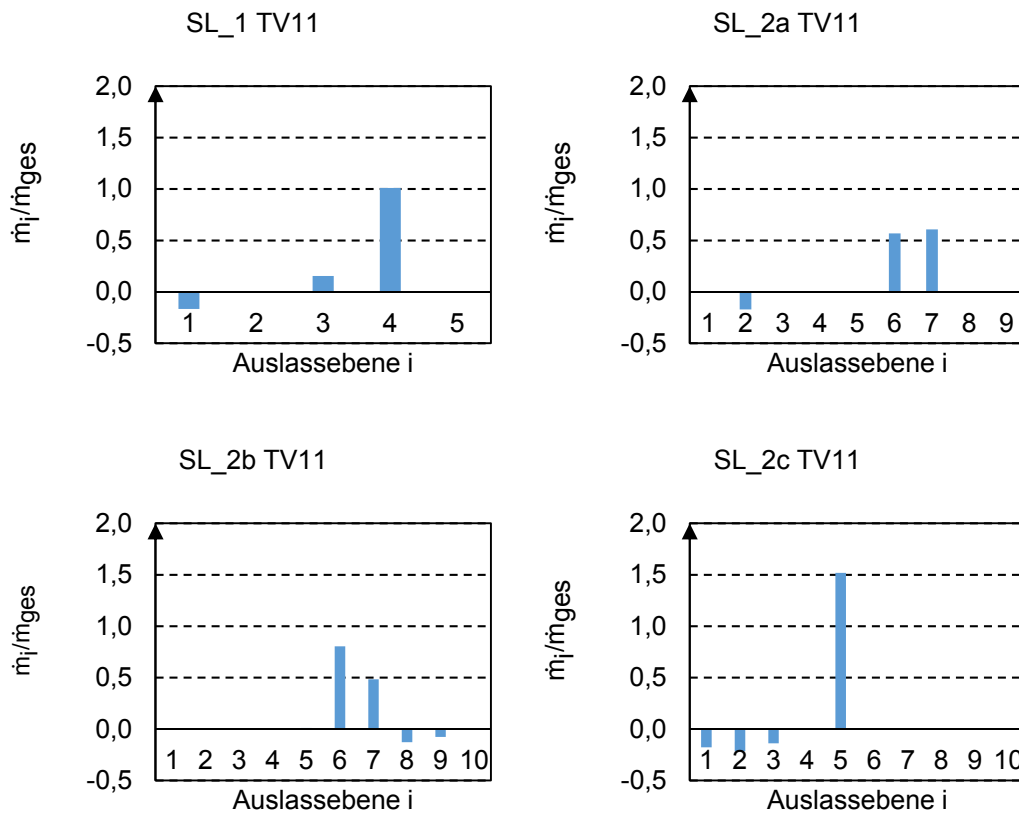


Abbildung 116: Vergleich des Ausströmverhaltens am Beispiel von TV11

Wie in der qualitativen Darstellung bereits erkennbar, erfolgt das Ausströmen bei allen Varianten über die Auslässe in Nähe der Übergangsschicht. Unterschiede sind im Ansaugverhalten (negative Balken im Diagramm) erkennbar. Bei TV9 saugt SL_2c vergleichsweise viel über die Auslässe 4 und 5 an. SL_2a und SL_2b saugen dagegen etwas mehr über die übrigen Auslässe an, was auch bei SL_1 zu beobachten ist.

Im Fall von TV11 findet bei allen Typen über die oberen Auslässe ein Ansaugen statt. Am stärksten und über die meisten Auslässe verteilt, ist dieses Verhalten bei SL_2c ausgeprägt. Bei SL_2a liegt die Ausprägung deutlich weniger ausgeprägt vor und bei SL_2b ist sie nur sehr gering, wobei hier über die unteren Auslässe mehr angesaugt wird. Für TV11 liefern SL_2a und SL_2b gute Ergebnisse.

Im Fall von TV13 lassen sich wieder große Ähnlichkeiten zwischen den Ergebnissen feststellen. SL_2b saugt etwas weniger als SL_2a an, dafür über mehrere Auslässe verteilt, während bei SL_2c die Ansaugung am stärksten ist.

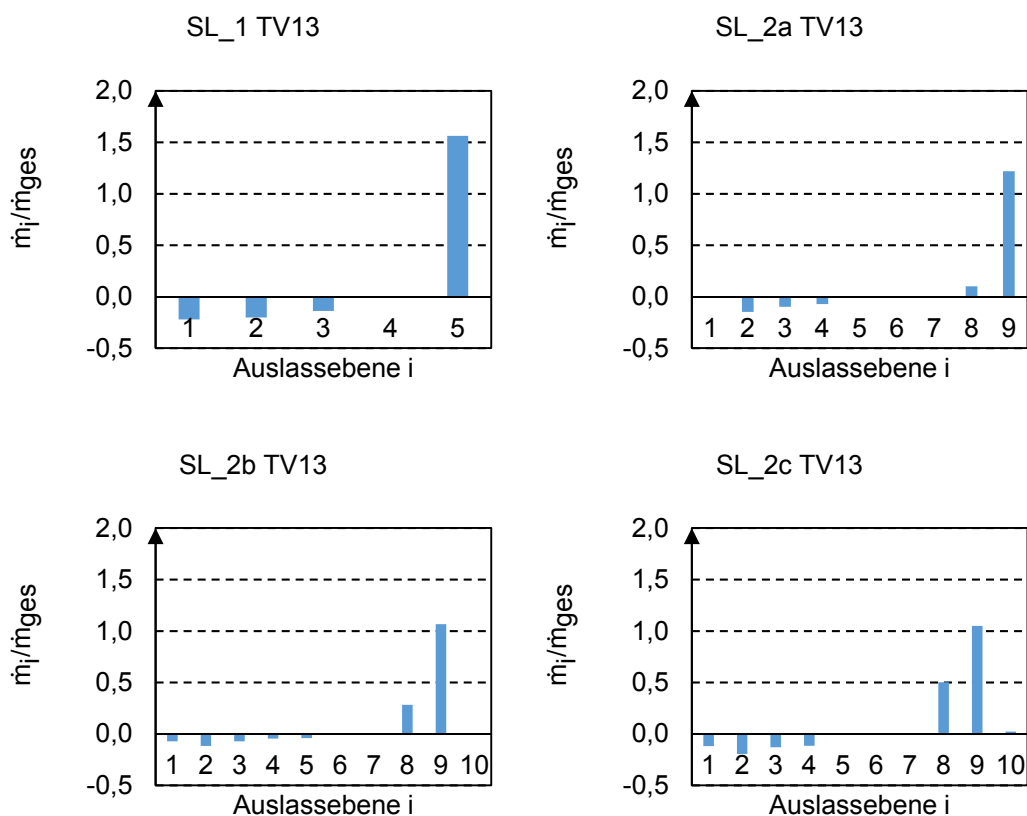


Abbildung 117: Vergleich des Ausströmverhaltens am Beispiel von TV13

Tabelle 30 zeigt den basierend auf der Temperaturschichtung nach 300 s ermittelten Gütegrad. Dieser ist bei den neuen Varianten geringer als bei SL_1. Durch die erhöhte Anzahl an Auslässen findet demnach grundsätzlich mehr Ansaugung statt, wodurch der Gütegrad insgesamt abnimmt. Die Tendenz, dass der Gütegrad bei TV11 am höchsten und bei TV13 am niedrigsten ist, lässt sich bei allen Varianten feststellen.

Die Ergebnisse des Gütegrads zeigen weiterhin, dass SL_2a bei den Temperaturvarianten TV9 und TV11 am besten abschneidet, bei TV13 allerdings ein schlechteres Ergebnis liefert. SL_2c und SL_2b unterscheiden sich nur geringfügig, wobei SL_2c etwas besser ist. Überraschenderweise liefert SL_2c bei TV13 den höchsten Gütegrad, zeigt jedoch laut

Ansaugverhalten dort das schlechteste Verhalten. Das Ansaugen von wärmeren Speicherfluid aus den oberen Schichten findet prinzipiell bei allen untersuchten Typen statt, bei SL_2c ist es allerdings am stärksten ausgeprägt. Hier begünstigt dieses Verhalten offenbar einen positiven Gütegrad. Dieser unerwünschte Effekt repräsentiert nicht das angestrebte Beladeverhalten, weswegen der Gütegrad an dieser Stelle nur eingeschränkt zur Bewertung herangezogen werden kann. Daher ist anzunehmen, dass SL_2a bei TV13 trotzdem ein gutes Ergebnis liefert, weil es weniger Speicherfluid aus oberen Schichten ansaugt als SL_2c.

Tabelle 30: Vergleich des Gütegrads η_c für die verschiedenen Schichtenladervarianten

	SL_1	SL_2a	SL_2b	SL_2c
TV9	0,997	0,937	0,760	0,777
TV11	0,998	0,969	0,892	0,889
TV13	0,932	0,844	0,936	0,939

5.1.6 Fazit

Für den Demonstrator erfolgte die Auslegung und Simulation eines Schichtenladers. Es konnte gezeigt werden, dass dieser für den Betrieb in einem Langzeitspeicher mit Temperaturdifferenzen zwischen 20 K und 30 K geeignet ist. Sowohl bei der Beladung mit Fluid entsprechend der maximalen Speichertemperatur als auch beim Einschichten mit Fluid entsprechend der mittleren Speichertemperatur erfolgte das Ausströmen hauptsächlich über die erwünschten Sollauslassebenen.

Die Untersuchung zeigt weiterhin, dass das Konzept von SL_1 (Schichtenlader im Demonstrator für eine Speicherhöhe von ca. 5 m) auf große Speicher übertragbar ist. Die Variante SL_2a überzeugt hier bei allen untersuchten Temperaturvarianten und nutzt die bewährte Auslegungsstrategie von SL_1. Die Variante SL_2b (kommunizierender Doppellader) liefert ebenfalls gute Ergebnisse und hat den Vorteil, dass bereits existierende und für die jeweiligen Betriebsbedingungen ausgelegte Schichtenlader miteinander kombiniert werden können. Variante SL_2c kann nicht überzeugen, da durch die vertikale Zuführung im Verteilstück zum oberen Doppellader Mitreißeffekte auftreten. Potential für weitere Verbesserungen bietet die Optimierung des Verteilerstücks in Variante SL_2b. Durch die Absperrung eines Zweigs könnten bspw. bei TV13 Ansaugeffekte durch den oberen Doppellader vollkommen unterbunden werden. Dies würde das Einschichtverhalten gegenüber SL_2a verbessern.

6 Hydraulische Integration und Netz-Speicher-Schnittstelle⁴⁰

6.1 Zusammenfassung der Anforderungen

Die hydraulische Integration ist ein wichtiger Faktor für den Speichereinsatz in Wärmeversorgungssystemen [12], [14]. Die Aufgabe der Schnittstelle ist auf Speicherseite die Einbindung des druckseitig entkoppelten Speichers ins Wärmenetz. Aufgrund des hohen Druckes im Netz sind Einrichtungen zur

- Druckerhöhung (DE) bzw. zur
- Druckminderung (DM) notwendig.

Hierfür kommen Pumpen bzw. Drosselventile zum Einsatz. Auf der Netzseite kann die Schnittstelle weitere Dienstleistungen erbringen:

- Druckhaltung und
- Druckabsicherung.

Abbildung 118 zeigt eine Übersicht zu typischen Integrationsfällen von Speichern in Wärmeversorgungsnetze. **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** liefert wichtige Merkmale. Eine Einbindung des Speichers nach Fall a) und b) ist hier nicht möglich (zu hohe Speicherdrücke). Die Fälle c), d), e) und f) sind dagegen abzudecken. Dabei ist Fall e) nachteilig, da durch die hydraulische Trennung keine netzdienlichen Druckdienstleistungen (Druckhaltung/-absicherung) erbracht werden können und Temperaturdifferenzen entstehen.

Aus den unterschiedlichen Integrationsfällen folgen teils deutlich unterschiedliche Netzdrücke. So liegt im Fall d) ein sehr hoher Netzdruck an, während im Fall c) der Druck viel niedriger ist. Auf Grund der Erzeugernähe kann jedoch eine hohe Temperatur anliegen. Die Auslegung der Schnittstelle hängt somit maßgeblich vom Netzdruck ab. Weiterhin beeinflussen der Volumenstrom, der hydrostatische Druck der Speicherwassersäule und auftretende Druckverluste in Rohrleitungen und Armaturen die erforderliche Druckerhöhung bzw. –minderung.

Die Schnittstelle deckt den Betrieb mit KWK-Anlagen ab. Solarthermieranlagen können über Matched-Flow-Betrieb eingebunden werden. Dann erfolgt der Einsatz von radialen Diffusoren.

⁴⁰ Autoren des Abschnittes: Fabian Findeisen, Thorsten Urbaneck.

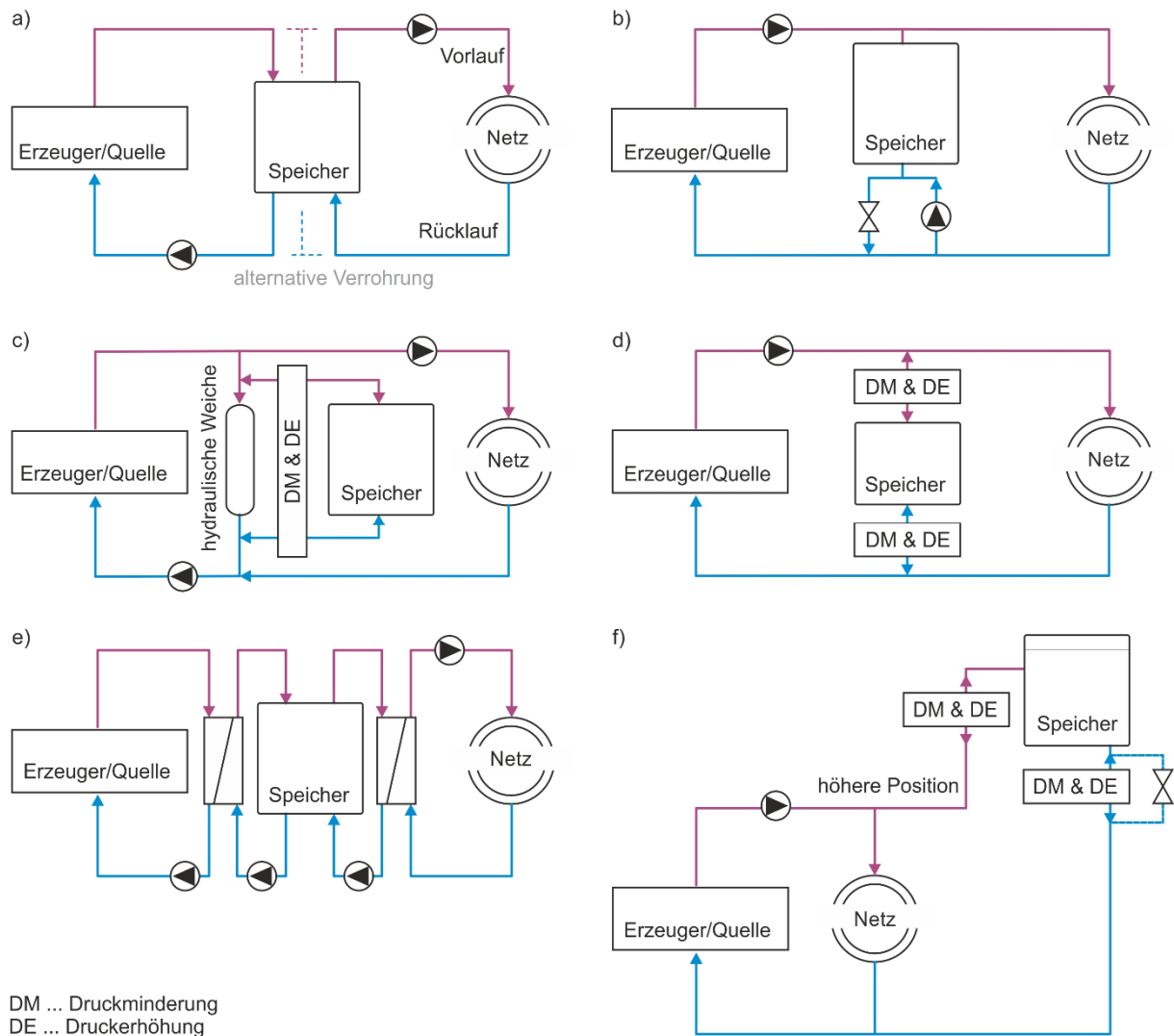


Abbildung 118: Hydraulische Integration von Speichern in Wärmeversorgungssysteme [28]

Tabelle 31: Vergleich der verschiedenen Varianten nach Abbildung 118 [28]

Variante	Be- und Entladung	Speicherdruck	Druckgeräterichtlinie	typischer Standort	Netz-Speicher-Schnittstelle erforderlich
a)	direkt	Netzdruck	ja	in der Nähe der Erzeuger	nein
b)	direkt	Netzdruck	ja	im Netzgebiet	nein
c)	direkt	< Netzdruck	nein	in der Nähe der Erzeuger	ja
d)	direkt	< Netzdruck	nein	im Netzgebiet	ja
e)	indirekt	< Netzdruck	nein	in der Nähe der Erzeuger	ja
f)	direkt	< Netzdruck	nein	im Netzgebiet	ja

6.2 Vorstellung des Konzepts

6.2.1 Hydraulische Schaltungen

Abbildung 119 zeigt die Einbindung des Druckminderungs- bzw. -erhöhungspaths über eine hydraulische Weiche, wenn keine Wärmeübertrager zwischengeschaltet sind (vgl. mit Abbildung 118 c), d) und f)). Die Druckminderung erfolgt über Drosselventile bzw. motorgesteuerte Ventile (MV), zur Druckerhöhung sind Pumpen (P) notwendig.

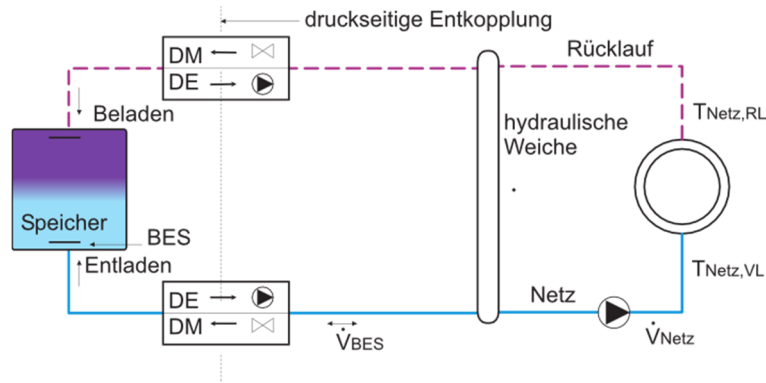
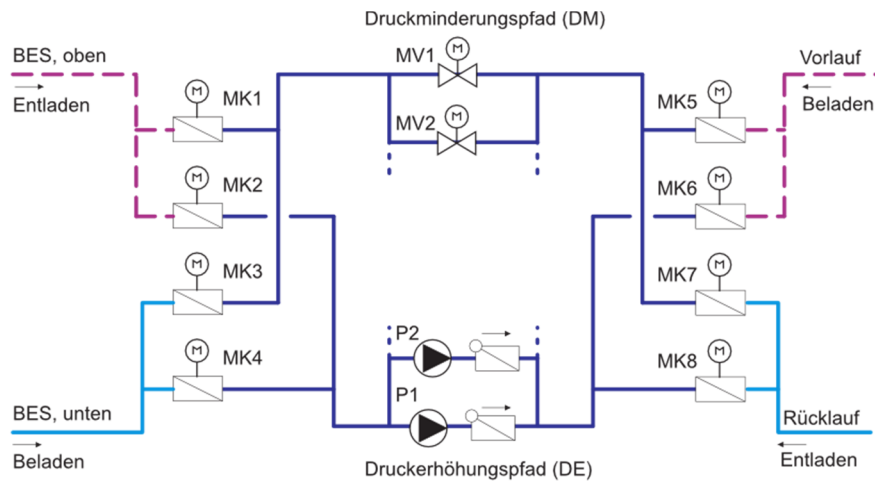


Abbildung 119: Druckentkoppelte Einbindung eines Speichers in ein Warmwassersystem mit Druckminderung (DM) und Druckerhöhung (DE) [64]

Für die Gestaltung der DE- bzw. DM-Pfade sind unterschiedliche Schaltungen möglich, welche im Folgenden erläutert werden.

Schaltung 1

Bei dieser Variante reicht jeweils ein Pfad zur Druckminderung und zur Druckerhöhung aus. Hierfür sind acht Motorklappen (MK) zur Einstellung des Strömungswegs erforderlich (Abbildung 120).



	P1/P2	MV1/MV2	MK1	MK2	MK3	MK4	MK5	MK6	MK7	MK8
Speicher entladen	Regelung	Regelung	ZU	AUF	AUF	ZU	ZU	AUF	AUF	ZU
Speicher beladen	Regelung	Regelung	AUF	ZU	ZU	AUF	AUF	ZU	ZU	AUF
kein Speicherbetrieb	AUS	ZU	ZU	ZU	ZU	ZU	ZU	ZU	ZU	ZU

Abbildung 120: Schaltung 1 mit acht Motorklappen, jeweils ein DM- und ein DE-Pfad [64]

Um einen großen Volumenstrombereich abzudecken, kann die Parallelschaltung von mehreren Pumpen- und Ventilgruppen (Kaskadenschaltung) sinnvoll sein. Die Sicherheits- und/oder Druckhaltestrecke ist hier nicht mit dargestellt, kann aber ggf. integriert werden.

Schaltung 2

Abbildung 121 verdeutlicht eine Schaltung mit zwei Druckminderungspfaden und lediglich vier Motorklappen. Für diese Schaltung sind Rückschlagklappen notwendig, um den jeweils nicht aktiven Druckminderungspfad abzusperrern.

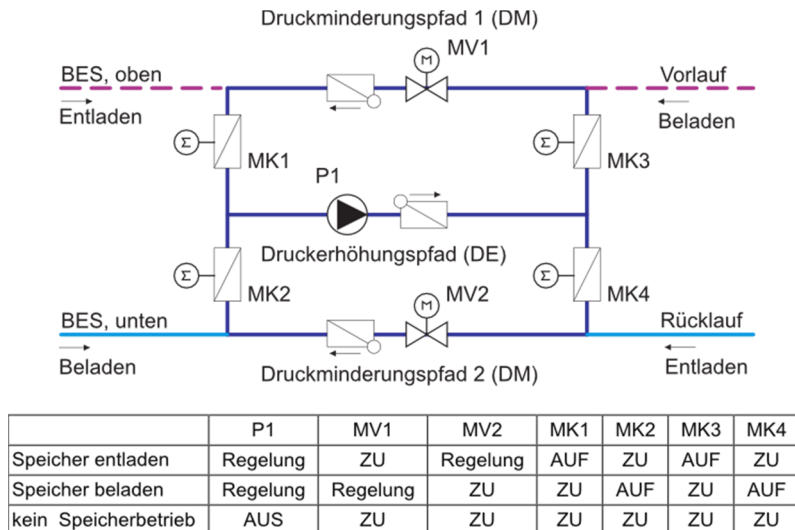


Abbildung 121: Schaltung 2 mit vier Motorklappen, zwei DM-Pfaden und einem DE-Pfad [64]

Schaltung 3

Die Druckentkopplung des Speichers vom Netz kann durch einen Wärmeübertrager erfolgen, welcher zwischen beide Systeme geschaltet wird (vgl. mit Abbildung 122). Durch die hydraulische Trennung entfallen die Druckminderungs- und erhöhungspfade. Dafür sind auf Speicher- und Netzseite Pumpen notwendig. Außerdem kann keine Druckhaltung bzw. –absicherung erfolgen. Nachteilig sind die Temperaturdifferenzen, die durch den Wärmeübertrager entstehen.

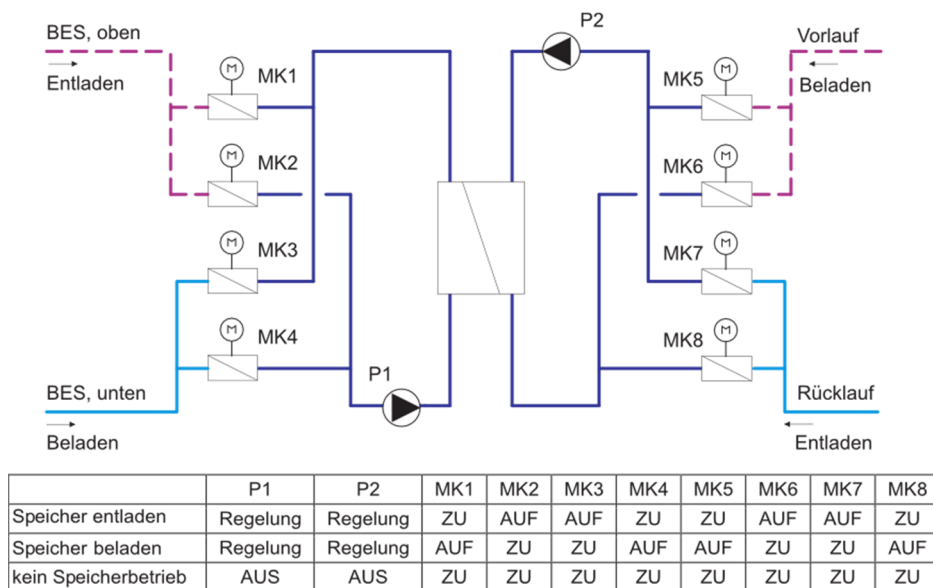


Abbildung 122: Schaltung 3 mit acht Motorklappen und externem Wärmeübertrager [64]

6.2.2 Nutzung des Speichers zur Netzdruckhaltung/-absicherung

Abbildung 123 zeigt stark vereinfacht, wie eine dynamische Netzdruckhaltung bzw. –absicherung erfolgen kann:

- Druckhaltestrecke: Wenn der Ruhedruck im Netz zu gering ist, kann über eine Druckhaltepumpe Wasser aus dem Speicher ins Netz gefördert und so der Druck auf seinen Sollwert gebracht werden. Die Druckhaltestrecke kann man aus Sicherheitsgründen redundant ausführen.

- Sicherheitsstrecke: Wenn der Druck im Netz den Ansprechdruck des Proportional-sicherheitsventils erreicht, strömt Wasser aus dem Netz in den Speicher ab. Ein unzulässig hoher Druck im Netz wird verhindert.

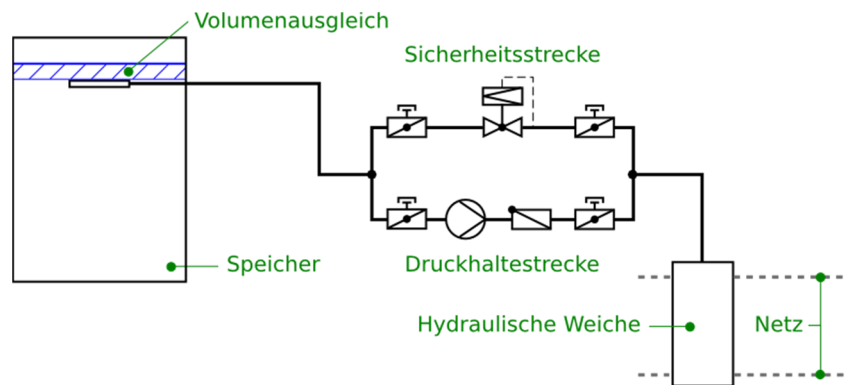


Abbildung 123: Vereinfachte Darstellung der Netzdruckhaltung und -absicherung [64]

Zum Ausgleich von Volumenschwankungen im Netz über die Druckhalte- und die Sicherheitsstrecke steht dabei das in der Abbildung schraffiert dargestellte Speichervolumen zur Verfügung. Dieses ergibt sich aus der Auslenkung der Schwimmdecke und wird durch deren maximalen Hub und die Temperatur im Speicher (Wärmeausdehnung) begrenzt. Dieses Volumen kann maximal über die Druckhaltepumpe ins Netz gedrückt oder über das Sicherheitsventil aus dem Netz abgenommen werden. Wenn die Volumenstromschwankung im Netz aufgrund hoher Temperaturdifferenzen oder eines großen Netzvolumens dieses verfügbare Ausgleichsvolumen übersteigt, entfällt die Möglichkeit der Netzdruckhaltung und -absicherung über den Speicher.

7 Planung, Bau und Inbetriebnahme des Demonstrators

7.1 Konstruktive Umsetzung⁴¹

Abschnitt 3.4 beschreibt den Aufbau des Demonstrators (Abbildung 72) bzw. die Weiterentwicklung der Konstruktion. Dieser Abschnitt zeigt den Ablauf und die Umsetzung, der in Abschnitt 3.4 vorgestellten Konstruktion. Tabelle 33 liefert charakteristische Daten des Demonstrators.

Tabelle 32: Daten des Demonstrators

Demonstrator	
Speichervolumen (minimale Schwimmdeckenauslenkung) [m ³]	116
gesamte Höhe [m]	7,77
Wandhöhe [m]	7,29
Innendurchmesser [m]	5,12
untere Höhe der Schwimmdecke über dem Boden [m]	5,59
obere Höhe der Schwimmdecke über dem Boden [m]	6,29
Stärke der Bodendämmung [m]	0,21
Stärke der Wanddämmung [m]	0,29
Stärke der Deckendämmung [m]	0,45
maximale Speichertemperatur [°C], Planungswert	98
maximale Speichertemperatur [°C], Test	92

Der Bau des Demonstrators fand chronologisch wie folgt statt:

- Bau des Fundaments mit Bodenplatte und Starterring,
- Errichtung der Speicherwand aus verschraubten Wandsegmenten,
- Bau des Gespärredachs und der Schwimmdecke,
- Installation von Beladevorrichtungen (Schichtenlader, radialer Diffusor),
- Montage der flexiblen Abdichtung der Schwimmdecke,
- Einbringen der Wärmedämmung,
- Befüllung des Speichers mit Wasser.

Die folgenden Abbildungen dokumentieren den Bauablauf, die Umsetzung des Projekts und zeigen wichtige konstruktive Details, beginnend mit 3D-Visualisierungen aus der Planungsphase in Abbildung 124 und Abbildung 125. Die Position der Schwimmdecke kann man in Abbildung 125 gut erkennen. Abbildung 126 zeigt die Bodenplatte des Demonstrators mit Bodenblech und Teilen des Starterrings.

⁴¹ Autoren des Abschnittes: Thorsten Urbaneck, Jan Mücke, Fabian Findeisen, Robert Beyer.

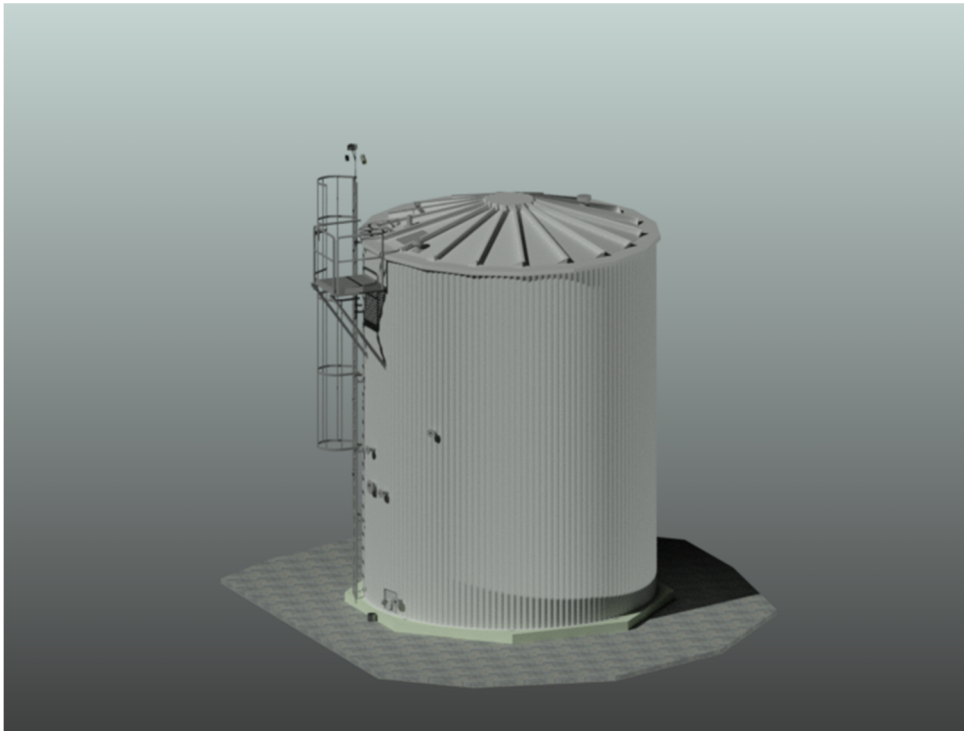


Abbildung 124: Demonstrator, Gesamtansicht, CAD-Visualisierung

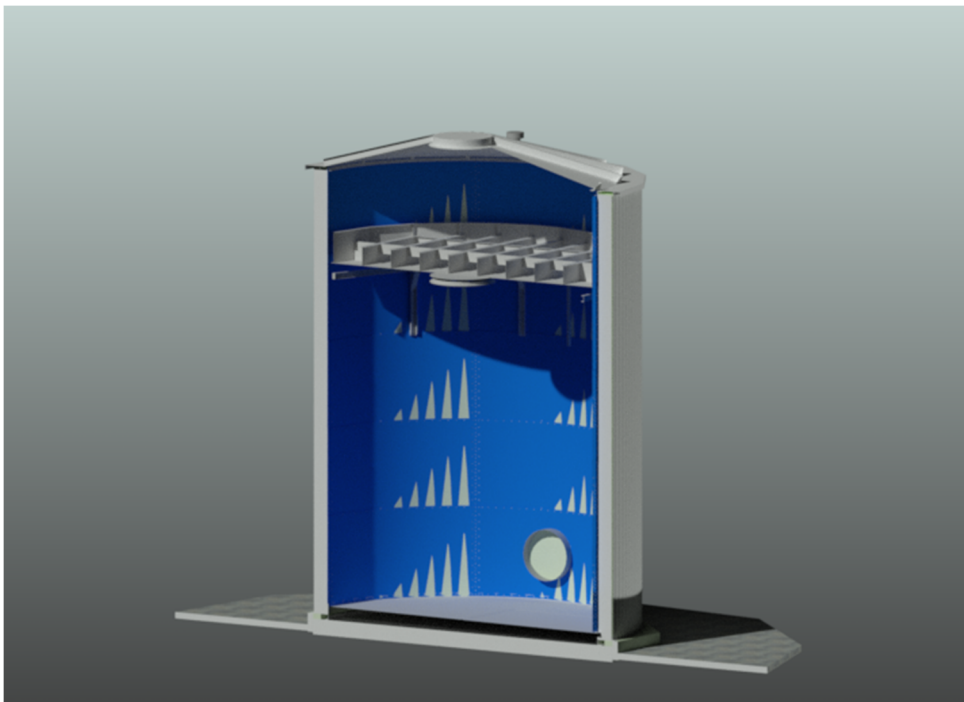


Abbildung 125: Demonstrator, Schnittdarstellung mit Schwimmdecke, CAD-Visualisierung



Abbildung 126: Demonstrator, Bodenplatte mit Bodenblech und Teile des Starterrings, 27.01.16

In Abbildung 127 bis Abbildung 129 sind die verschiedenen beschichteten Wandsegmente, deren Verschraubung und Eindichtung, sowie die Abstandshalter für das Außenblech zu erkennen. Abbildung 130 zeigt das Gespärredach des Demonstrator von außen, mit Luke zur Begehung und Befüllung mit Wärmedämmstoff sowie Blitzschutzstangen.



Abbildung 127: Demonstrator, Gesamtansicht, Verwendung von Wandsegmenten mit verschiedenen Beschichtungswerkstoffen, 28.04.2016



Abbildung 128: Demonstrator, Verwendung von Wandsegmenten mit verschiedenen Beschichtungswerkstoffen und des identifizierten Dichtstoffes, 28.04.2016



Abbildung 129: Demonstrator, Speicherwand mit Abstandshaltern, 28.04.2016



Abbildung 130: Demonstrator, Gespärredach mit Luke, 28.04.2016

Abbildung 131 bis Abbildung 135 zeigen den Speicherinnenraum sowie die Schwimmdecke. Dargestellt ist weiterhin der Schichtenlader (Abbildung 131), die flexible Abdichtung des Ringraums (Abbildung 132) sowie der zentral, direkt an der Schwimmdecke angebrachten radiale Diffusor (Abbildung 133). Abbildung 134 und Abbildung 135 zeigen die gedämmte Schwimmdecke, während der Befüllung mit Rathipur und während der Arbeiten zum Bau einer Plattform auf der Rathipur-Schüttung aus XPS-Platten, vom Dachraum aus.



Abbildung 131: Demonstrator, Speicherraum, Speicherwand mit Schichtenlader (BES3), 09.02.2017



Abbildung 132: Demonstrator, Dachraum, flexible Abdichtung der Schwimmdecke, vor der Befüllung mit Rathipur (Wärmedämmstoff), 09.02.2017

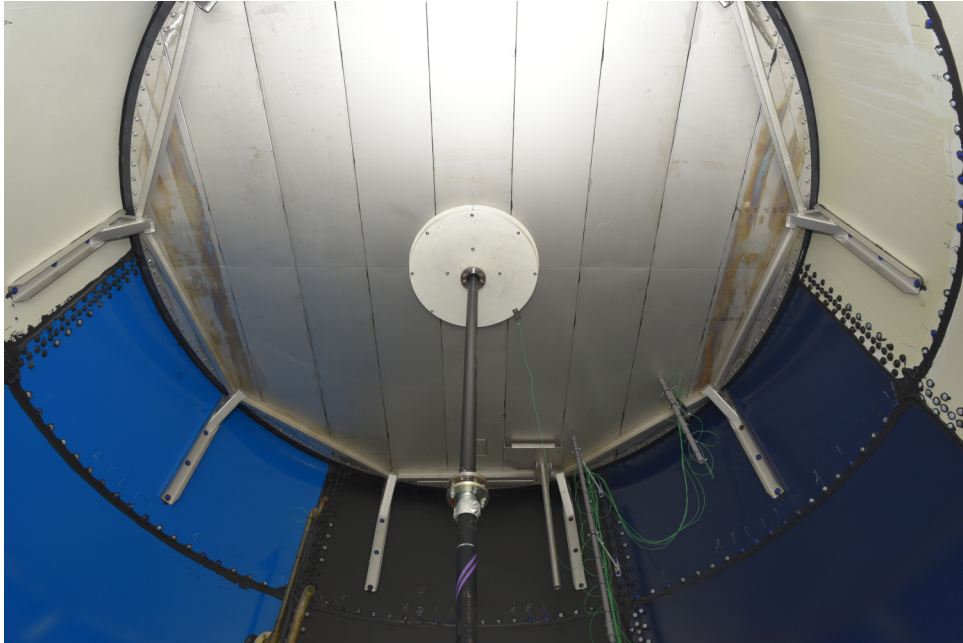


Abbildung 133: Demonstrator, Speicherraum, Schwimmdecke mit radialem Diffusor (BES1/2/4), 28.04.2016



Abbildung 134: Demonstrator, Dachraum, Befüllung der Schwimmdecke mit Rathipur (Partikel aus recyceltem Polyurethan-Hartschaum), 13.06.2017

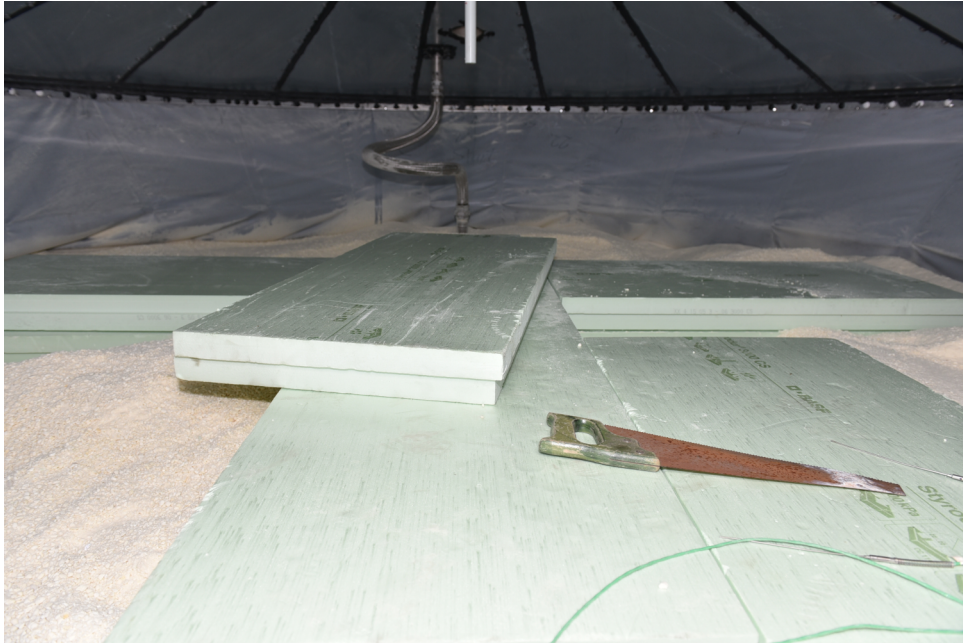


Abbildung 135: Demonstrator, Dachraum, Schwimmdecke mit Einbauten zur Begehung (XPS-Wärmedämmplatten) während der Montage, 13.07.2017

Abbildung 136 zeigt den Wandaufbau während der Bauphase, noch ohne Rathipur-Wärmedämmung und nur teilweise montiertem Außenblech. Die geschraubten Segmente und die modifizierten Abstandshalter mit thermischer Entkopplung sind gut zu erkennen. In Abbildung 137 ist der fertiggestellte Demonstrator, hier noch ohne Wärmedämmung der Revisionsöffnung, zu sehen.



Abbildung 136: Wandaufbau, modifizierte Verkleidungsblechhalter und teilweise montiertes Verkleidungsblech, 16.05.2017



Abbildung 137: Demonstrator, Gesamtansicht nach Abschluss der Installation des Verkleidungsblechs und der Befüllung mit Rathipur, temporär nicht gedämmtes Mannloch, 13.07.2017

7.2 Monitoring⁴²

Die Messtechnik am Demonstrator umfasst folgende Funktionseinheiten:

- Wetterstation,
- Durchflussmesser (MID),
- Füllstandssensor (Ultraschallsensor),
- Temperatur- und Feuchtefühler,
- Schaltschrank zur Messwerterfassung und Steuer- und Regelung der Anlage.

Positionierung und Benennung der zur Auswertung genutzten Messsensoren sind Anhang A zu entnehmen.

7.2.1 Wetterstation

Die Wetterstation ist am Dach des Demonstrators befestigt und umfasst verschiedenen Messsensoren. Die einzelnen Messfühler sind in Tabelle 33 aufgelistet.

⁴² Autoren des Abschnittes: Jan Mücke, Fabian Findeisen, Markus Gensbaur, Thorsten Urbaneck

Tabelle 33: Messsensoren der Wetterstation

Sensortyp	Anzahl	Typ, Modell	Bezeichnung
Feuchtefühler	1	RAFT(H)/A-U	Fa
Strahlungssensor	5	CS10	Esolar,hor; Esolar,N; Esolar,O; Esolar,S; Esolar,W
Temperaturfühler	1	RAFT(H)/A-U	Ta1
Thermoelement	2	M-TE Typ K	Ta2; Ta3 ^a
Windgeber	1	WG2/0-10	wW

^a Die Fühler Ta2/Ta3 messen strahlungsbehaftete Oberflächentemperaturen. Ta2 ist der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt, während sich Ta3 im Schatten befindet.

7.2.2 Schaltschrank

Der Schaltschrank beinhaltet die Technik für die Messwertaufnahme sowie für die Regelung und Steuerung der gesamten Anlage [79]. Die Software zur Steuerung wird in Abschnitt 7.3 vorgestellt.

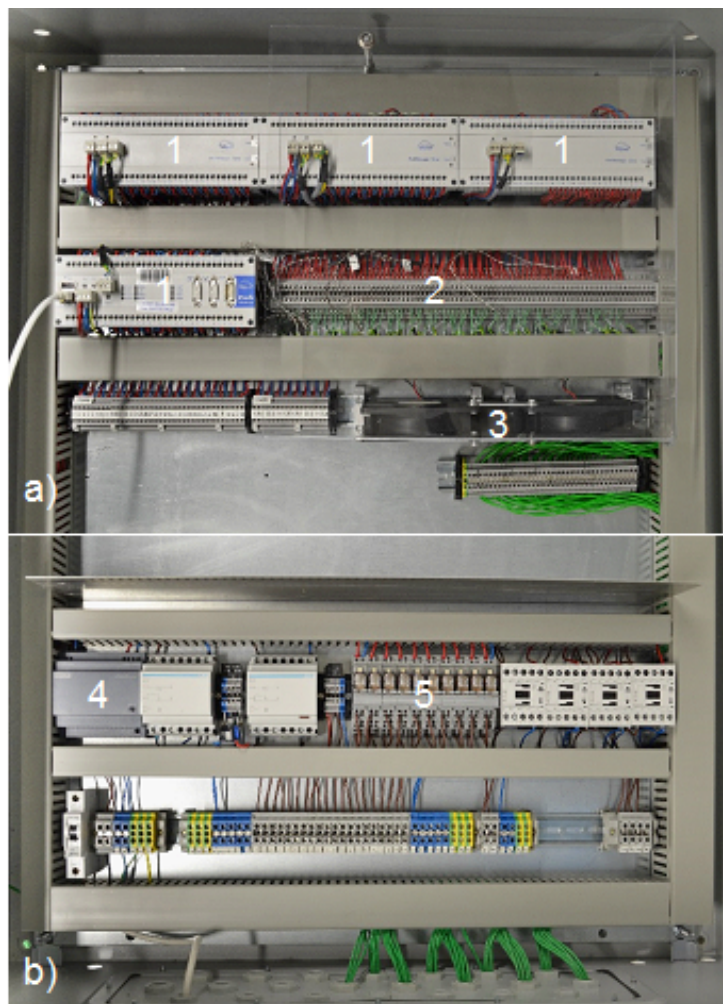


Abbildung 138: Übersichtsdarstellung zum Schaltschrank; a) oberer Teil, b) unterer Teil

Abbildung 138 zeigt den fertiggestellten Schaltschrank und die wichtigsten Bauteile:

1. Delphin ProfiMessage-Geräte [80],
2. Klemmblock der Thermoelemente (Vergleichsstelle),

3. Lüfter zur gleichmäßigen Konvektion über der Vergleichsstelle,
4. Stromversorgung des Schaltschranks,
5. Schaltrelais zur Schaltung von externen Geräten wie Pumpen und Motorklappen.

7.2.3 Messlanzen

Zur Temperaturmessung befinden sich zwei vertikale Temperaturmesslanzen im Speicher (Anhang A). Diese sind so gestaltet, dass Thermoelemente in einem exakt definierten Abstand eingesteckt werden und so den vertikalen Temperaturverlauf erfassen. Eine statische Messlanze erstreckt sich über die gesamte Speicherhöhe und eine dynamische Messlanze mit einer Länge von ca. 1 m folgt der Bewegung der Schwimmdecke. Die dynamische Messlanze ist an der Unterseite der Schwimmdecke befestigt. Ist die Schwimmdecke maximal ausgelenkt, ermöglichen beide Lanzen in Kombination eine Messung der vertikalen Temperaturverteilung über die gesamte Speicherhöhe bis unter die Schwimmdecke. Beide Messlanzen bestehen aus handelsüblichen HT-Rohren (PPE) und sind temperaturbeständig. Die Korrektur der Höheninformation basiert auf der Messung der Schwimmdecken-Höhenänderung mithilfe des Ultraschallsensors im Dach des Speichers.

Zu den vertikalen Temperaturverläufen ist anzumerken, dass zwischen den Messpunkten eine lineare Interpolation erfolgt. Dadurch wird der Temperaturverlauf innerhalb der Übergangsschicht nur näherungsweise wiedergegeben und besonders im Übergang zur warmen Zone können die Abweichungen größer sein. Für eine feinere Erfassung des Temperaturprofils wäre eine deutlich höhere Messauflösung nötig, wie sie in der Praxis und unter Kostengesichtspunkten allerdings nicht umsetzbar ist. Mit einem mittleren Abstand von ungefähr 20 cm zwischen den Thermoelementen ist die Messauflösung für einen Speicher dieser Höhe bereits relativ hoch.

7.2.4 Messunsicherheit

Die Messunsicherheit der für die Auswertung relevanten Sensoren fasst die nachfolgende Tabelle 34 zusammen.

Tabelle 34: Messunsicherheiten für die Auswertung relevanter Messsensoren am Demonstrator

Bezeichnung	Einheit	Messgröße (Position)	Messunsicherheit
Tsch0 bis Tsch33, Trd1, Tsl1 bis Tsl5	°C	Speicherfluidtemperatur (stat. und dyn. Messlanze, Schichtenlader, Radialdiffusor)	$\Delta T = \pm 0,1 \text{ K}^a$
Tbelvl, Tbelrl	°C	Fluidtemperatur (Vorlauf und Rücklauf)	$\Delta T = \pm 0,1 \text{ K}^a$
Twd1,1 bis Twd3,2, Tdecke1, Tdecke2	°C	Temperatur in der Wärmedämmung (Schwimmdecke und Speicherwand)	$\Delta T = \pm 0,1 \text{ K}^a$
Ta2, Ta3, Tboden1, Tboden2,	°C	Speicherumgebungstemperaturen (Wetterstation, Fundament)	$\Delta T = \pm 0,1 \text{ K}^a$
Ta1, Tdach	°C	Speicherumgebungstemperaturen (Wetterstation, Dachraum)	$\Delta T = \pm 0,5 \text{ K}^b$
P1_Istwert,	m ³ /h	Volumenstrom (bis 20 m ³ /h)	$\Delta \dot{V}/\dot{V} = \pm(0,2 \% \text{ v.M.} + 0,02\% \text{ v.E.})^b$
P2_Istwert	m ³ /h	Volumenstrom (bis 4 m ³ /h)	$\Delta \dot{V}/\dot{V} = \pm(0,2 \% \text{ v.M.} + 0,02\% \text{ v.E.})^b$
Esolar,hor_korr	W/m ²	Globalstrahlung (Wetterstation)	$\Delta \dot{G} = \pm 40 \text{ W/m}^2 \text{ }^c$

Bezeichnung	Einheit	Messgröße (Position)	Messunsicherheit
WSP1, WSP3, WSPdecke	W/m ²	Wärmestrommessplatten (Wärmedämmung)	$\Delta q/q = \pm 5 \% ^d$
wW	m/s	Windgeschwindigkeit (Wetterstation)	$\Delta w = \pm 0,5 \text{ m/s} ^b$
Fa	%	relative Umgebungsfeuchte (Wetterstation)	$\Delta \phi = \pm 3 \% \text{ (bei } 20 \text{ } ^\circ\text{C)} ^b$
lsp	m	Höhe der Schwimmdecke bezogen auf den unteren Totpunkt (Dachraum)	$\Delta h/h = \pm (0,2 \% \text{ v.E.}) ^b$
Twd4,1 und Twd4,2	°C	Temperatur in der Wärmedämmung (Anliegend an einem Abstandshalter) ^e	$\Delta T = \pm 0,1 \text{ K} ^a$

^a Gemäß hausinterner Kalibrierung TUC/TT. Bei einer Analyse von Versuchsmessdaten des AKV1, AKV2 und AKV3 wurde festgestellt, dass die Messunsicherheiten z. T. höher liegen. Insbesondere die Sensoren Trd1, Tsch0 bis Tsch33 und Tsl1 bis Tsl5 zeigen eine zusätzliche temporäre Unsicherheit von $\Delta T = +0,5 \text{ K}$. Diese erhöhte Unsicherheit wird durch einen umgebungsbedingten Quereinfluss (bspw. hohe solare Einstrahlung) auf die Messtechnik hervorgerufen. Durch geeignete Datenanalyse und -auswahl kann dieses Problem umgangen werden.

^b Gemäß Herstellerangabe (Annahme: Rechteckverteilung der Messunsicherheit)

^c Gemäß Messdatenanalyse des AKV2 (Annahme: Rechteckverteilung der Messunsicherheit); Für den Bereich größer 200 W/m² gilt gemäß Kalibrierdokumentation - Strahlungssensoren CS10 eine Unsicherheit von $\Delta G = \pm 19 \text{ W/m}^2$. Die Anwendung von Solarzellen zur Strahlungsmessung als Alternative zu Pyranometern stellt einen Kompromiss zwischen reduzierten Kosten und ausreichender Messgenauigkeit dar.

^d Hinweis: Bei der WSP3 liegt ab dem 29.10.17 ein nicht quantifizierbarer Messfehler vor, der vermutlich auf einen Sturmschaden und eine daraus resultierende fehlerhafte Einbaulage zurückzuführen ist.

^e Einbaulage der Sensoren nach aktuellem Kenntnisstand fehlerhaft.

7.3 Versuchsprogramm⁴³

Auf Grund der Komplexität der Anlage wird eine leistungsfähige MSR-Technik benötigt. Die Produkte ProfiSignal Basic (Software [79]) und ProfiMessage (Hardware, Schaltschrank [80]) des Herstellers Delphin bieten eine komfortable und aufeinander abgestimmte Anlagensteuerung. Über eine Ethernet-Schnittstelle findet der Datenaustausch zwischen den Delphin-Geräten und einem PC in Echtzeit statt. Softwareseitig erfolgt die Implementierung der o. g. Konzepte über sog. virtuelle Kanäle. Es steht eine Vielzahl von Kanaltypen mit verschiedenen Funktionen zur Verfügung. Besonders wichtige bzw. verwendete Funktionen sind:

- Logik-Kanäle für Bool'sche Operationen,
- Rechenkanäle für die Verarbeitung von Werten und Variablen,
- Merkerkanäle zum Definieren von Variablen bzw. Werten,
- PID-Regler für regelungstechnische Aufgaben und
- Linearisierungskanäle für die Umwandlung von Rechenergebnissen in Steuersignale (0/4...20 mA bzw. 0...10 V).

An erster Stelle des Versuchsprogramms steht die Betriebsfreigabe. Hier fließen sämtliche Informationen über den Sicherheitsstatus der Anlage ein. Danach ist die Auswahl eines Betriebsmodus möglich, welcher sämtliche Aktoren der Anlage in einen definierten Zustand versetzt. Außerdem kann jeder Aktor auch manuell betrieben werden. Eine zusätzliche Steuereinheit (sog. Siemens LOGO!) überprüft, ob alle Aktoren die korrekte Lage erreicht haben. Anschließend erfolgt die Versuchsfreigabe. Hierfür kann aus einer Liste vordefinierter Versuche oder eine manuelle Einstellung gewählt werden.

⁴³ Autoren des Abschnittes: Fabian Findeisen, Jan Mücke, Thorsten Urbaneck.

Der Nutzer steuert sämtliche Programmfunktionen über verschiedene Instanzen der Visualisierungsoberfläche. Bei Aufruf des Programms erscheint zunächst eine Oberfläche mit den Informationen zum Sicherheitsstatus. Diese informiert z. B. über Dampfaustritt, Frostschutz, Absicherung der Maximaltemperaturen und die Auslenkung der Schwimmdecke. Die darauf folgende Auswahl des Betriebsmodus sowie die Versuchssteuerung zeigt Abbildung 139. Er-sichtlich sind alle Ist- und Sollwerte die Versuchsdurchführung betreffend. Mit dem Schalter „Versuch läuft“ startet der Versuch und alle Aktoren erhalten für eine definierte Dauer ihr jeweiliges Steuersignal.

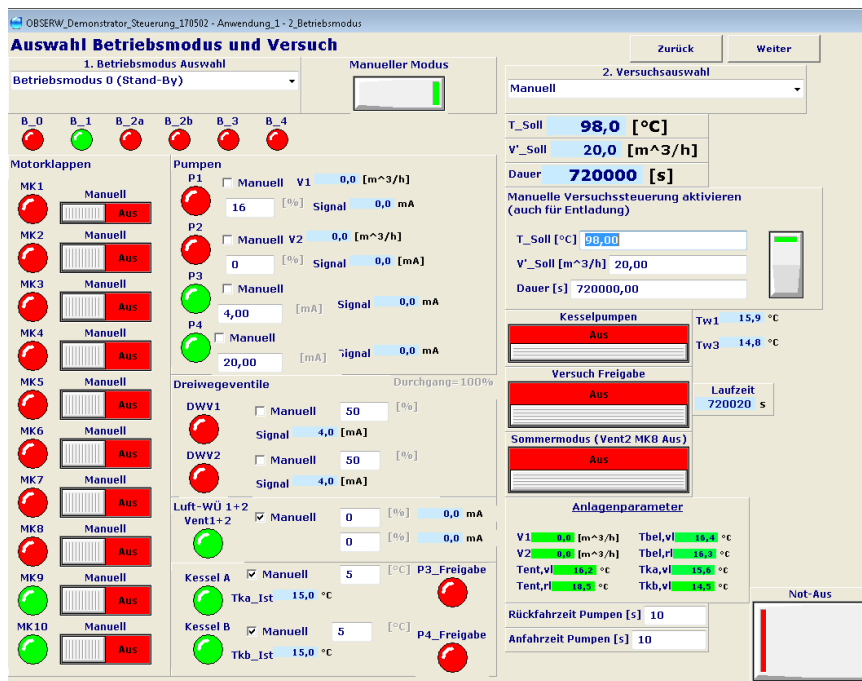


Abbildung 139: Programmreiter im Delphin-Steuerungsprogramm zur Auswahl Betriebsmodus und Versuch

Das Schaubild Data Logging (Abbildung 140) zeigt den Messwertverlauf. Das Schreiben der Daten erfolgt automatisch im 60 s-Takt für jeden Tag sowie zusätzlich im 10 s-Takt, sobald ein Versuch gestartet wurde.

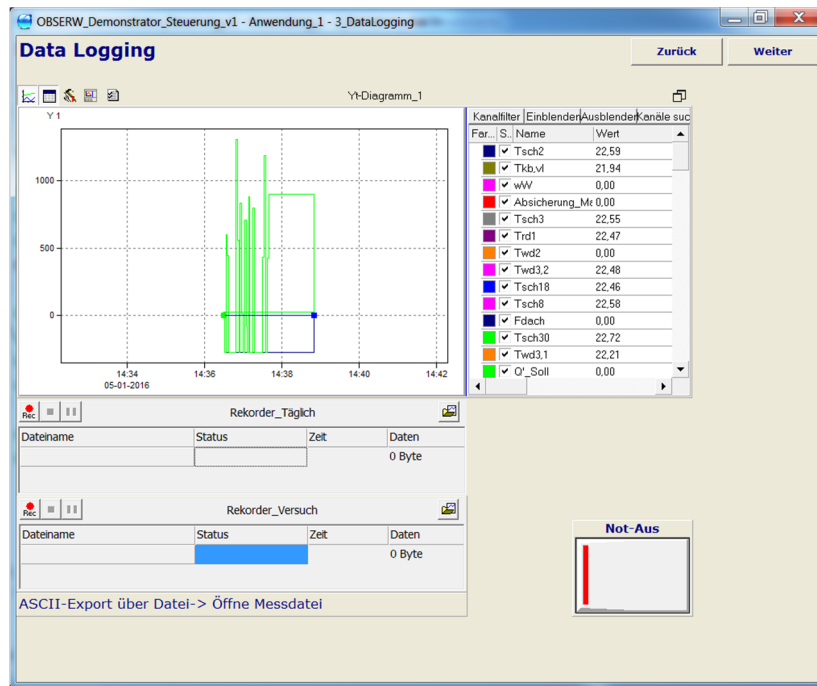


Abbildung 140: Programmreiter im Delphin-Steuerungsprogramm zum Data Logging

Im Schaubild Monitoring Anlage (Abbildung 141) ist die Anlage selbst schematisch dargestellt, wobei alle wichtigen Informationen zu Motorklappen, Pumpen und Ventilstellungen auf einen Blick erkennbar sind.

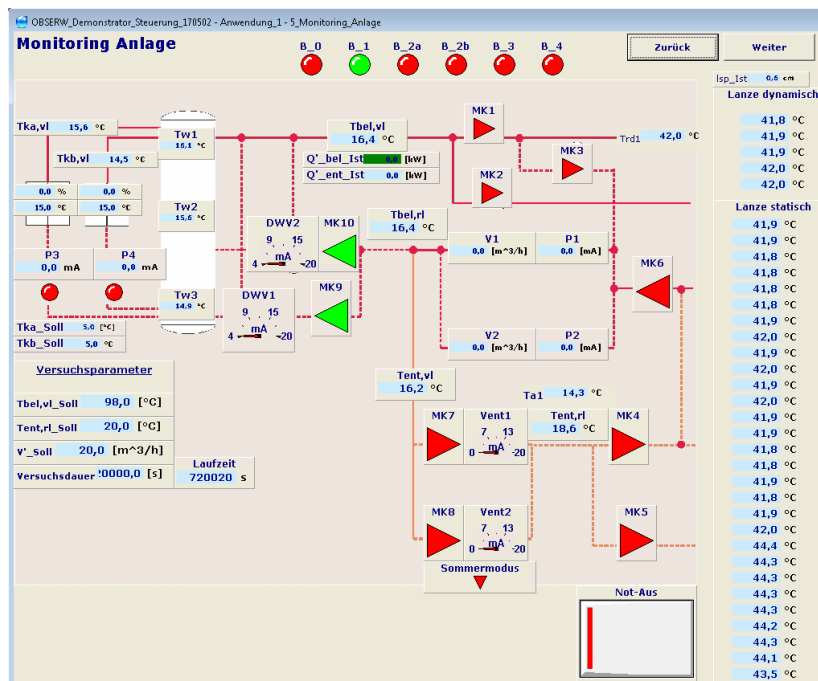


Abbildung 141: Programmreiter im Delphin-Steuerungsprogramm zum Monitoring Anlage

Das Schaubild Monitoring Speicher (Abbildung 142) fasst alle Informationen zum Speicher zusammen, sodass der Be- und Entladevorgang sowie der Zustand des Speichers überwacht werden können.

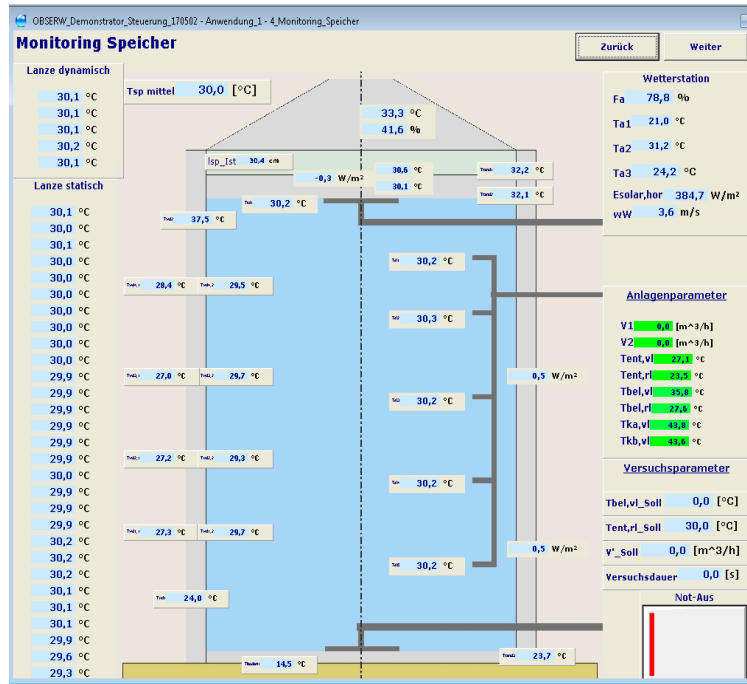


Abbildung 142: Programmreiter im Delphin-Steuerungsprogramm zum Monitoring Speicher

8 Feldtests mit dem Demonstrator

8.1 Experimente mit dem Radialdiffusor⁴⁴

Für den Demonstrator werden Versuche für verschiedene Volumenströme und Temperaturdifferenzen mit dem Radialdiffusor durchgeführt. Die Maße des Radialdiffusors und der Auslegungspunkt der Anlage sind in Tabelle 35 bzw. Tabelle 36 dargestellt.

Tabelle 35: Charakteristische Maße des Diffusors

d_D [m]	1,050
d_{AL} [m]	0,068
h_D [m]	0,040

Tabelle 36: Auslegungspunkt der Anlage für Versuche mit dem Radialdiffusor

\dot{V}_{ein} [m ³ /h]	19,44
T_{ein} [°C]	70
T_{Sp} [°C]	40
$T_{ein,max}$ [°C]	98

Tabelle 37 benennt die einzelnen Tests. Die Testsequenzen werden durch die thermische Leistung der Kesselanlage (ca. 230 kW) im Heizkreis begrenzt, sodass nicht alle in der Tabelle möglichen Versuchskombinationen durchführbar sind. Vor jedem Versuch erfolgt zunächst eine Konditionierung des Speichers auf 30 °C. Nach einer Stillstandszeit von mehreren Stunden startet der jeweilige Versuch.

Tabelle 37: Testsequenzen für die Beladung mit einem Radialdiffusor

\dot{V}_{ein} [m ³ /h]		4,86	9,72	14,58	19,44
$\dot{V}_{ein}/\dot{V}_{max}$ [%]		25	50	75	100
ΔT [K]	5	V25_T5	V50_T5	V75_T5	V100_T5
	10	V25_T10	V50_T10	V75_T10	V100_T5
	15	V25_T15	V50_T15	-	-
	20	V25_T20	V50_T20	-	-
	30	V25_T30	-	-	-

Abbildung 143a zeigt die vertikale Temperaturverteilung im Speicher für die Versuche aus Tabelle 37 bei einer Speicherbeladung von 42 % ($t^* = 0,42$). Bei den untersuchten Temperaturdifferenzen und Volumenströmen ist zu erkennen, dass sich eine relativ scharf abgegrenzte Zone mit Warmwasser ausbildet. Bemerkenswert ist, dass die Temperatur in der warmen Zone bei geringen Temperaturunterschieden kaum von der Beladetemperatur abweicht. Mit steigender Beladetemperatur tritt in der warmen Zone ein sogenannter Long-Tail-Effekt auf [64]. Der Long-Tail-Effekt beschreibt die asymptotische Annäherung des Temperaturprofils an ein ideales Temperaturprofil. Die ideale Temperaturverteilung entspricht einem Rechteckprofil mit mi-

⁴⁴ Autoren des Abschnittes: Fabian Findeisen, Thorsten Urbaneck, Robert Beyer. Eine umfangreiche Versuchsbeschreibung mit Diskussion findet sich neben einem Vergleich mit CFD-Ergebnissen in [29].

nimaler und maximaler Beladertemperatur und ist identisch mit dem Profil einer Pfropfenströmung (ideale Verdrängung). Die Entstehung des Long-Tails ist höchstwahrscheinlich auch auf regelungsbedingte Schwankungen der Vorlauftemperatur zurückzuführen.

Für eine vollständige Beladung des Speichers ist die Entwicklung des Temperaturprofils in Abbildung 143b für den Versuch V25_T20 aus Tabelle 37 dargestellt. Innerhalb der Übergangsschicht bleibt der vertikale Temperaturanstieg nahezu konstant, während der Übergang in die kalte oder warme Zone im Laufe der Zeit abflacht. Die Höhe der Übergangsschicht verdreifacht sich dadurch in diesem Versuch bis zum Ende des Beladeprozesses. Dies liegt jedoch vor allem an den externen Wärmeverlusten während der Beladedauer von fast 24 Stunden.

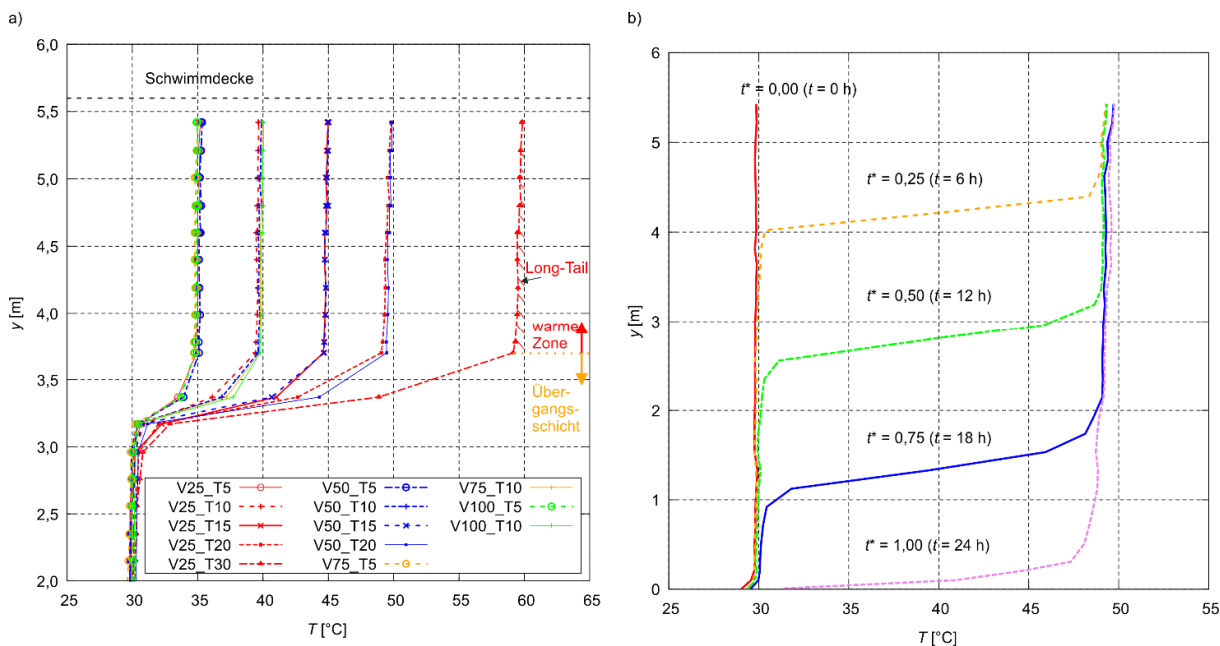


Abbildung 143: a) Vertikale Temperaturverteilung im Inneren des Demonstrators am Ende des Versuchs und Markierung des Long-Tails in V25_T30 ($t^* = 0,42$); b) Entwicklung der Temperaturverteilung im Speicher bis zur vollen Beladung (V25_T20)

Eine umfangreiche Darstellung der im Messverlauf aufgenommenen Daten ermöglicht das sog. Zeit-Höhen-Diagramm (ZHT) [81]. Dieses stellt alle während eines Versuchs im 5 s-Takt aufgenommenen Messwerte in einem einzelnen Diagramm dar. Abbildung 144 zeigt dies für zwei ausgewählte Versuche mit hohem bzw. geringem Volumenstrom (100 % bzw. 25 %) und niedriger bzw. hoher Temperaturdifferenz (10 K bzw. 30 K). Deutlich sind die warme Zone (rot), die Übergangsschicht (orange bis hellblau) und die kalte Zone (blau) zu erkennen. Der S-förmige bzw. gestufte Verlauf der Übergangsschicht über der Zeit ist auf die lineare Interpolation der Messdaten zwischen den über der Speicherhöhe verteilten Messsensoren zurückzuführen. Tatsächlich ist der Temperaturverlauf nicht linear, sondern entspricht in guter Näherung der Form einer Tangens-Hyperbolicus-Funktion. Durch eine höhere Messauflösung kann der Darstellungsfehler behoben werden. Insgesamt ist gut zu erkennen, dass sich die Übergangsschicht gleichmäßig durch den Speicher bewegt und dabei nur gering an Höhe zunimmt. Die Charakteristik zwischen beiden Versuchen ist trotz unterschiedlicher Betriebsbedingungen praktisch identisch.

Abbildung 145 verdeutlicht für den Versuch aus Abbildung 143b, dass sich die thermische Schichtung auch bei einer kompletten Beladung des Speichers gleichmäßig und stabil durch den Speicher bewegt und dabei aufgrund der vertikalen Wärmeleitung und der langen Ver-

suchsdauer nur relativ gering in ihrer Höhe zunimmt. Der ungleichmäßige Verlauf der Übergangsschicht auf einer Höhe von ca. 3,5 m ist auf einen unregelmäßigen Abstand zwischen den dortigen Temperaturfühlern zurückzuführen⁴⁵.

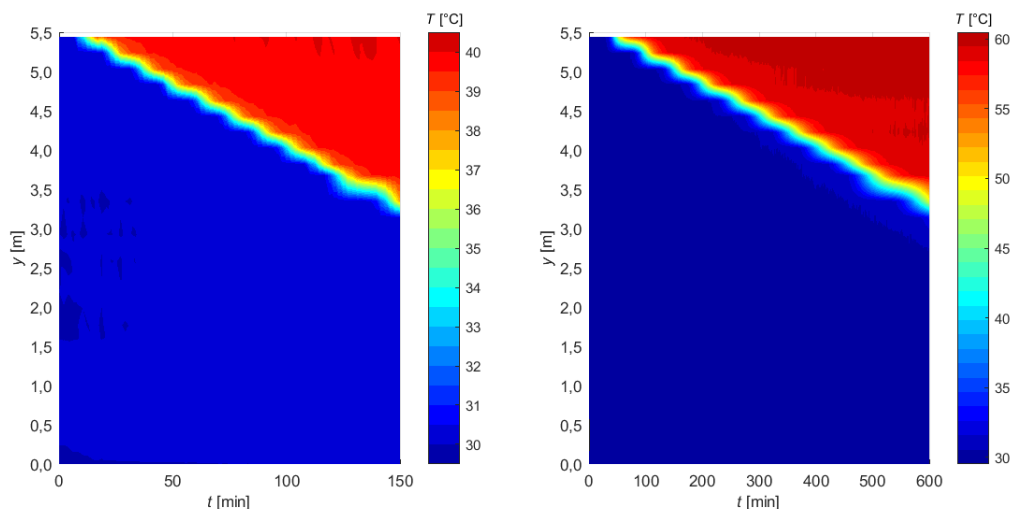


Abbildung 144: Zeit-Höhen-Diagramm für einen Versuch mit $V_{rel} = 100\%$ des Auslegungsvolumenstroms und einer niedrigen Temperaturdifferenz von 10 K (links) sowie mit $V_{rel} = 25\%$ und hoher Temperaturdifferenz

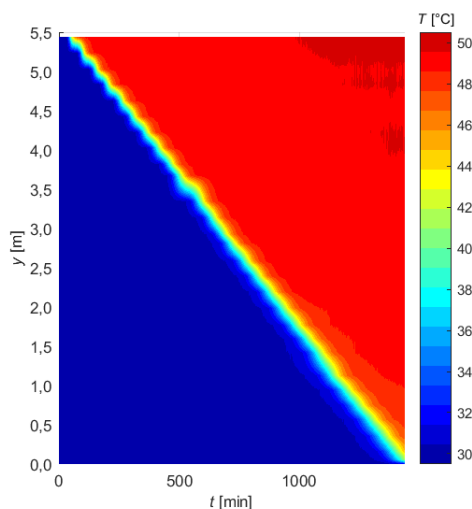


Abbildung 145: Zeit-Höhen-Diagramm für einen Versuch mit $V_{rel} = 25\%$ und kompletter Beladung des Speichers

Nachfolgend wird die zeitliche Entwicklung der Höhe der Übergangsschicht ermittelt. Für die Bestimmung mit dem in Abschnitt 4.1 verwendeten 90/10 %-Kriterium muss allerdings der Temperaturverlauf im Speicher relativ genau bekannt sein, damit die Bestimmung der Positionen der Grenztemperaturen exakt erfolgen kann. Dies ist in Großspeichern jedoch kaum möglich, da eine sehr große Anzahl an Temperaturmessfühlern notwendig wäre, insbesondere wenn die Übergangsschicht relativ schmal ist. Ein alternativer Ansatz für die Berechnung der Schichthöhe in Großspeichern basiert auf dem zeitlichen Verlauf der Temperaturmesswerte

⁴⁵ An dieser Stelle hat sich die Ausrichtung des Sensors und damit die vorgegebene Höhe der Fühlerspitze während der Bauphase verändert.

über einem einzelnen Temperatursensor T_{sch} [64]. Hier entscheidet, wann das Messwertsignal am Sensor der oberen bzw. unteren Grenztemperatur entspricht. Die Höhe der Übergangsschicht wird dann aus der Laufzeit ermittelt:

$$H_{ij}(\Delta t) = \frac{\dot{V}}{A_{sp}} \left(t_{T_{sch}=T_{90\%}} - t_{T_{sch}=T_{10\%}} \right). \quad (18)$$

Praktisch bezieht sich die ermittelte Schichthöhe somit auf ein Zeitintervall und nicht nur auf einen diskreten Zeitpunkt. Notwendig für diesen Ansatz ist ein konstanter Volumenstrom. Problematisch sind jedoch lokale Temperaturschwankungen, welche nicht der Übergangsschicht zuzuordnen sind. So können Messwertschwankungen, bspw. infolge einzelner Wirbel, die Zeitpunktbestimmung verfälschen. Vom Vergleich einzelner Werte ist daher abzuraten und es sollte stets der gesamte zeitliche Verlauf interpretiert werden.

In Abbildung 146 ist die Entwicklung der Schichthöhe für die Versuche aus Tabelle 37 gegenübergestellt. Bei niedrigem Volumenstrom (V25) bzw. langer Versuchsdauer wächst die Übergangsschicht stärker an. Steigt der Volumenstrom, weisen die Versuche mit höheren Temperaturdifferenzen teilweise eine ausgedehntere Übergangsschicht und größere Unterschiede auf. Dies ist auch darauf zurückzuführen, dass Messwertschwankungen am Sensor zunehmen und der Auswertalgorithmus ein falsches, d. h. kurzzeitiges und nicht dauerhaftes, Überschreiten der oberen bzw. unteren Grenztemperatur erfasst. Besonders deutlich ist dieser Fehler am Versuch V100_T10 zu erkennen. Infolge des hohen Volumenstroms schwanken die Messwerte sehr stark, weshalb die Übergangsschicht im Betrachtungszeitraum zu hoch berechnet wird. Im Versuch V75_T10 tritt dagegen erst im Verlauf des Versuchs ein Maxima auf. Dies deutet auf einen Warmwasserwirbel im Speicher hin, bspw. infolge der Reflexion der Strömung an der Seitenwand. Ansätze zur Verbesserung dieser Auswertemethodik waren Gegenstand der Arbeiten [81]. Unter Berücksichtigung der Speicherhöhe von über 5 m sind die Unterschiede zwischen den Schichthöhen der einzelnen Versuche trotzdem sehr gering.

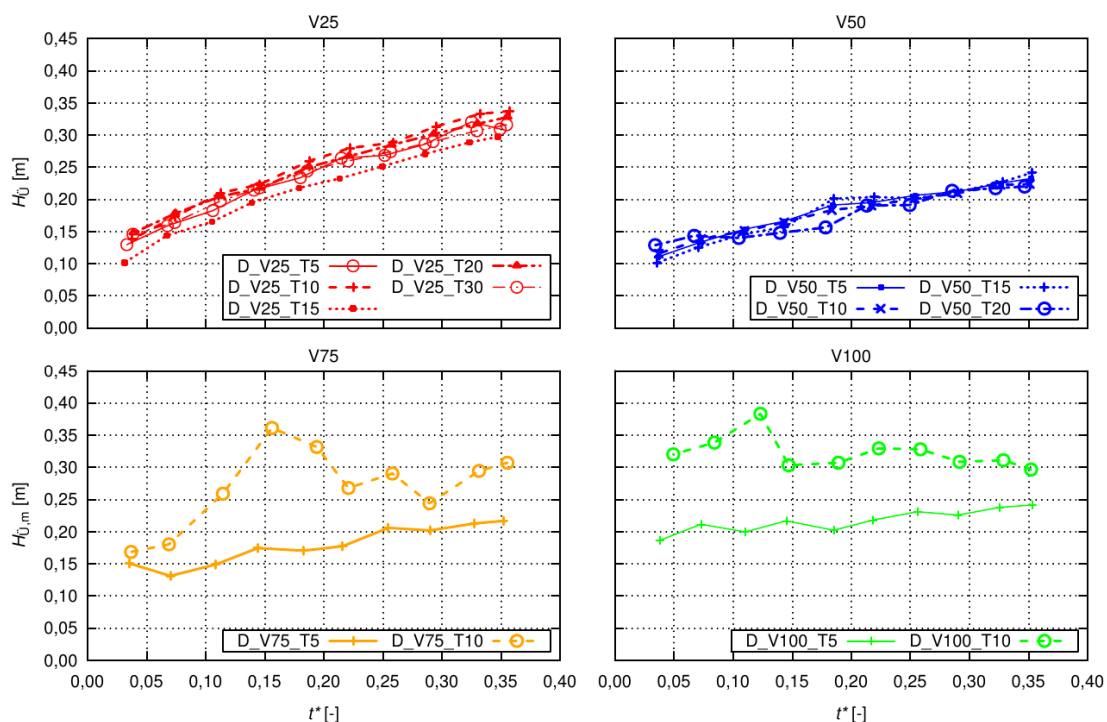


Abbildung 146: Zeitliche Entwicklung der Höhe der Übergangsschicht bei Beladung mit einem Radialdiffusor

In diesem Abschnitt wurden experimentelle Ergebnisse für die Beladung des Demonstrators mit einem Radialdiffusor unter verschiedenen Betriebsbedingungen vorgestellt. Die stets hohe Schichtungsqualität unterstreicht die Eignung des Radialdiffusors für das Abdecken eines großen Betriebsbereichs. Durch die Montage des Beladers an der Schwimmdecke ist neben der hohen Schichtungsqualität eine sehr gute Ausnutzung des Speichervolumens möglich. Die Versuche bestätigen auch, dass eine Dimensionierung des Diffusors anhand des Auslegungspunktes der Anlage günstig für das gesamte Betriebsspektrum ist.

8.2 Experimente mit dem Schichtenlader⁴⁶

Der Abschnitt 8.2 fasst die Ergebnisse der experimentellen Untersuchung des nach [73] ausgelegten und mittels CFD-Simulationen (Abschnitt 5) vorab untersuchten Schichtenladers⁴⁷ im Demonstrator zusammen. Es findet eine Bewertung des Beladeverhaltens des Schichtenladers unter realitätsnahen Betriebsbedingungen statt. Ziel der Untersuchungen ist die Bewertung der gemäß Auslegung erwarteten Funktionalität des Schichtenladers für eine effektive Beladehöhe im Demonstrator von bis zu 3,25 m. Weiterhin erfolgt eine erneute Darstellung der bereits in Kapitel 5 erläuterten Grundlagen zum Betriebsverhalten des Schichtenladers.

8.2.1 Aufbau des Schichtenladers

Das Ziel eines strömungsmechanischen Schichtenladers bei der Speicherbeladung ist die Erzeugung einer thermischen Schichtung im Falle eines isotherm beladenen Speichers und der Erhalt dieser im Falle einer vorhandenen thermischen Schichtung. Erfolgt die Einströmung des Beladefluids in den Speicher über verschiedene Öffnungen am Schichtenlader ohne zusätzliche Steuerungs- und Regelungseinrichtungen, allein aufgrund der vorherrschenden Dichteverteilung im Speicher, so handelt es sich um einen sogenannten passiven Schichtenlader.

Abbildung 147 zeigt den im Demonstrator integrierten strömungsmechanischen Schichtenlader schematisch und als Foto. Der Schichtenlader besitzt fünf Auslässe, die jeweils über siphonartig-geformte Rohre an ein vertikales Hauptverteiltrrohr angeschlossen sind. Ebenfalls weist der Belader keine bewegten Teile oder externen Steuerungs- und Regelungseinrichtungen auf, wodurch von einem wartungsfreien Betrieb über die gesamte Speicherlebensdauer ausgegangen werden kann. Weiterhin stellt Abbildung 147 die Höhen der Temperaturfühler⁴⁸ Tsl1 bis Tsl5 dar, die im Abgang des vertikalen Verteiltrohrs zum jeweiligen Auslass positioniert sind. Der Schichtenlader besitzt eine Höhe von 3,25 m und ist auf mittlerer Höhe im Demonstrator positioniert. Daraus resultiert eine effektive Beladehöhe zwischen 1,5 m und 4,75 m. Das Wasservolumen im Demonstrator variiert abhängig von der Position der Schwimmdecke. Es resultiert eine Wassersäulenhöhe zwischen 5,6 m und 6,6 m.

⁴⁶ Autoren des Abschnittes: Markus Gensbaur, Dominik Bestenlehner, Harald Drück, Fabian Findeisen, Thorsten Urbaneck

⁴⁷ Eigenentwicklung TUC/TT, Patent farmatic tank systems (FTS) (DE 102007056720 B3). Das Funktionsprinzip des im Rahmen des OBSERW-Projekts untersuchten Schichtenladers wurde bereits im Kleinmaßstab erfolgreich untersucht und getestet [71].

⁴⁸ Die Sensorbezeichnungen und -positionen sind im Anhang A erläutert.

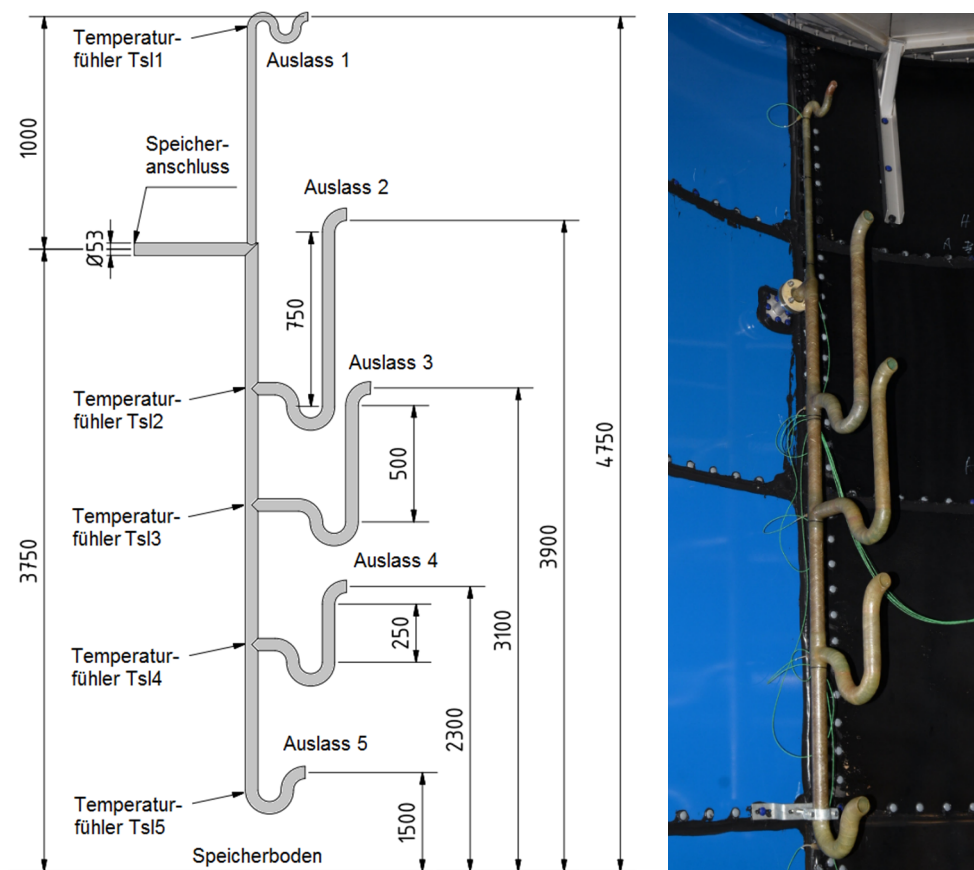


Abbildung 147: Schematische Darstellung des Schichtenladers im Demonstrator mit Maßangaben in mm (links); Foto des Schichtenladers im Demonstrator (rechts)

Im Allgemeinen liegt ein besonderes Augenmerk bei strömungsmechanischen Schichtenladern auf der Vermeidung von Ansaugeffekten (vgl. mit [74]) innerhalb des Schichtenladers sowie von Fehleinströmungen des Beladefluids in den Speicher. Bei der Beladung von Warmwasserspeichern mit Hilfe derartiger Schichtenlader kann es sowohl im Bereich der Auslässe, als auch innerhalb des Schichtenladers zu Mischungseffekten kommen. Erfolgt die Beladung mit einer Vorlauftemperatur, die höher ist als die Temperatur der warmen Zone, so strömt das Beladefluid idealerweise über die Auslässe oberhalb der Übergangsschicht in den Speicher. Ist der Schichtenlader bzw. das Auslassrohr dabei nicht vollständig mit heißem Beladefluid ausgefüllt, bildet sich eine freie Scherschicht zwischen kälterem und heißerem Fluid aus. Entlang dieser Scherschicht wird u. U. Fluid mitgerissen. Dieser Effekt lässt sich qualitativ als sog. Ansaugeffekt klassifizieren. Das Mitreißen von kälterem Fluid in einem Auslassrohr beschreibt den Ansaugeffekt 1.

Als Ansaugeffekt 2 wird bei einer Einschichtung in eine bestehende Schichtung das Ansaugen von Speicherfluid aus höheren Schichten in einen Schichtenlader-Auslass hinein bezeichnet. Neben derartigen Ansaugeffekten kann es auch zu Fehleinströmungen kommen. In diesem Fall erfolgt das Einströmen nicht bzw. nicht allein über den gewünschten Auslass. Dieser befindet sich bei einem Schichtenlader mit diskreten Auslassöffnungen in nächster Nähe zu der Schicht im Speicher mit dem geringsten Temperaturunterschied zum Beladefluid.

8.2.2 Testsequenzen

Die Untersuchung des Schichtenladers im Demonstrator findet mit Hilfe unterschiedlicher Testsequenzen statt. Im Folgenden werden drei Arten von Testsequenzen betrachtet: Sprungprofil, Solarprofil und Realprofil. Diese unterscheiden sich in Beladetemperatur, Beladevolumenstrom und der Beladetemperatur- und Volumenstromänderung während der Sequenz.

Beim Sprungprofil erfolgt zunächst eine Beladung des auf eine homogene Temperatur konditionierten Speichers mit einem konstanten Volumenstrom und einer konstanten Vorlauftemperatur. Sobald die halbe Versuchsdauer bzw. eine ausreichende Speicherbeladung erreicht ist, findet eine Absenkung der Vorlauftemperatur statt. Durch diese Vorlauftemperaturänderung resultiert ein Einschichtvorgang, der den Aufbau einer neuen thermischen Übergangsschicht anregt.

Bei der Testsequenz Solarprofil erfolgt eine Beladung des konditionierten Speichers mit einem konstanten Volumenstrom und einer sich zyklisch ändernden Eintrittstemperatur in den Schichtenlader. Die Temperatur folgt dabei einer Sinusfunktion (positiver Wertebereich) und wiederholt sich in Perioden von 12 Stunden. Die Dynamik der Beladung des Speichers mit der Testsequenz Solarprofil ist dem Anwendungsfall einer solarthermischen Speicherbeladung ohne nächtliche Standby-Phasen nachempfunden. Die zyklische Änderung der Vorlauf- bzw. Eintrittstemperatur des Schichtenladers zwischen anfänglicher Speichertemperatur und max. Beladetemperatur lässt eine Einschichtung von Fluid über die gesamte Schichtladerhöhe erwarten.

Die Beladebedingungen der Testsequenz Realprofil sind der dynamischen Änderung der Eintrittstemperatur bzw. des Volumenstroms bei der Beladung eines im Betrieb befindlichen 30 m³ Warmwasserspeichers nachempfunden, der als Pufferspeicher in einer solarunterstützten Nahwärmanlage betrieben und von einem Solarkollektorfeld beladen wird.

Einen Überblick über alle durchgeführten Testsequenzen, die teilweise mehrere Einzelsequenzen kombinieren, gibt die nachfolgende Tabelle 38. Die Messunsicherheit der für die Auswertung relevanten Messsensoren fasst die Tabelle 34 im Abschnitt 7.2.4 zusammen.

Tabelle 38: Testsequenzen zur Bewertung des Belade- und Einschichtverhaltens des Schichtenladers (Abk. SLV: Schichtenladerversuch)

Benennung	Profil	Volumenstrom	Testsequenzen
SLV1	Sprungprofil	1 m ³ /h	- konstante Anfangstemperatur mit 30 °C - Beladung mit konstanter T _{belvl} von 50 °C - Beladetemperatursprung auf 35 °C (konstant)
SLV2	Solarprofil	1 m ³ /h	- konstante Anfangstemperatur mit 30 °C - Beladung mit Solarprofil (max. T _{belvl} von 50 °C)
SLV3	Solarprofil / Sprungprofil / Sprungprofil	1 m ³ /h	- konstante Anfangstemperatur mit 40 °C - Beladung mit Solarprofil (max. T _{belvl} von 70 °C) - Beladung mit konstanter T _{belvl} von 65 °C - Beladetemperatursprung auf 50 °C - Beladetemperatursprung auf 53 °C
SLV4	Solarprofil / Sprungprofil	2,5 m ³ /h bzw. 1 m ³ /h	- konstante Anfangstemperatur mit 40 °C - Beladung mit Solarprofil (max. T _{belvl} von 70 °C) - Beladung mit konstanter T _{belvl} von 70 °C und reduziertem Volumenstrom (1 m ³ /h)
SLV5	Solarprofil	5 m ³ /h	- konstante Anfangstemperatur mit 40 °C - Beladung mit Solarprofil (max. T _{belvl} von 70 °C)

Benennung	Profil	Volumenstrom	Testsequenzen
SLV6	Sprungprofil / Sprungprofil / Sprungprofil	2,5 m ³ /h bzw. 1 m ³ /h	- konstante Anfangstemperatur mit 30 °C - Beladung mit konstanter T _{belvl} von 50 °C (2,5 m ³ /h) - Beladetemperatursprung auf 35 °C (konstant) - Volumenstromsprung auf 1 m ³ /h
SLV7	Sprungprofil / Sprungprofil	1 m ³ /h	- konstante Anfangstemperatur mit 30 °C - heiße Zone im obersten Speicherbereich von 60 °C - Beladung mit konstanter T _{belvl} von 50 °C - Beladetemperatursprung auf 35 °C (konstant)
SLV8	Realprofil	2,5 m ³ /h bzw. 1 m ³ /h	- konstante Anfangstemperatur mit 30 °C - Beladung mit variabler T _{belvl} und zwei unterschiedlichen Volumenströmen

Die Auswertung der Testsequenzen erfolgt nachstehend mit Hilfe von Speichertemperatur-Höhen-Diagrammen im Zeitverlauf der Versuche. Weiterhin sind die Beladevorlauftemperatur und der Beladevolumenstrom über der Versuchsdauer gezeigt. Zu ausgewählten Zeitpunkten einzelner Versuche ist zusätzlich die theoretisch ideale Temperaturverteilung im Speichertemperatur-Höhen-Diagramm eingetragen. Ein Einfluss der Höhenänderung der Schwimmdecke auf das thermische Verhalten des Schichtenladers wird vernachlässigt, da sich während der Testsequenzen nur eine geringe Höhenänderung ergab (Abschnitt 8.4.1).

8.2.3 Ergebnisse

Im Folgenden werden exemplarisch die Ergebnisse der Schichtenladerversuche SLV1 (Sprungprofil), SLV2 (Solarprofil) und SLV8 (Realprofil) vorgestellt. Die nicht dargestellten Testsequenzen zeigen qualitativ ähnliche Ergebnisse.

In Abbildung 148 ist die Temperaturverteilung über der Speicherhöhe zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Beladung des Demonstrators mit der Testsequenz Sprungprofil SLV1 dargestellt. Der Beladevolumenstrom beträgt konstant 1 m³/h. Weiterhin sind die zeitlichen Verläufe der Vorlauftemperatur und des Volumenstroms⁴⁹ gezeigt. Zunächst erfolgt im oberen Speicherbereich eine Beladung mit einer Vorlauftemperatur von 50 °C, wodurch die Speicherfluidtemperatur oberhalb des Auslasses 2 annähernd gleichmäßig zunimmt. Hieraus kann gefolgert werden, dass das Beladefluid sowohl über Auslass 1, als auch über Auslass 2 in den Speicher gelangt. Gemäß der vorherrschenden Speicher- und Vorlauftemperatur wäre jedoch zu erwarten, dass bei einer idealen Einschichtung das Beladefluid ausschließlich über den obersten Auslass 1 in den Speicher eintritt. Es liegt somit eine Fehleinschichtung über den Auslass 2 vor. Die Fehleinschichtung tritt auch bei den nicht dargestellten Testsequenzen unter anderen Beladebedingungen auf.

⁴⁹ Die kurzzeitige Volumenstromabnahme bzw. Vorlauftemperaturänderung im Zeitraum von Stunde 24 bis Stunde 26 erfolgte aufgrund einer temporären Störung der Regelung der Pumpe P1 bzw. P2 und hat keinen Einfluss auf die Auswertung der Testsequenz hinsichtlich des Schichtungsverhaltens.

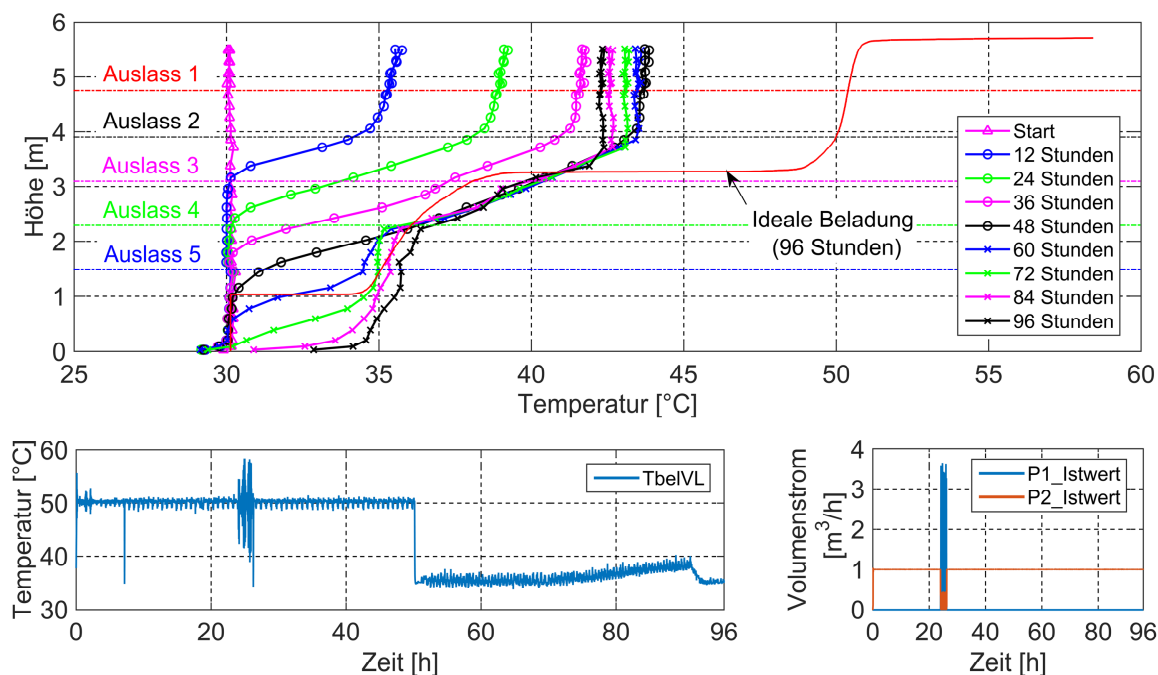


Abbildung 148: Temperaturverteilung im Demonstrator, Vorlauftemperatur und Volumenstrom während der Testsequenz Sprungprofil (Beladevolumenstrom: $1 \text{ m}^3/\text{h}$, Vorlauftemperatur: ca. $50 \text{ }^\circ\text{C}$ bzw. $35 \text{ }^\circ\text{C}$)

Die Temperatur der warmen Zone oberhalb des Auslasses 2 im oberen Speicherbereich nähert sich der Beladevorlauftemperatur asymptotisch an. Dieses Beladeverhalten wird durch das Wasservolumen überhalb des obersten Schichtenlader-Auslasses 1 bzw. das variable Speichervolumen oberhalb des Auslasses 1 aufgrund der Höhenänderung der Schwimmdecke verursacht. Die Fehleinschichtung über den Auslass 2 vergrößert diese Zone bis zur Höhe des Auslasses 2. Aus dem Schichtenlader austretendes Beladefluid führt nicht zum Aufbau einer warmen Zone entsprechend der Vorlauftemperatur, sondern erwärmt das Speichervolumen oberhalb des Auslasses 2 durch Vermischung zwischen Belade- und Speicherfluid annähernd homogen.

Die mit fortschreitender Versuchsdauer größer werdende Übergangsschicht verschiebt und vergrößert sich erwartungsgemäß zu tiefer gelegenen Speicherschichten hin.

Nach einer Versuchsdauer von 50 Stunden erfolgt eine Absenkung der Beladevorlauftemperatur auf $35 \text{ }^\circ\text{C}$ bei gleichbleibendem Volumenstrom. Aufgrund der zu diesem Zeitpunkt im Speicher vorherrschenden Temperaturverteilung ist eine Einschichtung von Beladefluid auf Höhe des Auslasses 4 zu erwarten. Im Speicher resultiert dementsprechend der Aufbau einer zweiten Übergangsschicht mit $35 \text{ }^\circ\text{C}$ unterhalb des Auslasses 4. Der Aufbau dieser Zone mit einer Temperatur annähernd identisch zur Vorlauftemperatur bestätigt, dass die erwartete Betriebsweise des Schichtenladers gemäß seiner Auslegung (Volumenstrom: $1 \text{ m}^3/\text{h}$ und Temperaturdifferenz: 30 K) bei einer Einschichtung von Beladefluid in eine vorhandene Übergangsschicht vorliegt. Dieses gemäß Auslegung erwartete Einschichtverhalten liegt ebenfalls bei anderen Belade- und Speichertemperaturen (vgl. SLV3 und SLV7) vor. Die Zunahme der Temperatur der neu aufgebauten thermischen Übergangsschicht über $35 \text{ }^\circ\text{C}$ zum Ende der Testsequenz resultiert aus einem leichten Anstieg der Vorlauftemperatur ab Stunde 75 und nicht durch Ansaugeffekte und im speziellen nicht durch den Ansaugeffekt 2 im Schichtenlader. Während der Beladung mit der Vorlauftemperatur von $35 \text{ }^\circ\text{C}$ nimmt die Temperatur des Speicherfluids im oberen Speicherbereich ab. Zusätzlich tritt im Speicherbereich oberhalb des Auslasses 2 ein Abbau der schwach ausgeprägten, annähernd linearen Temperaturzunahme mit der Speicherhöhe bzw. eine annähernd vollständige Homogenisierung der Temperatur auf.

Der weitere zeitliche Verlauf der Temperaturänderung lässt die Vermutung zu, dass dieses Verhalten durch Wärmeverluste sowie durch Mischungsvorgänge innerhalb des Speicherfluids und nicht durch Fehleinströmungen oder Ansaugeffekte verursacht wird. Diese Mischungsvorgänge sind auf verstärkte Fallströmungen an der Behälterwand (Abschnitt 8.4.4) zurückzuführen.

Der Vergleich der Temperaturverteilung im Demonstrator zum Ende der Testsequenz mit der theoretisch idealen thermischen Schichtung⁵⁰ zeigt, dass durch Wärmeverluste im oberen Speicherbereich, Fehleinströmungen und Mischungsvorgänge einen Differenz von ca. 7 K in der warmen Zone zwischen theoretisch möglicher und tatsächlicher, maximaler Speichertemperatur vorliegt. Weiterhin ist eine nicht vorgesehene Temperaturerhöhung bis zu einer Speicherhöhe von 1 m ersichtlich, die zu einem vorzeitigen Anstieg der Rücklaufemperatur führt. Das Auftreten der Ansaugeffekte 1 und 2 bei der Testsequenz Sprungprofil kann nicht abschließend ausgeschlossen werden. Ein möglicher Einfluss dieser Effekte scheint aber im Hinblick auf das Belade- und Einschichtverhalten zunächst von untergeordneter Bedeutung.

Abbildung 149 zeigt die Temperaturverteilung über der Speicherhöhe zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Beladung des Demonstrators mit der Testsequenz Solarprofil (SLV2). Weiterhin sind der zeitliche Verlauf der Beladevorlaufemperatur und des Volumenstroms abgebildet. Der Beladevolumenstrom betrug 1 m³/h.

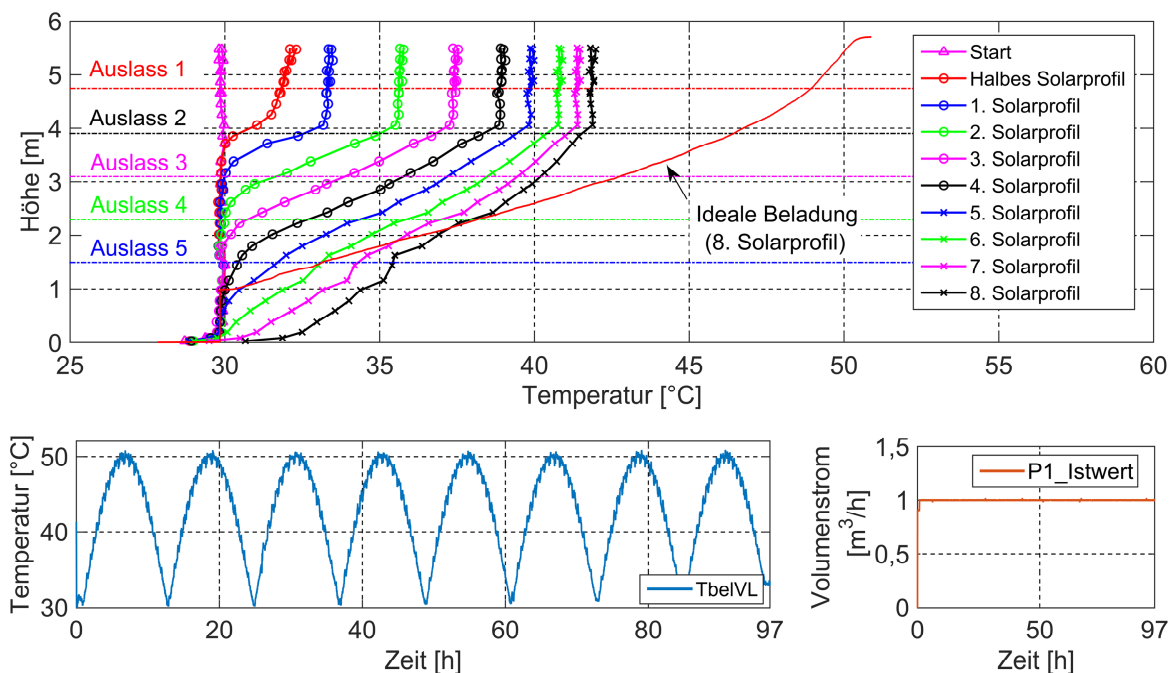


Abbildung 149: Temperaturverteilung im Demonstrator, Vorlaufemperatur und Volumenstrom während der Testsequenz Solarprofil (Beladevolumenstrom: 1 m³/h, Vorlaufemperatur: acht Solarprofile mit einer Maximaltemperatur von ca. 50 °C und einer Minimaltemperatur von ca. 30 °C)

Ähnlich zur Testsequenz Sprungprofil SLV1 baut sich eine warme Zone oberhalb von Auslass 2 auf. Die am Ende der Versuchsdauer erreichte Maximaltemperatur in der warmen Zone liegt ca. 8 K unterhalb der Maximaltemperatur des Solarprofils. An die warme Zone schließt die Übergangsschicht an, die mit zunehmender Versuchsdauer in Richtung tiefer gelegener Schichten anwächst. Die Steigung des Temperaturprofils in der Übergangsschicht ist nach der

⁵⁰ Bei der theoretisch idealen thermischen Schichtung werden alle Mischungsvorgänge bzw. Wärmeverluste während der Versuchsdauer vernachlässigt und es gilt die Annahme einer inversionslagenfreien Temperaturverteilung.

Versuchsdauer von 50 h größer als beim Sprungprofil. Die größere Übergangsschicht im Vergleich zum Sprungprofil resultiert aus der dynamischen Änderung der Beladevorlauftemperatur des Solarprofils. Der Vergleich der Temperaturverteilung im Demonstrator zum Ende des achten Solarprofils mit der theoretisch idealen thermischen Schichtung zeigt ähnliche Defizite beim Aufbau und Erhalt der thermischen Schichtung, wie beim Betrieb des Schichtenladers mit der Testsequenz Sprungprofil.

Abbildung 150 stellt die Vorlauftemperatur und die Temperaturen der Temperaturfühler Tsl1 bis Tsl5 innerhalb des Schichtenladers für das erste und das sechste Solarprofil während der Beladung des Demonstrators mit der Testsequenz Solarprofil SLV2 dar.

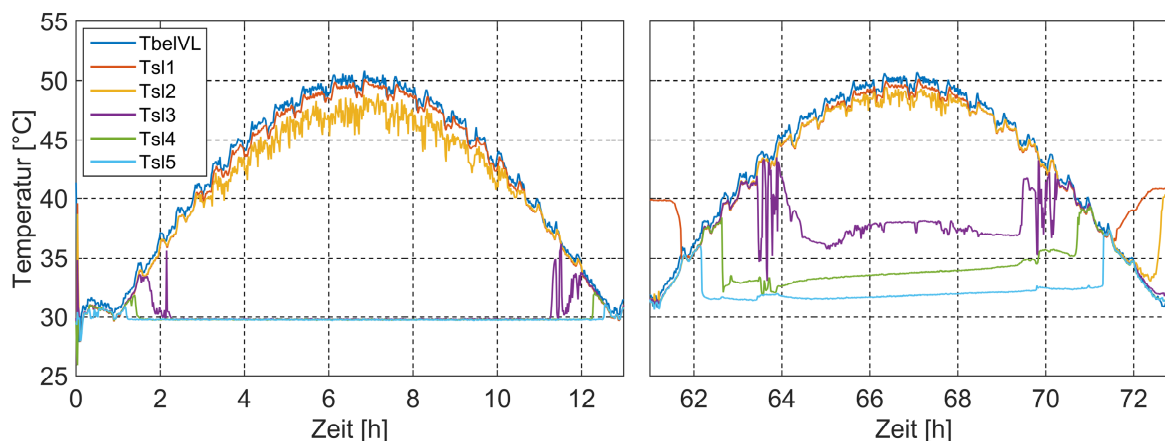


Abbildung 150: Vorlauftemperatur im Demonstrator und Temperatur im Schichtenlader während der ersten (links) und sechsten (rechts) parabolähnlichen Vorlauftemperaturänderung der Testsequenz Solarprofil SLV2

Die Analyse der Temperaturmessstellen innerhalb des Schichtenladers zeigt, dass die Temperaturen an den Temperaturfühlern Tsl1 und Tsl5 entweder der Vorlauftemperatur oder der Speicherfluidtemperatur auf entsprechender Höhe folgen. Dies ist abhängig davon, ob das Beladefluid den Abgang des entsprechenden Auslasses erreicht. In Abbildung 150 ist ersichtlich, dass die Sensortemperaturen Tsl1 und Tsl2 (Auslass 1 und Auslass 2) überwiegend die Temperatur des Vorlaufs annehmen. Dies bestärkt die Vermutung des Auftretens einer Fehleinströmung⁵¹ über den Auslass 2. Mit zunehmender Versuchsdauer steigt die mittlere Speichertemperatur und die Temperaturfühler Tsl3 bis Tsl5 nehmen ebenfalls häufiger die Vorlauftemperatur und seltener die Speichertemperatur auf der entsprechenden Höhe an. Dies deutet auf eine verstärkte Beladung über die zu diesen Temperaturfühlern gehörenden Auslässe im Schichtenlader hin und entspricht dessen erwarteter Funktionsweise bei steigender mittlerer Speichertemperatur während des Solarprofils.

Abbildung 151 zeigt abschließend die Temperaturverteilung über der Speicherhöhe zu unterschiedlichen Zeitpunkten während der Beladung des Demonstrators mit der Testsequenz Realprofil (SLV8). Weiterhin sind der zeitliche Verlauf der Beladevorlauftemperatur und der zeitliche Verlauf des Volumenstroms abgebildet. Die Testsequenz dient insbesondere der Untersuchung des Einflusses dynamischer Änderungen der Beladevorlauftemperatur und des Beladevolumenstroms auf das Schichtungsverhalten des Schichtenladers.

⁵¹ Identische Temperaturwerte für die Temperaturfühler Tsl1 bis Tsl5 und des Vorlaufs sind nur ein erstes Indiz für eine Fehleinströmung über den entsprechenden Auslass, da die vom Hauptrohr abgehenden siphon-artig geformten Rohre ein weiteres Hemmnis für Fehleinströmungen darstellen.

Die Auswertung in Abbildung 151 erfolgt durch Vergleich ausgewählter Zeitpunkte der Speichertemperaturverteilung mit der ideal möglichen Schichtung zu diesem Zeitpunkt. Es ist ersichtlich, dass besonders bei hohen Volumenströmen ($2,5 \text{ m}^3/\text{h}$) und einer hohen Dynamik der Vorlauftemperaturänderung, z. B. im Zeitbereich bis Stunde 7, eine Beladung über die gesamte Speicherhöhe stattfindet, die bei einer idealen thermischen Beladung nicht vorliegen würde. Weiterhin verhindern verstärkte Wärmeverluste am Schwimmdecken-Ringraum bzw. der Speicherwand und vorhandene Mischungsvorgänge im oberen Bereich des Speichers den Aufbau eine Temperaturverteilung in der warmen Zone entsprechend der idealen thermischen Schichtung.

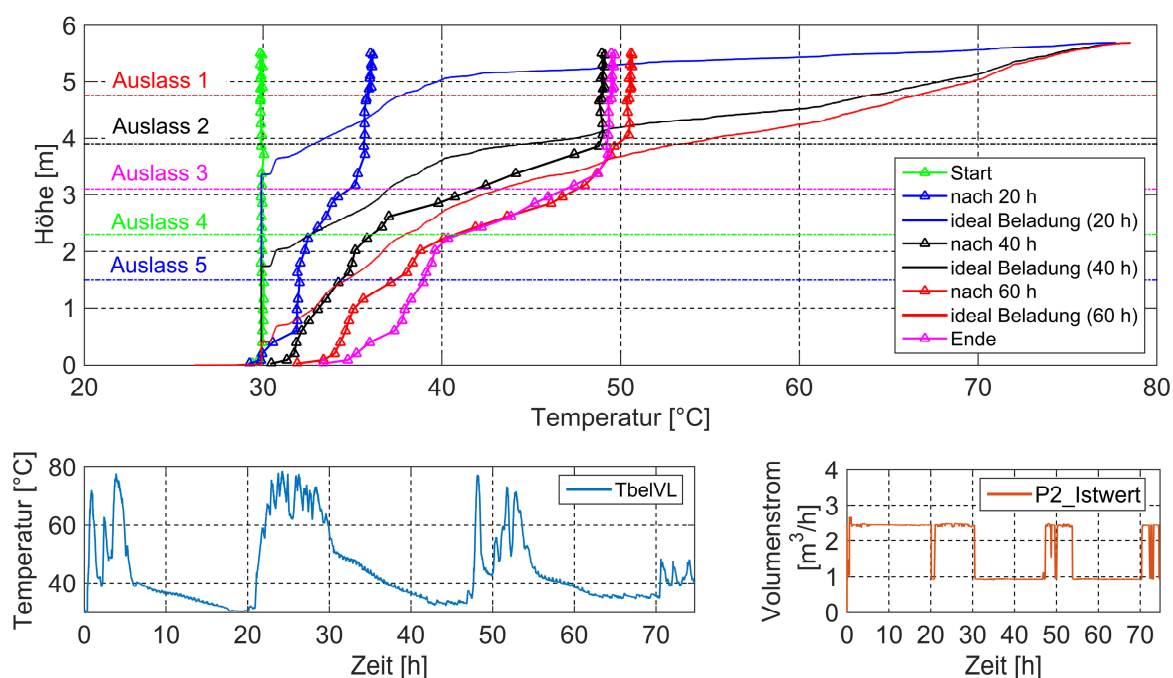


Abbildung 151: Temperaturverteilung im Demonstrator während der Testsequenz Realprofil (Beladevolumenstrom: $1 \text{ m}^3/\text{h}$ bzw. $2,5 \text{ m}^3/\text{h}$, Vorlauftemperatur: dynamisch Änderung zwischen der Minimaltemperatur von 30°C und der Maximaltemperatur von ca. 80°C)

8.2.4 Fazit

Der vorliegende Abschnitt stellt experimentelle Untersuchungen zur Beladung eines großvolumigen Warmwasserspeichers mit einem Schichtenlader unter verschiedenen Betriebsbedingungen (Testsequenzen) dar und bewertet ausgewählte Ergebnisse hinsichtlich der Funktionsweise des Schichtenladers.

Die Testsequenzen am Demonstrator verdeutlichen, dass der Schichtenlader mit einer effektiven Beladehöhe von $3,25 \text{ m}$ in großvolumigen Warmwasserspeichern nur zum Teil gemäß der ursprünglichen Planung mittels CFD-Simulationen (Abschnitt 5) funktioniert (Zielgröße $> 4 \text{ m}$). Teilweise treten beim Betrieb des Schichtenladers Fehleinschichtungen auf. Zusätzlich liegt ein bedeutender Einfluss der Wärmeverluste am Ringraum der Schwimmdecke auf die thermische Schichtung vor (Abschnitt 8.4). Der Einfluss der Wärmeverluste erklärt die starken Abweichungen zwischen dem erwarteten thermischen Betriebsverhalten des Schichtenladers und den numerischen Voruntersuchungen. Ein relevanter Einfluss von Ansaugeffekten auf das Belade- und Einschichtverhalten kann nicht identifiziert werden.

Dennoch ist die analytische Auslegung des Schichtenladers nach [73] als erfolgreich⁵² durchgeführt zu bewerten, da die grundsätzlich erwartete Betriebsweise des Schichtenladers in den Testsequenzen vorliegt und die identifizierten Defizite z. T. auf äußere Einflüsse zurückgeführt werden können.

Zukünftige Arbeiten befassen sich mit der Optimierung des Aufbaus der warmen Zone beim Beladevorgang. Die warme Zone kann durch eine verbesserte Wärmedämmung (siehe Abschnitt 8.4.4) des Ringraums oder eine neue Positionierung des Schichtenladers direkt unterhalb oder an der Schwimmdecke erreicht werden. Weiterhin sind die Fehleinströmungen über den Auslass 2 zu vermeiden. Hierzu sind eine Anpassung des analytischen Auslegungsleitfadens und weitere CFD-basierte und experimentelle Untersuchungen erforderlich.

8.3 Werkstoffbeständigkeit der Wandsegmente und Dichtstoffe⁵³

8.3.1 Langzeit-Beständigkeit

Die im Labor getesteten Beschichtungen aus Abschnitt 2 kamen auch am Demonstrator zum Einsatz. Zusätzlich wurde eine Beschichtung der Firma JOTUN® mit der Bezeichnung Epoxy-HR eingesetzt. Tabelle 39 benennt nochmals die verwendeten Materialien.

Tabelle 39: Übersicht zu den Beschichtungen der Segmente am Demonstrator

Bezeichnung der Oberflächenbeschichtung	Hersteller	Materialart
Proguard CN200	Ceramic Polymer	Epoxidharz-Fluid mit Keramik-Partikeln
Ecofusion® Außenbeschichtung (e)	Permastore®	Email
Ecofusion® Innenbeschichtung (i)	Permastore®	Email
Fusion® V1100 Außenbeschichtung (e)	Permastore®	Epoxy-Pulver
Fusion® V1100 Innenbeschichtung (i)	Permastore®	Epoxy-Pulver
Painted Epoxy	Permastore®	Epoxidharz
Tanguard Storage	JOTUN®	Epoxidharz
Epoxy-HR	JOTUN®	Epoxidharz u.a.

Nach ca. einem Jahr Betrieb mit Temperaturbeanspruchungen von teilweise bis zu 92 °C zeigten alle Beschichtungen, bis auf das Produkt Painted Epoxy, keine sichtbaren Veränderungen. Diese Beschichtungen können daher als geeigneter Korrosionsschutz der Stahlsegmente in Warmwasserspeichern gelten. Abbildung 152 zeigt zu den oben genannten Aussagen exemplarisch zwei Vergleiche. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich auf der gesamten Oberfläche an der Speicherinnenwand bei der Painted Epoxy-Beschichtung Blasen gebildet haben (vgl. mit Detailaufnahme Abbildung 153). Es befinden sich auch Blasen bei der Beschichtung unter dem Dichtstoff. Die Blasen sind mit Wasser gefüllt und teilweise aufgeplatzt. Dieses Verhalten entspricht nicht den Anforderungen eines Langzeitbetriebs und wird in diesem Rahmen als

⁵² Dieser Sachverhalt ist dahingehend von Bedeutung, dass durch die Anwendung eines Auslegungsleitfadens ein Verzicht auf sonst typische Skalierungs-Experimente im Modellmaßstab während der Planungsphase eines Schichtenladers möglich ist.

⁵³ Autoren des Abschnittes: Jan Mücke, Markus Gensbaur, Thorsten Urbaneck, Robert Beyer

Versagen der Beschichtung mit potentiell signifikanter Auswirkung auf die Dichtung der Segmente angesehen. Die Beschichtung Proguard CN200 hingegen erscheint beispielsweise unverändert⁵⁴.

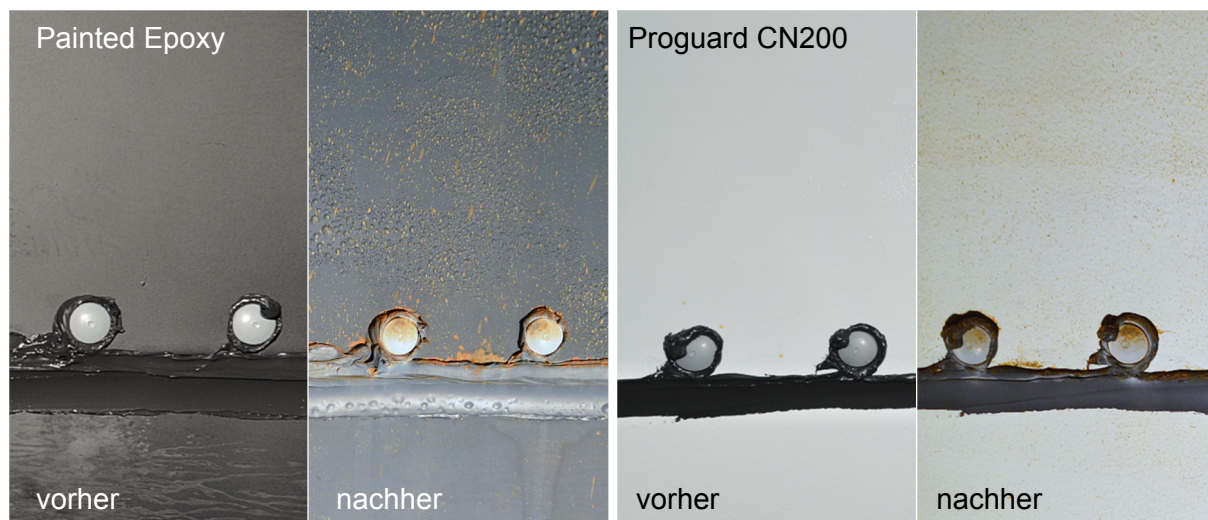


Abbildung 152: Vergleich von zwei Beschichtungen vor den Tests und nach ca. einem Jahr Testbetrieb des Demonstrators, Painted Epoxy als nicht geeignete Beschichtung (links), Proguard CN200 als Beispiel für eine geeignete Beschichtung (rechts)



Abbildung 153: Detailaufnahme der Blasenbildung bei der Beschichtung Painted Epoxy an der Demonstratorinnenwand

8.3.2 Kurzzeit-Beständigkeit bei hohen Temperaturen (Heißversuch)

Neben der Beanspruchung der Materialien durch den allgemeinen Versuchsbetrieb erfolgte die Analyse der Kurzzeit-Beständigkeit der Dichtstoffe im Wandaufbau gegenüber einer maximalen Temperaturbeanspruchung durch das Speichermedium mithilfe eines sog. Heißversuchs. Tabelle 40 fasst die Versuchsrandbedingungen des Heißversuchs zusammen.

⁵⁴ Es kommt nur zu einer farblichen Veränderung. Dies kann auf die Ablagerung von Rost aus der Anlage zurückgeführt werden.

Tabelle 40: Testsequenzen zur Analyse der Beständigkeit der Dichtstoffe bei hohen Temperaturen (Abk. HV: Heißversuch)

Benennung	Versuchsdauer	Randbedingungen
HV1	2 Tage	- geschichtete Anfangstemperaturverteilung ($T_{Sp,max} = 83\text{ °C}$, $T_{Sp,min} = 45\text{ °C}$, drei Übergangszonen) - Beladevolumenstrom $\leq 3\text{ m}^3/\text{h}$ - mittlere Vorlauftemperatur $T_{belvl} = 95,5\text{ °C}$ - anschließende Auskühlung bis $T_{Sp,max} < 89\text{ °C}$

Abbildung 154 stellt die Temperaturverteilung über der Höhe des Demonstrators zu ausgewählten Zeitpunkten des Heißversuchs, die Beladevorlauftemperatur und den Beladevolumenstrom dar. Nach der Beladung folgt eine 11-stündige Stillstandsphase bis die maximal vorherrschende Speichertemperatur unter 89 °C fällt. Es gilt zu beachten, dass die Temperatur-Belastung während des Heißversuchs nur über einen kurzen Zeitraum und in einem lokal begrenzten Speicherhöhenbereich (vgl. mit Anhang B) vorliegt.

Eine Analyse der Temperatur- und Feuchtesensoren im Wand- und Deckenaufbau während und nach des Heißversuchs gibt keine Hinweise auf das Vorhandensein von Undichtigkeiten. Thermische Spannungen und daraus resultierende Dehnungen zwischen den verschraubten Wandsegmenten führen ebenfalls zu keinen offensichtlichen Leckagen. Der verwendete Dichtstoff, Sikasil AS70, sowie die thermische Bremse und die flexible Abdichtung erscheinen nach diesem Test unverändert.

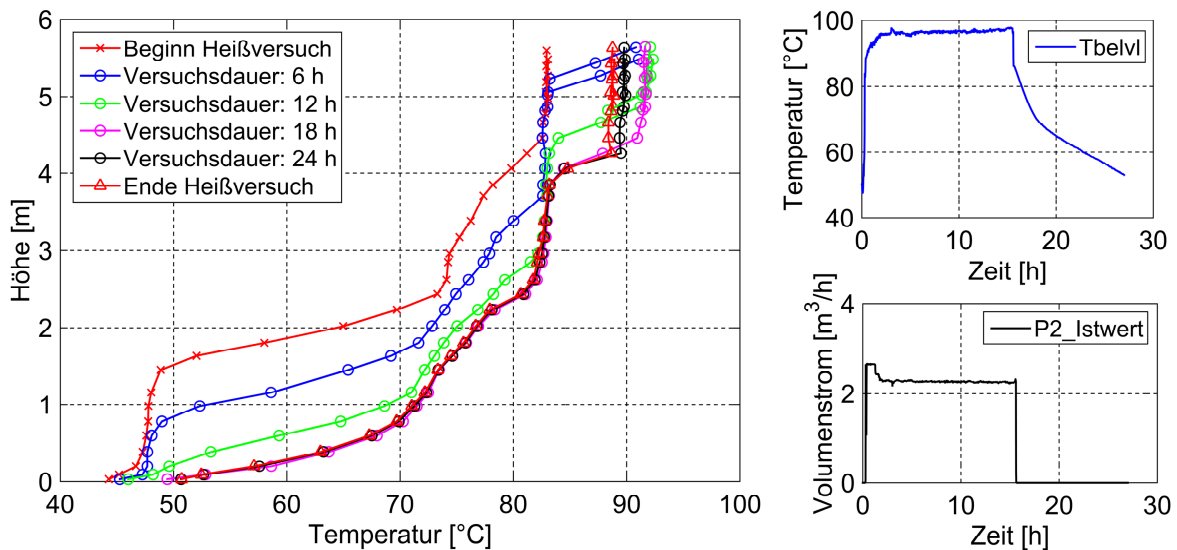


Abbildung 154: Temperaturverteilung über der Speicherhöhe (links), Beladevorlauftemperatur (rechts oben) und Beladevolumenstrom (rechts unten) während des Heißversuchs HV1

Auch die Dichtnaht zwischen dem Bodenblech und den Wandsegmenten erscheint unverändert. Abbildung 155 zeigt einen Vergleich eines Ausschnitts vor und nach dem ca. einjährigen Betrieb. Es sind zwar Verschmutzungen und teilweise Verfärbungen durch das Speicherwasser zu erkennen, diese schränken die Funktion aber nicht ein. Der Heißversuch zur Kurzzeit-Beständigkeit ist daher als erfolgreich absolviert zu bewerten.



Abbildung 155: Vergleich einer Dichtnaht zwischen dem Bodenblech und zwei Wandsegmenten am Demonstrator vor Erstbefüllung und nach ca. einjährigem Betrieb (Wandsegmentmaterialien: Proguard CN200 und Fusion V1100)

8.4 Externe Wärmeverluste⁵⁵

Eine weitere Zielstellung der experimentellen Untersuchung des Demonstrators ist die Analyse der externen Wärmeverluste. Die Kombination verschiedener Bewertungsmethoden ermöglicht eine differenzierte Analyse der Wärmeverluste im Wand-, Decken- und Bodenbereich und damit die Quantifizierung des Einflusses von Wärmebrücken. Zur Auswertung werden unter definierten Randbedingungen durchgeführte Testsequenzen verwendet. Es erfolgt eine Verknüpfung der experimentellen Ergebnisse am Demonstrator zu vorangegangenen Laborversuchen und CFD-Simulationen.

Neben der Methode der modellgestützten Parameteridentifikation (Abschnitt 8.4.1) ergänzen verschiedene Detailuntersuchungen die Bewertung der externen Wärmeverluste des Demonstrators. Diese umfassen zum einen die Identifikation von Wärmebrücken unter Zuhilfenahme von Thermografie-Aufnahmen (Abschnitt 8.4.2) und den Vergleich von berechneten Wärmeleitfähigkeiten im Wand- und Deckenaufbau des Demonstrators zu Labor- und Literaturwerten (Abschnitt 8.4.3). Hierdurch erfolgt die Überprüfung, in wie weit die Auslegungswerte der Wärmedämmung auch im Einbauzustand zutreffend sind. Zum anderen wird mithilfe weiterer Auskühlversuche (AKV) unter speziellen Speicherbedingungen der Einfluss der Schwimmdecke und des Schwimmdeckenringraums auf das thermische Verhalten des Demonstrators untersucht (Abschnitt 8.4.4). Abschließend erfolgt die Bewertung des Solarstrahlungseinflusses auf die Temperatur der Speicheraußenwand (Abschnitt 8.4.5).

Im Folgenden werden Bewertungsmethoden für die Untersuchung der Wärmeverluste von großen Warmwasserspeichern vorgestellt. Diese können hinsichtlich quantitativer Methoden und qualitativer Methoden unterschieden werden. Abbildung 156 zeigt eine Auswahl von typischen Bewertungsmethoden der beiden Kategorien. Für große Warmwasserspeicher unterscheiden sich diese Methoden z. T. stark von den Methoden für kleine Warmwasserspeicher, da Großspeicher i. d. R. Einzelanfertigungen sind und deren Prüfung nicht sinnvoll in einer Laborumgebung stattfinden kann.

⁵⁵ Autoren des Abschnittes: Markus Gensbaur, Dominik Bestenlehner, Harald Drück

Eine häufig angewandte, quantitative Auswertemethode ist die modellgestützte Parameteridentifikation (vgl. mit [96]). Bei dieser wird eine zu bestimmende Kenngröße durch den Vergleich des thermischen Verhaltens von Modell und realem Speicher ermittelt. Die Wärmeverlustrate⁵⁶ des Speichers stellt eine derartige und für Warmwasserspeicher typische Kenngröße dar. Eine ausführliche Erläuterung der bei der modellgestützten Parameteridentifikation angewandten Modelle gibt der nachfolgende Abschnitt. Weitere quantitative Methoden zur Bewertung großer Warmwasserspeicher, die jedoch im Rahmen dieses Abschnitts keine Anwendung finden, sind Vergleichsrechnungen mit Mehrknotenmodellen (k-l-m-Knoten-Modelle) oder CFD-Simulationen [20], [21], [22], [52] und Insitu-Bewertungsverfahren [86] gesamter Wärmeversorgungsanlagen.

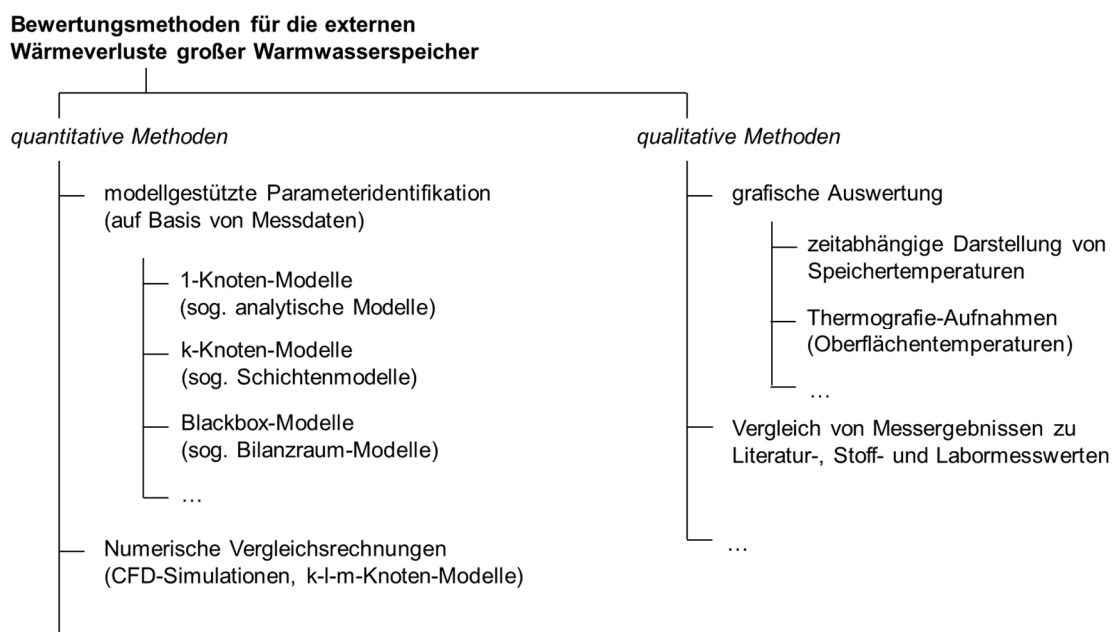


Abbildung 156: Überblick zu den im Folgenden betrachteten Bewertungsmethoden für die externen Wärmeverluste großer Warmwasserspeicher auf Basis von Messdaten⁵⁷

Neben Methoden zur quantitativen Bewertung existieren auch Methoden zur qualitativen Bewertung, die insbesondere Erkenntnisse durch den Vergleich ähnlicher Versuche unter anderen Randbedingungen (z. B. nach Umbaumaßnahmen) zulassen. Hierzu zählen u. a. die zeitabhängige Darstellung der Speicherinnentemperaturen und die Erstellung von Thermografie-Aufnahmen der Speicheroberflächentemperaturen im Tagesgang. Die grafische Auswertung der Temperaturverteilung über der Speicherhöhe in Form von Kurvenscharen ermöglicht z. B. die Identifikation von Wärmebrücken, die zu einer verstärkten Temperaturabnahme nahe der Schwimmdecke oder am Speicherboden führen. Der Vergleich von Kennwerten, die auf Basis

⁵⁶ Die Wärmeverlustrate ist eine Kenngröße zur Berechnung des Wärmeverluststroms vom Speichermedium zur Umgebung in Abhängigkeit von der Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung. Es gilt z. B. für die Gesamtwärmeverluste eines Speicher die Gleichung: $\dot{Q}_{\text{ges}} = (UA)_{\text{ges}} \cdot (T_{\text{Sp,m}} - T_{\text{amb}})$. Die Wärmeverlustrate kann ebenfalls für individuelle Flächen, z. B. die Speicherwand, den Speicherdeckel und den Speicherboden, angegeben werden.

⁵⁷ Die Darstellung der Bewertungsmethoden erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, vielmehr wird eine Einordnung der angewandten Methoden im Rahmen des hier vorliegenden Berichts gegeben. In der nachfolgenden Auswertung werden ausschließlich Messdaten von Auskühlversuchen genutzt. Bei Messdaten von z. B. Versuchen mit konstanter Durchströmung am Speicher tritt im Regelfall eine zu geringe Speichertemperaturabnahme im Vergleich zur Unsicherheit der Temperatursensoren auf, sodass nur eine stark fehlerbehaftete Bestimmung der Wärmeverluste möglich ist.

von Messwerten bestimmt werden, mit Stoffwerten aus der Literatur und Labormessungen stellt ebenfalls eine Möglichkeit zur qualitativen Bewertung dar. Diese wird für den Demonstrator in Abschnitt 8.4.3 für die effektive Wärmeleitfähigkeit im Wand- und Deckenbereich angewandt. Insbesondere der Vergleich der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten zu den Planungswerten der Wärmedämmung ist von Interesse.

8.4.1 Analyse der Wärmeverluste mit Hilfe von Testsequenzen

Der nachfolgende Abschnitt stellt die für die Bewertung des Demonstrators genutzten Testsequenzen und deren Auswertung hinsichtlich der Kenngröße Wärmeverlustrate dar. Weiterhin wird das thermische Speicherverhalten während der Auskühlversuche analysiert und eine modellgestützte Bewertung der Wärmeverluste vorgenommen.

Testsequenzen

Die Bestimmung der Wärmeverlustrate erfolgt mit den Demonstrator-Testsequenzen nach Tabelle 41. Die Testsequenzen unterscheiden sich in Starttemperaturverteilung, Beladezustand und Auskühldauer. Eine Erläuterung zur Positionierung und Benennung der Messsensoren ist Abschnitt 7.2.4 zu entnehmen. Die Messunsicherheit der für die Auswertung relevanten Sensoren fasst ebenfalls Abschnitt 7.2.4 zusammen.

Tabelle 41: Testsequenzen zur Bewertung der externen Wärmeverluste

Benennung	Versuchsdauer	Randbedingungen
AKV1	12 Tage	konstante Anfangstemperaturverteilung mit 30 °C
AKV2	22 Tage	inkonstante Anfangstemperaturverteilung mit 50 °C in der oberen Speicherhälfte und 30 °C in der unteren Speicherhälfte
AKV3	13 Tage	inkonstante Anfangstemperaturverteilung mit 70 °C in der oberen Speicherhälfte und 30 °C in der unteren Speicherhälfte
AKV4	13 Tage	konstante Anfangstemperaturverteilung mit 50 °C

Methodik der Parameterbestimmung

Das allgemeine Vorgehen bei einer modellgestützten Parameteridentifikation zeigt Abbildung 157. Mit identischen Eingangs-/Randbedingungen werden durch Berechnung (Modell) und Messung (Demonstrator) Größen ermittelt, die eine Bestimmung einer Zielfunktion ermöglichen. Eine Zielfunktion stellt im Rahmen dieses Vorgehens eine geeignete Kenngröße dar, die eine Bewertung der Übereinstimmung zwischen Modell und Experiment erlaubt. Liegt keine ausreichende Übereinstimmung vor, werden die Modellgrößen variiert. Modellgrößen sind z. B. die geometrischen Speichermaße und die Wärmeverlustrate. Speichermodelle zur Bestimmung der Wärmeverlustrate im Rahmen einer modellgestützten Parameteridentifikation besitzen unterschiedliche Detaillierungsgrade. Dies betrifft u. a. die Möglichkeit zur differenzierten Betrachtung der Wand-, Decken- und Bodenwärmeverluste. Einfache Modelle, wie z. B. Bilanzraum-Modelle, erlauben i. d. R. nur eine Bestimmung der Gesamtwärmeverlustrate. Im Gegensatz dazu ermöglichen Schichtenmodelle (unter Annahme einer ausreichenden Modellkomplexität und geeigneter experimenteller Daten) die differenzierte Bestimmung der Wand-, Decken- und Bodenwärmeverlustrate.

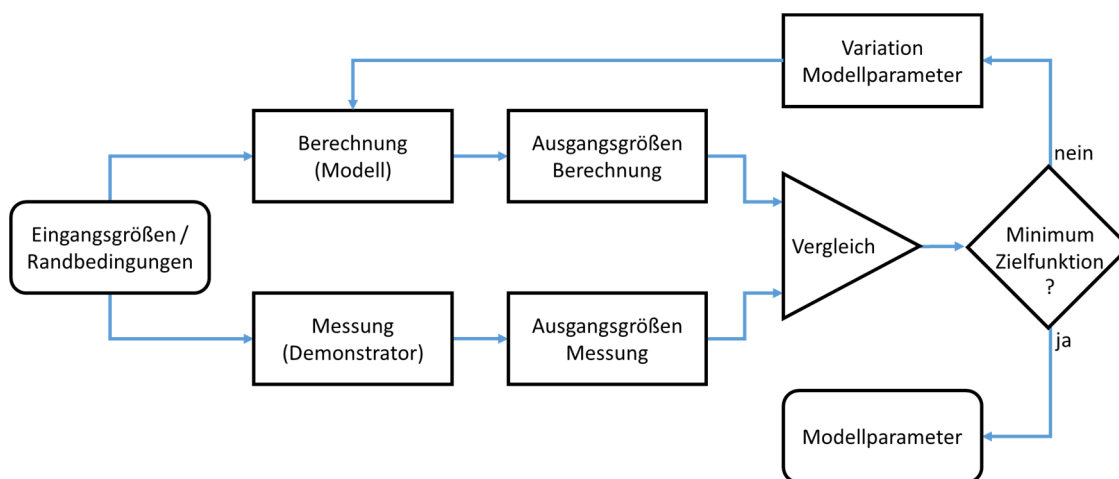


Abbildung 157: Allgemeines Vorgehen bei einer modellgestützten Parameteridentifikation nach [96] zur Modellierung des thermischen Verhaltens eines Warmwasserspeichers

Auf eine umfangreichere Erläuterung der modellgestützten Parameteridentifikation wird an dieser Stelle verzichtet und auf weiterführende Literatur verwiesen. Das Vorgehen wird z. B. in [96], [97] und [99] für solarthermische Komponenten erläutert.

Das im Folgenden angewandte Vorgehen bei der modellgestützte Parameteridentifikation nach [93] für Schichtenmodelle stellt eine allg. Methode zur Ermittlung von Speicherkenngößen, z. B. der Wärmeverlustrate, dar. Für kleine solarthermische Warmwasserspeicher ($< 5 \text{ m}^3$) ist ein vergleichbares Vorgehen genormt und Stand der Technik [91], [92], jedoch nicht unmittelbar auf Großspeicher übertragbar. Eine mögliche Erweiterung des Vorgehens für Großspeicher zeigen z. B. [89] und [93]. Der maßgebliche Unterschied eines Verfahrens für Großspeicher im Vergleich zu einem Verfahren für kleinvolumige Speicher nach [91] und [92] ist, dass die Zielgröße des Parameteridentifikationsverfahrens i. d. R. mit Messwerten von im Speicher integrierten Temperatursensoren und nicht basierend auf den bilanzierten Belade- und Entladewärmeströmen am Speicher bestimmt wird. Im Rahmen der vorliegenden Untersuchung wird die Software TRNSYS 17 bzw. ein modifiziertes Multiport Store-Modell^{58,59} von [95] für das Parameteridentifikationsverfahren genutzt.

Die modellgestützte Parameterbestimmung mit 1-Knoten-Modellen (z. B. nach [87] und [88]) nutzt einfache Speichermodelle um die gesuchten Kenngößen zu ermitteln. Häufig ist dies die Gesamtwärmeverlustrate des Speichers. Die Berechnung geschieht i. d. R. ohne die Anwendung iterativer Verfahren (vgl. Abbildung 157) zur Lösung der Modellgleichung. In einfachsten Fall ist eine explizite Lösung der Modellgleichung möglich. Eine theoretische Aufteilung der mit 1-Knoten-Modellen ermittelten Gesamtwärmeverlustrate des Speichers gemäß den geometri-

⁵⁸ Die wesentlichen Modifikationen des Multiport Store-Modell (vgl. [96]) sind (a) die Erhöhung der Knotenanzahlbegrenzung von 200 auf 1000 aufgrund der größeren Höhe der im Rahmen dieses Berichts betrachteten Speicher, (b) die Möglichkeit zur Vorgabe einer nicht homogenen Temperaturverteilung zum Startzeitpunkt der Simulation (kubische Polynom-Funktion), (c) die Möglichkeit zur Vorgabe einer individuellen Boden-, Decken- und Mantelumgebungstemperatur, (d) die Berücksichtigung von strahlungsverursachten Umgebungseinflüssen auf die Speicheroberflächentemperatur (vgl. [93]) und (e) die Implementierung von temperaturabhängigen Stoffwerten für das Speicherfluid Wasser (Dichte und spez. Wärmekapazität).

⁵⁹ Die Speichermodellierung vernachlässigt die Höhenänderung der Schwimmdecke, da diese während der Auskühlversuche nur gering ausfällt ($< 5 \text{ cm}$). Ebenfalls erfolgt ein Verzicht auf die explizite Berücksichtigung der Speicheroberflächentemperatur bei der Parameteridentifikation (siehe Abschnitt 8.4.5), da für die energetische Betrachtung in dem hier vorliegenden Fall die Annahme der Oberflächentemperatur als Umgebungslufttemperatur T_{a1} ausreichend ist.

schen Verhältnissen von Wand, Boden und Decke führt i. d. R. jedoch nicht zu plausiblen Ergebnissen, da der Einfluss von Wärmebrücken hierbei außer Acht gelassen wird. Im Folgenden wird das 1-Knotenmodell bzw. die Auswertemethodik nach [88] für die Parameterbestimmung der Gesamtwärmeverlustrate genutzt.

Bei der modellgestützten Parameterbestimmung mit Bilanzraum-Modellen werden geeignete Bilanzgrenzen und -zeiträume genutzt, um über die Differenz der zu- und abgeführten Energieströme in den Bilanzraum die Energieverluste während der Betrachtungszeit zu bestimmen. Diese lassen sich über eine mittlere Temperaturdifferenz vom Speichermedium zur Umgebung in eine Gesamtwärmeverlustrate des Speichers umrechnen. Im Gegensatz zur modellgestützten Parameteridentifikation mit 1- und k-Knoten-Modellen sind bei diesem Verfahren keine Temperaturfühler im Inneren des Speichers erforderlich. Es sind ausschließlich die Belade- und Entladeenergieströme zu erfassen, jedoch ist vor und nach der Auskühlung eine Konditionierung des Speichers auf einen Referenzzustand erforderlich.

Grafische Auswertung

Abbildung 158 stellt die Temperaturverteilung über der Speicherhöhe und verschiedene Umgebungsbedingungen des Demonstrators während des AKV2 dar. Das obere Speicherdrittel zeigt eine von der Höhe unabhängige sowie mit zunehmender Versuchsdauer verlangsamte Auskühlung, während im restlichen Speicherbereich der Aufbau einer annähernd linearen Temperaturverteilung über der Speicherhöhe stattfindet. Im mittleren Speicherbereich tritt sowohl eine Temperaturabnahme als auch Temperaturzunahme auf. Der Aufbau einer linearen Temperaturverteilung resultiert aus Wärmeleitungs- und Konvektionsvorgängen im Speichermedium⁶⁰. Die Temperaturabnahme in Bodennähe fällt geringer aus als im deckennahen Bereich. Der Erhalt der über der Speicherhöhe annähernd konstanten Temperatur im oberen Speicherbereich (> 3 m) erklärt sich durch das Auftreten von Wärmeverlusten im Ringraum zwischen Schwimmdecke und innerer Behälterwand bzw. daraus resultierenden verstärkten Mischungsvorgängen durch Fallströmungen an der Behälterwand (Abschnitt 8.4.4).

⁶⁰ Ein Wärmetransport durch Wärmeleitung in vertikaler Richtung im Speichermantelblech und in der Wärmedämmung kann aufgrund des viel größeren Durchmessers des Speichermediums im Vergleich zur Wandstärke der Wandsegmente bzw. der Wärmedämmung vernachlässigt werden. Eine Abschätzung hierzu ermöglicht [96]. Ein verstärkter Stoffaustausch durch Fallströmungen an der Behälterwand im Speichermedium ist hiervon ausgenommen.

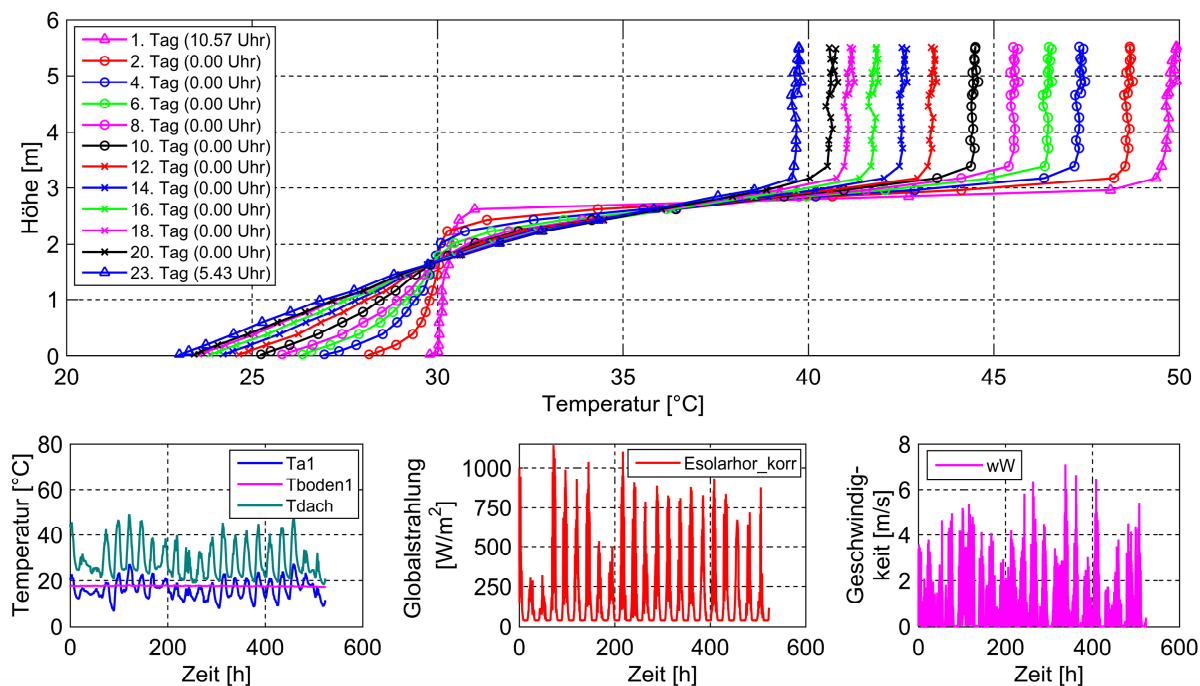


Abbildung 158: Temperaturverteilung über der Speicherhöhe zur verschiedenen Zeitpunkten und Umgebungsbedingungen (Temperaturen, Strahlungsleistung, Windgeschwindigkeit) während des Auskühlzeitraums des AKV2

Abbildung 159 stellt die Temperaturverteilung über der Speicherhöhe und verschiedene Umgebungsbedingungen des Demonstrators während des AKV4 dar. Es herrscht eine annähernd konstante Speichertemperatur über der Speicherhöhe zu Beginn des Auskühlversuchs vor. Eine Ausnahme bildet ein kleiner bodennaher Bereich, der bereits zu Anfang des Versuchs eine niedrigere Temperatur als die Konditionierungstemperatur zeigt. Die Ausdehnung der warmen Zone (> 1 m) ändert sich im Laufe des Auskühlversuchs AKV4 nicht. Ähnlich zu AKV2 tritt auch hier eine über der Höhe gleichbleibend starke Temperaturabnahme auf, die jedoch einen deutlich größeren Speicherbereich einnimmt. Die Homogenisierung der Temperatur des Speicherfluids über der Höhe (s. Tag 1 und Tag 2 in Abbildung 159) ist ein weiteres Indiz für das Auftreten von Mischungsvorgängen in der warmen Zone des Speichers unterhalb der Schwimmdecke.

Weiterführende Auswertungen, insbesondere zu den Wärmeverlusten der Schwimmdecke, gibt Abschnitt 8.4.4. Die Ergebnisse für die Auskühlversuche AKV2 und AKV4 sind repräsentativ für alle Auskühlversuche.

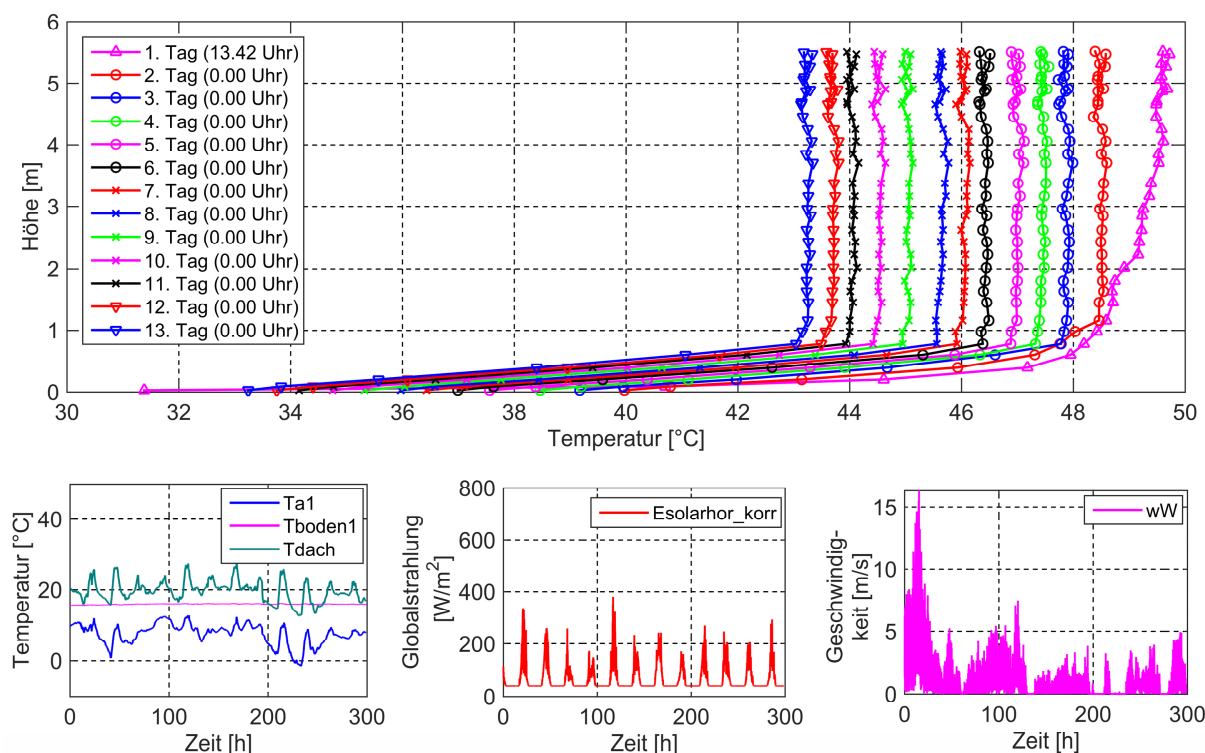


Abbildung 159: Temperaturverteilung über der Speicherhöhe zur verschiedenen Zeitpunkten und Umgebungsbedingungen (Temperaturen, Strahlungsleistung, Windgeschwindigkeit) während des Auskühlzeitraums des AKV4

Modellgestützte Parameteridentifikation

Die Ergebnisse der modellgestützten Parameterbestimmung mit dem 1-Knoten-Modell nach [88] bzw. dem Bilanzraum-Modell⁶¹ für den Demonstrator sind in Tabelle 42 und Tabelle 43 zusammengefasst. Als Kenngröße wird bei beiden Verfahren die Gesamtwärmeverlustrate des Demonstrators ermittelt. Zusätzlich zeigt Tabelle 44 die Ergebnisse der modellgestützten Parameteridentifikation mit dem modifizierten Multiport Store-Modell⁶². Es erfolgt die Ermittlung der Gesamtwärmeverlustrate und einer separaten Wärmeverlustrate für den Boden- bzw. den kombinierten Decken- und Mantelbereich.

Tabelle 42: Ergebnisse der modellgestützten Parameterbestimmung mit einem 1-Knoten-Modell [88]

Versuch	$(UA)_{ges}$ in [W/K] ^a	$(UA)_{ges}$ in [W/K] ^b	$\Delta T_{Sp,m}/\Delta t$ in [K/d]	$T_{Sp,m} - T_{amb,m}$ in [K]
AKV1	56,5	63,0	0,13	13,0
AKV2	68,4	76,2	0,26	20,8
AKV3	94,0	104,1	0,54	32,9
AKV4	72,4	79,0	0,50	38,0

^a Umgebungstemperatur: Ta1

^b Umgebungstemperatur: oberflächengewichteter Mittelwert aus Ta1, Tboden1 und Tdach

⁶¹ Die modellgestützte Parameteridentifikation mit dem Bilanzraum-Modell war nur beim AKV2 möglich, da ausschließlich bei diesem eine Konditionierung des Demonstrators vor und nach dem Auskühlzeitraum durchgeführt wurde.

⁶² Die modellgestützte Parameteridentifikation mit dem Multiport Store-Modell war beim AKV2 nicht möglich, da während des Auskühlzeitraums des AKV2 temporär erhöhte Messunsicherheiten bei der Temperaturmessung des Speichermediums vorlagen (Abschnitt 7.2.4).

Tabelle 43: Ergebnisse der modellgestützten Parameterbestimmung mit dem Bilanzraum-Modell

Versuch	$(UA)_{\text{ges}}$ in [W/K]	Bemerkung
AKV2	65,3	Konditionierung des Speichers auf 30 °C

Tabelle 44: Ergebnisse der modellgestützten Parameteridentifikation mit dem modifizierten Multiport-Store Model nach [95] (Randbedingungen: Umgebungstemperatur T_{a1} ; $\lambda_{v,Wasser} = 0,6 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$)

Versuch	$(UA)_B$ in [W/K]	$(UA)_{D+W}$ in [W/K]	$(UA)_{\text{ges}}$ in [W/K]
AKV1	14,2	44,7	58,9
AKV3	15,6	80,0	95,6
AKV4	16,0	68,1	84,1

Darüber hinaus sind zusätzliche modellgestützte Parameteridentifikationen mit dem modifizierten Multiport Store-Modell für alle Auskühlversuche mit dem Ziel durchgeführt worden, die notwendige Modellkomplexität^{63,64} zu ermitteln und die Modellierungsvereinfachungen⁶⁵ abzusichern. Die Fußnoten 63, 64 und 65 fassen die Erkenntnisse der nicht weiter ausgeführten Untersuchungen zusammen.

Eine differenzierte Betrachtung zwischen der Wärmeverlustrate der Schwimmdecke und der Wand mithilfe der modellgestützten Parameteridentifikation (modifiziertes Multiport Store-Modell) ist nicht möglich. Die Untersuchungen einer Morris-Analyse (vgl. [93]) zeigen, dass die Parameter $(UA)_W$ und $(UA)_D$ im Speichermodell stark korrelieren und nicht getrennt betrachtet werden können. Die Ergebnisse der Aufteilung zwischen Bodenwärmeverlustrate $(UA)_B$ und der kombinierten Wärmeverlustrate $(UA)_{D+W}$ sind dennoch plausibel. Dies bestätigt die bei allen AKV ähnlich ausgeprägte Bodenwärmeverlustrate und die schlüssige Größenordnung der kombinierten Gesamtwärmeverlustrate bei allen Auskühlversuchen in Abhängigkeit vom Speichertemperaturniveau (s. Tabelle 44 im vgl. zu Tabelle 42).

Die Zielstellung der Parameteridentifikation bei dem modifizierten Multiport Store-Modell ist das Auffindung des globalen Minimums der Zielfunktion im gegebenen Parameterraum. Dieser Suchvorgang nutzt i. d. R. einen gradientenbasierten Lösungsalgorithmus. Zur Absicherung der Ergebnisse im Rahmen der vorliegenden Untersuchung sind zusätzlich ein gradientenloser Lösungsalgorithmus (Particle-Swarm-Optimierung), eine systematische Start- und Grenzwertvariation und eine Sensitivitätsanalyse in Form einer Morris-Analyse [93] durchgeführt worden. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bestätigen, dass die ermittelten Wärmeverlusten in Tabelle 44 keine Abhängigkeit von der Wahl des Lösungsalgorithmus oder der Start- oder Grenzparameterwerte besitzen.

⁶³ Eine zusätzliche Aufteilung der Wandwärmeverlustrate in mehrere individuelle Höhen-Bereiche des Mantels, eine Verknüpfung der Wand- und Deckenwärmeverlustrate über ein festes geometrisches Verhältnis oder die Bestimmung der Gesamtwärmeverlustrate als alleiniger Modellparameter der Wärmeverluste führt zu keiner Verbesserung bei der Parameterbestimmung hinsichtlich der Ergebnisplausibilität.

⁶⁴ Die Berücksichtigung der Bodentemperatur (T_{boden1}) und der Dachraumtemperatur (T_{dach}) bei der modellgestützten Parameteridentifikation mit dem Schichtenmodell zeigt ebenfalls keine Verbesserung der Ergebnisse im Hinblick auf die Plausibilität. Im Folgenden wird als Speicherumgebungstemperatur des Schichtenmodells ausschließlich die Umgebungslufttemperatur (T_{a1}) betrachtet.

⁶⁵ Die für die Modellierung genutzte Vorgabe der effektiven Wärmeleitfähigkeit von Wasser im Speichermedium des modifizierten Multiport Store-Modell ist vertretbar, was eine rechnerische Abschätzung nach [96] zeigt. Eine Erweiterung der Modellparameteranzahl bei der Parameteridentifikation um die effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit im Speichermedium bestätigt dies ebenfalls. Die so ermittelte Wärmeleitfähigkeit liegt im Mittel um ca. 21 % über der von Wasser.

Interpretation der Ergebnisse

Betrachtet man die Ergebnisse der modellgestützten Parameterbestimmung in Abbildung 160, so kann festgehalten werden, dass die angewandten Verfahren untereinander ähnliche und in sich plausible Wärmeverlustraten für die Auskühlversuche ermitteln. Dies bestätigt die Funktionsweise der drei Verfahren zur Ermittlung der Gesamtwärmeverlustrate und das grundsätzliche Vorgehen bei der Methodik der Parameterbestimmung. Dennoch liegen z. T. Abweichungen⁶⁶ zwischen den Ergebnissen vor. Diese sind auf messunsicherheitsbedingte Einflüsse in der Speichertemperaturverteilung und die unterschiedlichen Modellierungsansätze bei der Parameterbestimmung zurückzuführen.

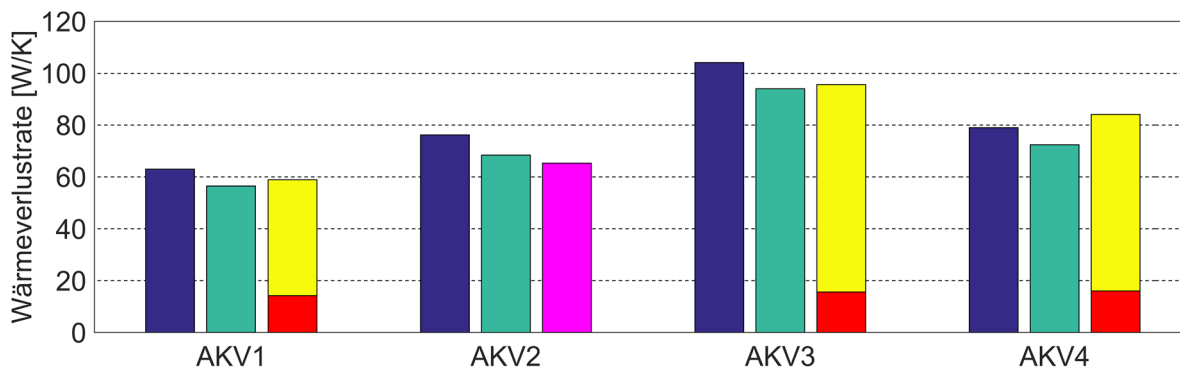


Abbildung 160: Zusammenfassung der Wärmeverlustraten; blau: 1-Knoten-Modell mit modifizierter Umgebungstemperatur, grün: 1-Knoten-Modell, gelb/rot: k-Knoten-Modell (rot: Boden, gelb: Mantel- und Deckenbereich), magenta: Bilanzraum-Modell

Es ist weiterhin auffällig, dass AKV4 eine deutlich niedrigere Gesamtwärmeverlustrate aufweist als AKV3, trotz ähnlicher Speichermitteltemperaturen und höherer Temperaturdifferenz zur Umgebung (Tabelle 42). Dies deutet auf überproportional starke Wärmeverluste durch die höhere Speicher-Maximaltemperatur bei diesem Versuch hin, verursacht durch Wärmebrücken in der oberen Speicherhälfte (Abschnitt 8.4.2). Generell ist eine starke Abhängigkeit der Gesamtwärmeverlustrate von der Temperatur der heißen Zone ersichtlich und entsprechend der Erfahrung bei der Prüfung von kleinvolumigen Speichern auch zu erwarten⁶⁷. Die starke Zunahme der Wärmeverlustrate kann jedoch im vorliegenden Fall nicht auf eine mit steigender Mitteltemperatur zunehmende Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung zurückgeführt werden, wie ein Vergleich zu den Ergebnissen aus Abschnitt 8.4.3 zeigt. Es ist davon auszugehen, dass Wärmebrücken die starke Temperaturabhängigkeit verursachen.

Die theoretische Gesamtwärmeverlustrate des Demonstrators beträgt 21,9 W/K bzw. 5,3 W/K für die Bodenwärmeverlustrate und 16,6 W/K für die kombinierte Wärmeverlustrate von Mantel- und Deckenbereich. Die Berechnung erfolgt unter Annahme eines eindimensionalen Wärmetransports durch Wärmeleitung und der Vernachlässigung einer Temperaturabhängigkeit der Wärmedämmstoffwerte. Der Vergleich dieser theoretisch ermittelten Wärmeverlustraten mit den aus dem Feldtest ermittelten Wärmeverlustraten (Tabelle 42 bis Tabelle 44) bestätigt,

⁶⁶ Die mittlere Auskühlung der Speichertemperatur während der Auskühlversuche ist im Vergleich zur Messunsicherheit der Speichertempersensoren (s. Abschnitt 7.2.4) z. T. gering. Damit besitzen Abweichungen in der gemessenen Temperaturverteilung des Speichers einen vergleichsweise starken Einfluss auf die Ergebnisse modellgestützter Parameteridentifikationsverfahren bei 1- und k-Knoten-Modellen, da diese im Rahmen der vorliegenden Untersuchung die Speichertemperaturverteilung als Zielgröße verwenden.

⁶⁷ Eine Temperaturabhängigkeit der Wärmeverlustrate bei der Prüfung kleinvolumiger WWS nach [91] und [92] ist bekannt, jedoch i. d. R. deutlich geringer ausgeprägt. So besitzt beispielsweise ein konventionell wärmedämmter 800 Liter Pufferspeicher im Temperaturbereich zwischen 40 °C und 80 °C eine Zunahme der Gesamtwärmeverlustrate von 3 % pro 10 K Temperaturerhöhung.

dass am Demonstrator deutlich erhöhte Wärmeverluste vorliegen. Das Auftreten von erhöhten Wärmeverlusten im Vergleich zu den Planungswerten ist im Bereich der thermischen Energiespeicher nicht unüblich und häufig durch einen Feuchteeintrag in den Wärmedämmstoff oder durch konstruktive Wärmebrücken begründet [101], [102]. Im Mittel liegt am Demonstrator eine um den Faktor 3,5 höhere Gesamtwärmeverlustrate bezogen auf die theoretische Wärmeverlustrate vor. Die Bodenwärmeverlustrate zeigt einen um den Faktor 2,9 erhöhten Wert.

8.4.2 Thermografie-Aufnahmen

Thermografie-Aufnahmen dienen u. a. zur Identifikation von Wärmebrücken innerhalb der Wärmedämmung von Speichern. Die Position der Wärmebrücken wird durch eine lokale Temperaturerhöhung oder -erniedrigung auf der Speicheroberfläche ersichtlich.

Der nachfolgende Abschnitt fasst die Ergebnisse der Thermografie-Aufnahmen am Demonstrator zusammen. Die Thermografie-Aufnahmen wurden am 18.12.17 (14 Uhr, MEZ) mit einer Wärmebildkamera vom Typ VarioCam hr erstellt. Im Speichermedium lag zu diesem Zeitpunkt in der oberen Speicherhälfte eine Temperatur von 53 °C und in der unteren Speicherhälfte ein Temperaturgradient von 53 °C auf 27 °C mit zwei Übergangszonen vor. Die Umgebungstemperatur betrug 2 °C.

Abbildung 161 zeigt Thermografie-Aufnahmen⁶⁸ der Speicherhülle aus verschiedenen Himmelsrichtungen. Durch den vergleichsweise hohen Reflexionsgrad⁶⁹ des Speicher-Außenblechs von $\rho^*_i = 0,43$ für langwellige Strahlung tritt eine starke Reflexion der Rückraumstrahlung am Speicher-Außenblech auf. Insbesondere langwellige Strahlung der nebenstehenden Halle, des kalten Himmels und der Umgebungsbebauung wird an der oberen Speicherhälfte reflektiert, weshalb diese eine stark inhomogene Temperaturverteilung auf der Speicheraußenhülle zeigt. Es gilt zu beachten, dass die Aufnahmen mit einem für die gesamte Thermografie-Aufnahme konstanten Emissionsgrad dargestellt und somit hinsichtlich der absoluten Oberflächentemperatur nicht repräsentativ sind. Eine Auswertung der Oberflächentemperaturen in der oberen Speicherhälfte ist daher nicht möglich. Allerdings zeigt Abbildung 161 ebenfalls zwei eindeutig nicht auf eine Erwärmung durch Solarstrahlung oder umgebungsbedingte Rückraumstrahlung zurückzuführende, lokale Temperaturerhöhungen (Detail A und B).

⁶⁸ Es ist in den nachfolgenden Thermografie-Aufnahmen zu beachten, dass die z. T. großflächigen Farbbereiche in Magenta und Schwarz die Grenzwerte der dargestellten Skala zeigen. Diese resultieren aus dem vergleichsweise kleinen Skalenbereich der Darstellung.

⁶⁹ Die Bestimmung des Reflexionsgrad ρ^*_i für langwellige Strahlung erfolgte mit einem Optosol Emissiometer Typ R bei einer Emitter-Temperatur von 70 °C.

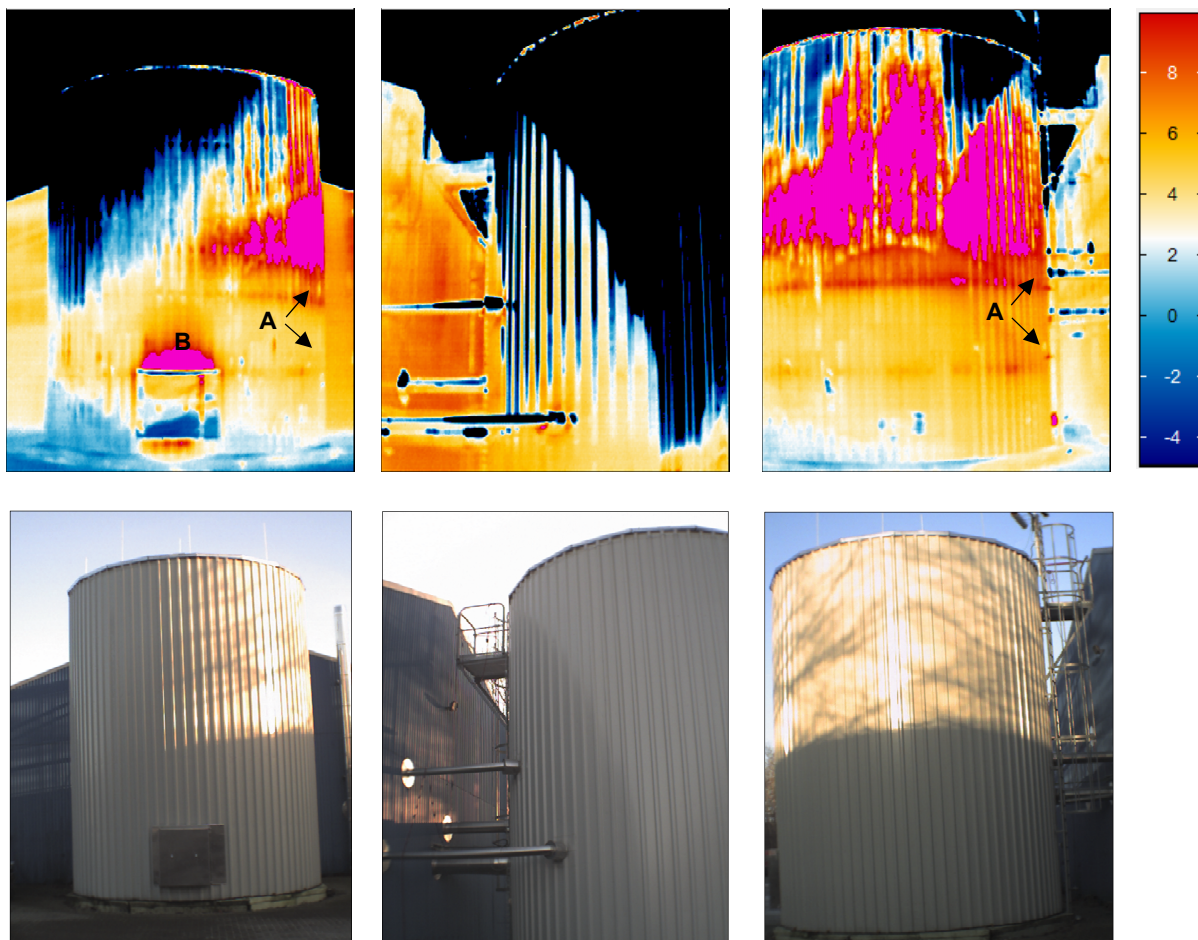


Abbildung 161: Thermografie-Aufnahme des Wandbereichs am Demonstrator, betrachtet aus verschiedenen Himmelsrichtungen ($T_{\text{Rückraum}} = 22 \text{ °C}$; $\varepsilon^* = 1$; $\tau^* = 1$; Farbskala in $^{\circ}\text{C}$)

Zum einen sind dies zwei sich über den Umfang erstreckende (linienförmige) warme Zonen in der unteren Speicherhälfte. Die Abstandshalter im Wandaufbau verursachen diese Wärmebrücken (Abbildung 161, Detail A). Weitere Nahaufnahmen (Abbildung 162) an einer durch Umgebungsstrahlung wenig beeinflussten Fläche zeigen ebenfalls eine lokal erhöhte Oberflächentemperatur auf Höhe der Abstandshalter und bestätigen so diese Vermutung. Zum anderen ist in Detail B eine warme Zone um die Wärmedämmung der Revisionsöffnung ersichtlich. Hierzu zeigt Abbildung 163 eine Nahaufnahme.

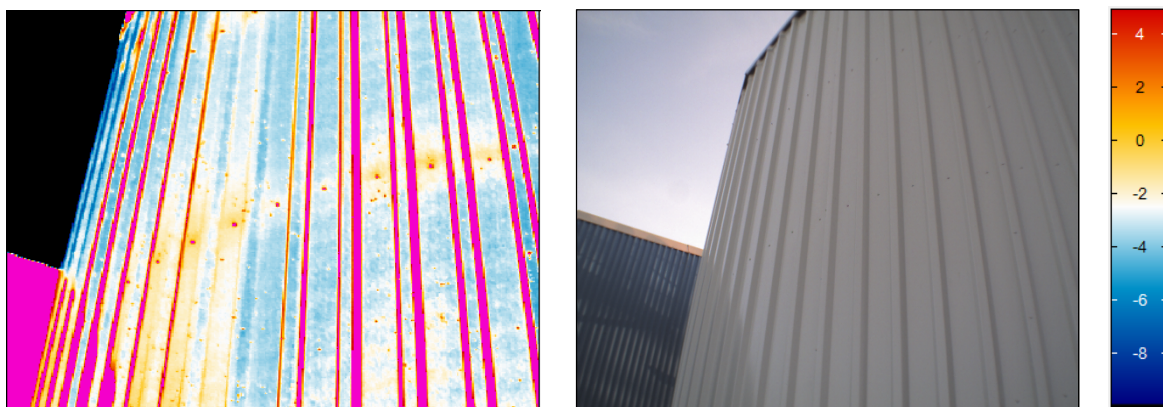


Abbildung 162: Thermografie-Aufnahme des Wandbereichs am Demonstrator, betrachtet aus der Himmelsrichtung Nordwest ($T_{\text{Rückraum}} = 22 \text{ °C}$; $\varepsilon^* = 1$; $\tau^* = 1$; Farbskala in $^{\circ}\text{C}$)

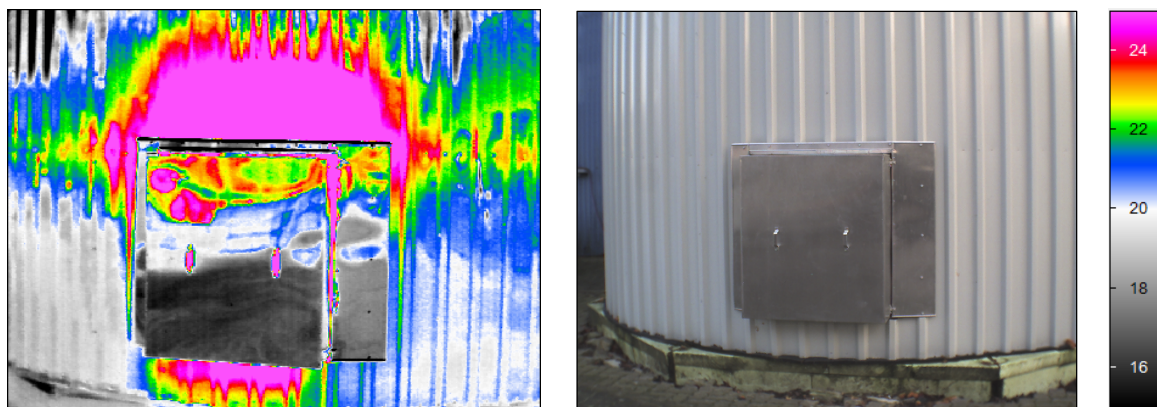


Abbildung 163: Thermografie-Aufnahme der wärmeisolierten Revisionsöffnung im unteren Bereich des Demonstrators ($T_{\text{Rückraum}} = 22 \text{ °C}$; $\epsilon^* = 1$; $\tau^* = 1$; Farbskala in °C)

Fasst man die Erkenntnisse dieses Abschnitts zusammen, deuten die Thermografie-Aufnahmen auf das Vorhandensein von relevanten Wärmebrücken im Speicherwandbereich hin. Dies deckt sich mit den Simulationen der Außenblechhalter (Abschnitt 8.5.2). Es ist davon auszugehen, dass sich die konstruktiven Wärmebrücken der Abstandshalter über den gesamten Speichermantelbereich erstrecken. In wie weit die Wärmebrücken im Wandaufbau allein für die erhöhten Gesamtwärmeverluste (Abschnitt 8.4.1) ursächlich sind, ist in weiteren Untersuchungen in Abschnitt 8.4.3 und 8.4.4 dargestellt.

8.4.3 Vergleich von Messergebnissen des Demonstrators zu Labormessungen⁷⁰

Aus den am Demonstrator gemessenen Wärmestromdichten und den Temperaturen in unmittelbarer Umgebung der Wärmestrommessplatten ist die Berechnung⁷¹ der lokalen, effektiven Wärmeleitfähigkeiten im Speicherwand- und Schwimmdeckenaufbau möglich. Für den Messzeitraum von 101 Tagen sind diese in Abbildung 164 über der zugehörigen Mitteltemperatur und der Temperaturdifferenz zwischen Speicherfluid und Umgebung (auf Höhe der jeweiligen Wärmestrommessplatte WSP1, WSP3 und WSPdecke)⁷² aufgetragen.

Zusätzlich zu den Messergebnissen der Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung im Demonstrator sind die Messergebnisse aus einer Zwei-Platten-Apparatur-Messung⁷³ (ZPA) zum verwendeten Wärmedämmstoff Rathipur dargestellt. Die Werte der ZPA-Messung sind aus acht Einzelmessungen bestimmt, die u. a. eine Materialprobe der Charge der im Demonstrator eingesetzten Wärmedämmung umfassen. Der Fehlerbalken repräsentiert die größte, identifizierte Abweichung einer Einzelmessung zum Mittelwert. Unterschiedliche Rathipur-Fertigungschargen verursachen diese Abweichung. Gründe für die Streuung können u. a. unterschiedliche Schüttdichten, Zellgaszusammensetzungen und Korngrößenverteilungen der Chargen sein.

⁷⁰ Autoren des Abschnittes: Markus Gensbaur, Dominik Bestenlehner, Harald Drück

⁷¹ Fourier'sches-Gesetz der Wärmeleitung (Annahme: eindimensionaler Wärmetransport)

⁷² Die Positionen der Wärmestrommessplatten sind Anhang A zu entnehmen.

⁷³ Labormessung (siehe Abschnitt 2) mit einer Zwei-Platten-Apparatur vom Typ Taurus Instruments TLP-900H

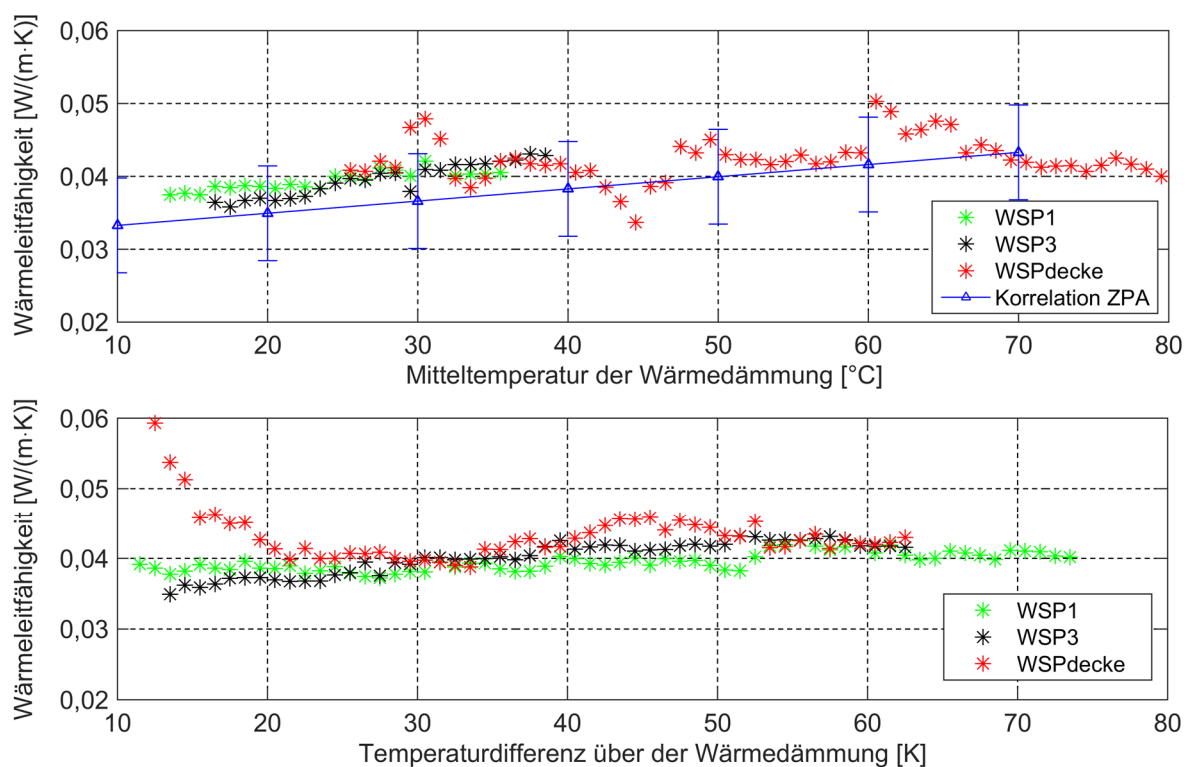


Abbildung 164: Mittelwerte der effektiven Wärmeleitfähigkeit⁷⁴ für den Messzeitraum von 101 Tagen; aufgetragen über der zugehörigen Mitteltemperatur der Wärmedämmung und der Temperaturdifferenz zwischen Speicherfluid und Umgebungsluft

Im oberen Diagramm in Abbildung 164 ist ersichtlich, dass ein Großteil der Messpunkte innerhalb des Fehlerbalkens der Labormessung liegt und diese die identifizierte Zunahme der effektiven Wärmeleitfähigkeit mit der Probenmitteltemperatur gemäß Labormessung aufweisen. Im unteren Diagramm ist ebenfalls eine Zunahme der Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung am Demonstrator ersichtlich. Eine Erklärung hierfür ist die i. d. R. erhöhte Mitteltemperatur bei steigender Temperaturdifferenz. Ein Auftreten von Konvektionsströmungen im Wand- und Schwimmdeckenaufbau ist nicht ersichtlich.

In den Messungen mit der Zwei-Platten-Apparatur konnte ein Einfluss von Konvektionsströmungen innerhalb der Rathipur-Schüttung auf das Messergebnis durch Wärmestromumkehr in der Messapparatur ausgeschlossen werden. Bei den Versuchen im Versuchsstand zum praxisnahen Test mehrschichtiger Wandaufbauten (VS-WA, Abschnitt 3.2) in vertikaler Anordnung ohne Konvektionsbremsen tritt hingegen eine über der Höhe nicht symmetrische Temperaturverteilung im Wärmedämmstoff Rathipur auf. Diese wird als Nachweis für einen relevanten konvektiven Wärmetransport gedeutet. Der Versuch mit dem VS-WA in vertikaler Anordnung ohne Konvektionsbremsen repräsentiert die Situation am oberen Ende der Wärmedämmung des Wandaufbaus am Demonstrator auf Höhe der Schwimmdecke. Im Falle einer horizontalen Anordnung des VS-WA (Vergleichsfall am Demonstrator: Schwimmdecke) und

⁷⁴ Aufgrund der ungleichen Verteilung der Messpunktzahl der ermittelten Wärmeleitfähigkeiten über der Mitteltemperatur bzw. der Temperaturdifferenz sind die Messdaten für Intervalle von 1 K gemittelt. Darüber hinaus reduziert eine Filterung der Daten die Unsicherheiten durch Messsignalschwankungen, Berechnungsfehler durch kapazitive Effekte im Wärmedämmstoff und Messwertausreiser. Die Filterung schließt alle Wärmeleitfähigkeitswerte aus, die zu einem Zeitpunkt erfasst sind, an dem in einem Intervall von zwei Stunden (WSP1/WSP3) bzw. 4 Stunden (WSPdecke) vor Erfassung solare Einstrahlung auf eine horizontale Fläche vorliegt und die zum Mittelwert der vorangegangenen Wärmeleitfähigkeitswerte (Zeitintervall von zwei Stunden) mehr als 50 % abweichen.

im Falle einer vertikalen Anordnung mit Konvektionsbremsen (Vergleichsfall am Demonstrator: ungestörte vertikale Wandwärmeeisung) des VS-WA wurde kein zusätzlicher konvektiver Wärmetransport durch freie Konvektion identifiziert (Abschnitt 3.2.3). Diese Erkenntnisse bestätigen die Ergebnisse der ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeiten am Demonstrator. Im Mantelbereich (Wärmestrommessplatte WSP1 und WSP3) und im Schwimmdeckenbereich (Wärmestrommessplatte WSPdecke) am Demonstrator liegt die erwartete effektive Wärmeleitfähigkeit mit entsprechender Mitteltemperaturabhängigkeit ohne Konvektionseinfluss vor. Ein zusätzlicher konvektiver Wärmetransport, wie er beim VS-WA im Falle einer vertikalen Anordnung ohne Konvektionsbremsen auftritt, kann am Demonstrator jedoch nicht identifiziert werden. Eine Erklärung hierfür ist, dass mit der WSP3 im oberen Wandbereich des Demonstrators der entsprechende Vergleichsfall im VS-WA nicht dargestellt wird und somit mögliche zusätzliche Wärmeverluste durch einen mehrdimensionalen Wärmestrom nicht erfasst werden. Ein weiterer Grund für das Nichtauftreten von freien Konvektionsströmungen könnte in der nicht identischen Wärmedämmstoffstärke und Höhe beider Wandaufbauten liegen.

Die in Abbildung 164 dargestellten Wärmeleitfähigkeiten sind aufgrund der Einbaulage der Wärmestrommessplatten nicht durch Wärmebrücken beeinflusst. Weiterhin tritt am Demonstrator keine Erhöhung der effektiven Wärmeleitfähigkeit durch Konvektionsströmungen auf. Dies bestätigt die gute Übereinstimmung dieser Werte mit den Stoffwerten aus den Laboruntersuchungen. Ebenfalls kann festgehalten werden, dass bei moderaten Mitteltemperaturen der Bemessungswert der Wärmeleitfähigkeit des Wärmedämmstoffs Rathipur ($\lambda_{\text{Rathipur}} = 0,036 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, [44]) auch im Einbauzustand vorliegt. Im Hinblick auf die erhöhten Gesamtwärmeverluste des Demonstrators (Abschnitt 8.4.1) kann zusammenfassend gefolgert werden, dass diese maßgeblich durch konstruktive Wärmebrücken verursacht sind.

8.4.4 Einfluss der Schwimmdecke auf das thermische Verhalten des Demonstrators

Die Analyse des Einflusses der Schwimmdecke auf das thermische Verhalten des Demonstrators erfolgt mit einer neu entworfenen Testsequenz mit angepassten Anfangsbedingungen. Die Anfangstemperaturverteilung dieses sog. Deckenauskuhlversuchs besteht aus einer heißen Schicht im deckennahen Bereich und aus einem Temperaturabfall auf eine deutlich kühlere Temperatur im darunterliegenden Speicherbereich. Der Höhenbereich des Temperaturabfalls im Speicher wird im Folgenden als sog. Übergangsschicht bezeichnet. Im Anschluss an die Erzeugung dieser thermischen Schichtung folgt eine Auskuhlphase ohne Be- oder Entladung. Für die Auswertung am Demonstrator stehen drei Deckenauskuhlversuche (DAV) zur Verfügung (Tabelle 45). Im Folgenden wird ausschließlich DAV2 exemplarisch erläutert. Deswegen Ergebnisse sind repräsentativ für die beiden anderen Deckenauskuhlversuche.

Tabelle 45: Testsequenzen zur Bewertung der Wärmeverluste im Bereich der Schwimmdecke

Benennung	Auskuhlzeitraum	Randbedingungen
DAV1	4 Tage	geschichtete Anfangstemperaturverteilung ($T_{\text{Sp,max}} = 88 \text{ °C}$, $T_{\text{Sp,min}} = 34 \text{ °C}$, drei Übergangsschichten)
DAV2	4 Tage	geschichtete Anfangstemperaturverteilung ($T_{\text{Sp,max}} = 76 \text{ °C}$, $T_{\text{Sp,min}} = 35 \text{ °C}$, zwei Übergangsschichten)
DAV3	7 Tage	geschichtete Anfangstemperaturverteilung ($T_{\text{Sp,max}} = 63 \text{ °C}$, $T_{\text{Sp,min}} = 32 \text{ °C}$, drei Übergangsschichten)

Abbildung 165 zeigt die Temperaturverteilung über der Speicherhöhe zu verschiedenen Versuchszeitpunkten des DAV2. Es ist ersichtlich, dass die Temperatur der warmen Zone deutlich schneller abnimmt, als die Temperatur auf der Speicherhöhe zwischen 1 m und 2 m. Dieser

Höhenbereich wird als vergleichsweise gering beeinflusst durch die angrenzenden Übergangsschichten betrachtet. Die hohen Wärmeverluste in der warmen Zone sind auf Wärmebrücken im Bereich des Speicherwandaufbaus (Abstandshalter) und des Ringraums der Schwimmdecke zurückzuführen. Die unterschiedlich stark ausgeprägte Temperaturabnahme begründet sich auch dadurch, dass in den beiden betrachteten Bereichen des Wandaufbaus eine unterschiedliche Temperaturdifferenz zur Umgebung vorliegt. Die Temperaturdifferenz zur Umgebung ist in der warmen Speicherzone ca. um den Faktor 2 größer als im Speicherbereich zwischen 1 m und 2 m. Die Auskühlung eines deckennahen Temperaturfühlers während des DAV2 zeigt eine Temperaturabnahme von 12,1 K. Die Auskühlung eines Temperaturfühlers im Speicherhöhenbereich von 1 m bis 2 m zeigt eine deutlich geringere Temperaturabnahme von 0,92 K. Die mittlere Umgebungslufttemperatur während des DAV2 betrug 0,4 °C. Es ist festzuhalten, dass der obere Bereich um den Faktor 13 schneller auskühlt. Dies ist somit nur zu einem äußerst geringen Teil auf die höhere Temperaturdifferenz zur Umgebung zurückzuführen, sondern resultiert aus dem Vorhandensein von Wärmebrücken.

Unter Berücksichtigung der Erkenntnis aus Abschnitt 8.4.3, dass ein durch Wärmebrücken ungestörter Wand- und Deckenaufbau hinsichtlich der Wärmeleitfähigkeit die erwarteten Eigenschaften aufweist, kann gefolgert werden, dass eine verstärkte Auskühlung im oberen Speicherbereich maßgeblich durch Wärmeverluste über den Ringraum der Schwimmdecke vorliegt. Diese Betrachtung vernachlässigt einen ggf. überproportional starken Einfluss von Wärmebrücken im Mantelbereich der warmen Zone.

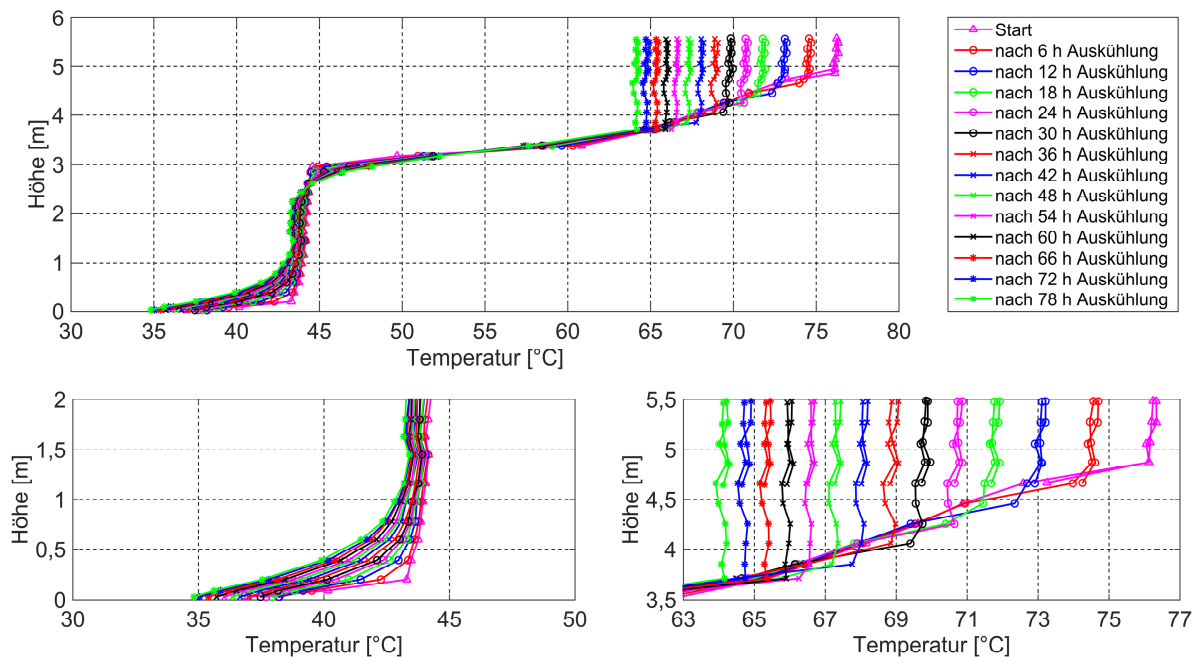


Abbildung 165: Temperaturverteilung über der Speicherhöhe während des DAV2 (oben) inkl. Detailausschnitt der Temperaturverteilung unter der Schwimmdecke (rechts unten) und im Speicherhöhenbereich zwischen 0 m und 2 m (links unten)

Die maßgebliche Wärmebrücke, die zu der vergleichsweise starken Auskühlung der warmen Zone führt, liegt im luftgefüllten Ringraum zwischen Speicherinnenwand und Schwimmdecke bzw. flexibler Abdichtung (Abbildung 132 in Abschnitt 7.1) vor. Es tritt ein konvektiver Wärmetransport mit Phasenwechsel auf. Verdunstendes Speicherwasser steigt von der freien Wasseroberfläche aufgrund von Auftriebskräften nach oben und kondensiert an der flexiblen

Abdichtung. Danach kann das Kondensat in den Ringspalt zurückströmen oder sich in Taschen, die aus der Faltung der flexiblen Abdichtung⁷⁵ entstehenden, sammeln. Ein derartiger Wärmeübertragungsvorgang wird auch als Thermosiphon-Effekt bezeichnet und stellt durch den Phasenwechsel des Speicherwassers einen sehr wirkungsvollen Wärmetransportprozess dar.

Weiterhin spricht für einen dominierenden Einfluss der Wärmebrücke am Ringraum bzw. an der flexiblen Abdichtung, dass die resultierende starke Temperaturabnahme nur bis zur Höhe des Beginns der Übergangsschicht stattfindet. Wandnahe Fallströmungen, die aufgrund von Wärmeverlusten in der Nähe des Ringraums auftreten, erklären dieses Verhalten. Erkaltes Speicherfluid sinkt aufgrund seiner im Vergleich zur umgebenden Speichertemperatur niedrigeren Temperatur auf eine Höhe mit ähnlicher Temperatur, also i. d. R. bis zum Beginn der Übergangsschicht, ab und vermischt sich dabei teilweise mit den angrenzenden Wasserschichten. Fallströmungen erklären auch die hohe Steilheit der vertikalen Temperaturverteilung der warmen Zone, da ein derart beeinflusster Bereich einer verstärkten Durchmischung ausgesetzt ist und dadurch gegen eine homogene Mischungstemperatur strebt.

8.4.5 Oberflächentemperatur der Wandwärmedämmung

Zur Untersuchung des Einflusses der Solarstrahlung auf die Oberflächentemperatur am Demonstrator wurden temporär Oberflächentempersensoren auf der Speicheraußenhülle in halber Wandhöhe und in acht unterschiedlichen Himmelsrichtungen installiert. Die mit diesen Sensoren durchgeführten Messungen umfassen den Zeitraum vom 05.09.17 bis zum 18.09.17. Weiterführende Informationen zur eingesetzten Messtechnik zeigt Tabelle 46.

Ein Wärmeleitklebeband ($k = 3000 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$) fixierte die Oberflächentemperaturfühler am Speicher. Die Sensoren waren zusätzlich mit einem spektrometrisch charakterisierten Klebeband ($\rho_s^* = 0,68$)⁷⁶ überdeckt. Der mit dem solaren Spektrum (AM1,5) gewichtete Reflexionsgrad ρ_s^* des Klebebands ist nur leicht erhöht im Vergleich zum Reflexionsgrad der Speicherblechlackierung ($\rho_s^* = 0,52$). Es kann deshalb von einem vernachlässigbaren Einfluss auf die gemessenen Oberflächentemperaturen ausgegangen werden.

Tabelle 46: Benennung, Position und Messunsicherheiten der relevanten Messsensoren für die Auswertung des Einflusses der Solarstrahlung auf die Oberflächentemperatur am Demonstrator

Bezeichnung	Einheit	Messgröße (Position)	Messunsicherheit
$T_N, T_{NW}, T_W, T_{SW}, T_S, T_{SO}, T_O, T_{NO}$	°C	Oberflächentemperaturen an der äußeren Speicherwand	$\pm 0,11 \text{ K}^a$
Pyranometer (temporär)	W/m ²	Solarstrahlungsmessung (Wetterstation)	$\pm 1,5 \%$ ($\Delta \dot{G}/\dot{G}$ bei $500 \text{ W}/\text{m}^2$) ^a

^a Gemäß Herstellerangabe bzw. Kalibrierzertifikat (Annahme: Rechteckverteilung der Messunsicherheit)

Ein Vergleich zweier Messtage anhand der Oberflächentemperaturen (indiziert entsprechend der azimutalen Ausrichtung am Demonstrator), der Umgebungstemperatur (T_{a1}) und der solaren Strahlungsleistung zeigt Abbildung 166. Weiterhin sind die Messergebnisse der Senso-

⁷⁵ Die flexible Abdichtung wurde aus wissenschaftlichen Gesichtspunkten im Rahmen des Projekts OBSERW ohne Wärmedämmung ausgeführt, um eine uneingeschränkte Untersuchung der Schwimmdeckenbewegung und des Knickverhaltens der flexiblen Abdichtung zu ermöglichen.

⁷⁶ Der Reflexionsgrad ρ_s^* im solaren Spektrum wurde mit einem Agilent Cary 5000 UV-Vis-NIR bestimmt.

ren Ta2 und Ta3 (siehe Abschnitt 7.2.1), die eine vorgesehene Strahlungsbeeinflussung erwarten lassen, dargestellt. Die mittlere tägliche Strahlungssumme während des Versuchszeitraums beträgt $3,08 \text{ kWh}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$.

Beim Vergleich der gemessenen Strahlungsleistungen mit den Oberflächentemperaturen ist ersichtlich, dass die Solarstrahlung einen relevanten Einfluss auf die lokalen Temperaturen der Speicheroberfläche ausübt. Ebenfalls ist der direkte Zusammenhang zwischen der Änderung der Oberflächentemperatur am Demonstrator und der Einstrahlung ersichtlich. Abhängig von der Solarstrahlungsleistung werden temporäre Speicheroberflächentemperaturen von bis zu 45 °C erreicht. Betrachtet man jedoch die über die Zeit gemittelten Werte der Temperaturfühler Ta1 ($13,28 \text{ °C}$), Ta2 ($15,48 \text{ °C}$), Ta3 ($13,89 \text{ °C}$) und T_{Mantel} ($14,06 \text{ °C}$) für den Versuchszeitraum, so sind die Unterschiede deutlich geringer.

Die Temperaturfühler Ta2 und Ta3 weisen entsprechend ihrer Einbauposition (Abschnitt Abschnitt 7.2.1 und Anhang A) die erwartete Strahlungsbeeinflussung auf. Dies bietet die Möglichkeit zur Identifikation einer Korrelation, mit deren Hilfe die im Regelfall nicht gemessene Oberflächentemperatur bestimmt werden kann, ohne die Notwendigkeit des Einsatzes eines Pyranometers. Darüber hinaus sind die Temperaturen ein Indikator für den langwelligen Strahlungsaustausch zwischen Speicheroberfläche und umgebender Bebauung bzw. kaltem Himmel.

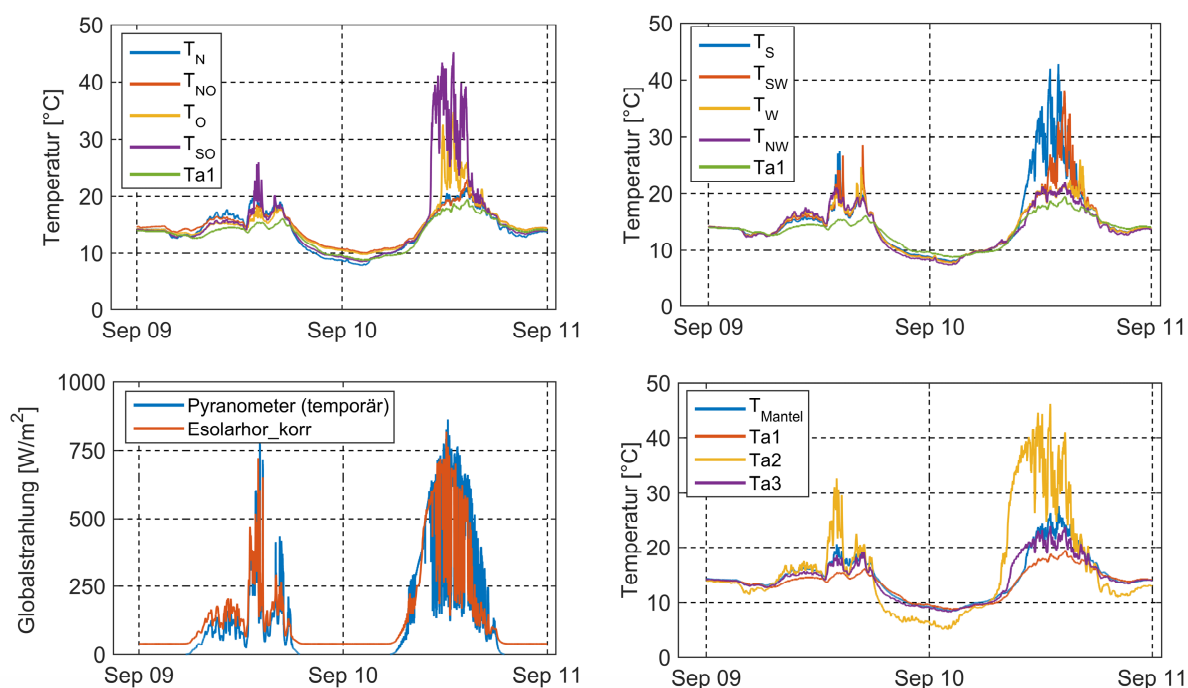


Abbildung 166: Oberflächentemperaturen, horizontale Strahlungsleistung und Umgebungstemperatur am Demonstrator für einen Messzeitraum von zwei Tagen

Die Ergebnisse der Auswertung zeigen, dass die messtechnisch ermittelte Oberflächentemperatur des Demonstrators für energetische Langzeit-Betrachtungen im zeitlichen Mittel der Umgebungslufttemperatur gleichzusetzen ist. Für Detailuntersuchungen von Wärmeströmungen über einzelne Wandsegmente zeigt die Auswertung jedoch, dass temporär und lokal deutlich höhere Temperaturen als die Umgebungslufttemperatur vorliegen, insbesondere auf den der Solarstrahlung zugewandten bzw. nicht verschatteten Seiten des Demonstrators. Für Betrachtungen dieser Art ist auf Modelle zur Berechnung der Oberflächentemperatur, z. B. dargestellt in [93], zurückzugreifen.

8.4.6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Erkenntnisse des vorliegenden Abschnitts belegen die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Wärmedämmung am Demonstrator und bestätigen prinzipiell die Erkenntnisse aus dem Labor- und Technikumsmaßstab. Die Auswertung der Ergebnisse des Abschnitts externe Wärmeverluste zeigt jedoch auch, dass am Demonstrator erhöhte Wärmeverluste im Vergleich zu den erwarteten Wärmeverlusten gemäß den Planungswerten der Wärmedämmstoffe vorliegen.

Weiterhin weist Abschnitt 8.4.3 nach, dass der ungestörte bzw. nicht durch Wärmebrücken beeinflusste Wand- und Deckenaufbau die erwarteten Wärmedämmeigenschaften besitzt. Die erhöhten Wärmeverluste sind somit auf konstruktive Wärmebrücken (Abschnitt 8.4.2 und 8.4.4) zurückzuführen. Zu diesen zählen u. a. die Wärmebrücken im Wandbereich (Abstandshalter des Außenblechs), im Deckenbereich (Ringraum der Schwimmdecke bzw. flexible Abdichtung) und im Bodenbereich (nicht wärmegeämmte Auflagefläche der inneren Behälterwand auf dem Fundament). Nach aktuellem Kenntnisstand stellt der konvektive Wärmetransport an der freien Wasseroberfläche im Ringspalt zwischen Schwimmdecke und innerer Behälterwand die dominierende Wärmebrücke dar.

Eine Analyse von Verbesserungsmaßnahmen hinsichtlich der Wärmedämmung des Demonstrators erfolgt in Abschnitt 8.5. Deren wissenschaftliche Untersuchung und Umsetzung ist im Rahmen von Folgeuntersuchungen geplant.

In weiterführenden Arbeiten ist ebenfalls vorgesehen, typische Anwendungsfälle für die hier neu entwickelte OBSERW-Speichertechnologie mit Hilfe einer dynamischen Anlagensimulation zu untersuchen. Für solarthermische Anwendungen im Großmaßstab konnte der gewinnbringende Einsatz eines solchen Speichers in einem bestehenden Nahwärmenetz bereits exemplarisch nachgewiesen werden [100]. Insbesondere für sehr große Speichervolumina ist für diese Anwendung jedoch eine Prüfung der bekannten numerischen Speichermodelle hinsichtlich der notwendigen Modellierungstiefe⁷⁷ für dynamische Anlagensimulationen erforderlich. Es ist auch geplant, die erfolgreich angewandte Methodik [93] der Kennwertermittlung bei Auskühlversuchen von großvolumigen Warmwasserspeichern an weiteren Versuchsobjekten im Großmaßstab zu prüfen und ggf. weiter zu entwickeln. Eine derartige Methodik zur Kennwertermittlung stellt die Vergleichsbasis für ein einheitliches Prüf- und Bewertungsverfahren großer Warmwasserspeicher, z. B. im Rahmen eines Zertifizierungssystems, dar.

⁷⁷ Es ist bekannt, dass bei k-Knoten-Modellen eine Beeinflussung der Simulationsergebnisse durch sog. numerische Diffusion vorliegen kann. Dies betrifft insbesondere Speicheranwendungsfälle, bei denen die im Speicher vorliegende thermische Übergangsschicht über längere Zeiträume modelliert werden muss und diese einen relevanten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit der Gesamtanlage hat. In diesem Fall ist ebenso eine ausreichende Güte der Modellierung des Belade- und Entladeverhaltens notwendig, um den Aufbau bzw. Abbau der thermischen Übergangsschicht geeignet berücksichtigen zu können. Weiterhin kann eine Modellierung speicherindividueller Funktionen, wie z. B. das thermische Verhalten eines Schichtenladens, erforderlich sein.

8.5 Verbesserungsmaßnahmen am Demonstrator⁷⁸

Nach Auswertung der Feldtests und der Laboruntersuchungen ergaben sich eine Reihe von Optimierungsmöglichkeiten am Demonstrator.

Tabelle 47 benennt die Optimierungsfelder und -maßnahmen im Einzelnen und nimmt eine Gewichtung bzgl. des voraussichtlichen Verbesserungspotenzials vor. Abbildung 167 gibt einen schematischen Überblick. Eine Präzisierung erfolgt in den verwiesenen Abschnitten.

Tabelle 47: Übersicht der Optimierungsfelder mit Verbesserungspotential (größtes Potential: “+++“, kleinstes Potential: “+“), Maßnahmen und Verweis auf die zugehörigen Abschnitte im Abschlussbericht sowie die Position in Abbildung 167

Verbesserungspotenzial	Optimierungsfeld	Maßnahme	Verw.	Pos.
+++	Wärmebrücke flexible Abdichtung, Kondensation an der Innenseite der flexiblen Abdichtung	dachraumseitige Wärmedämmung	8.5.1	1
+++	Wärmebrücke Ringraum	Optimierung der thermischen Bremse	8.5.1	2
+++	Beladeverhalten Schichtenlader	höhere Installation im Speicher, Optimierung der Konstruktion	8.5.3	3
++	einseitiges Ausströmen über Radialdiffusor	Einsatz von Loch- und Leitblechen	8.5.3	5
++	Wärmebrücke Außenblechhalter	Einsatz alternativer Materialien (bspw. GFK)	8.5.2	6
+	Kondensation am Gespärredach	Wärmedämmung (dachraumseitig); aktive Belüftung bzw. Entwicklung einer alternativen Trocknungstechnik	8.5.1	4
+	O ₂ -Diffusion durch die flexible Abdichtung	Verwendung von diffusionsdichten Folien		1

⁷⁸ Autoren des Abschnittes: Jan Mücke, Fabian Findeisen, Markus Gensbaur, Thorsten Urbaneck.

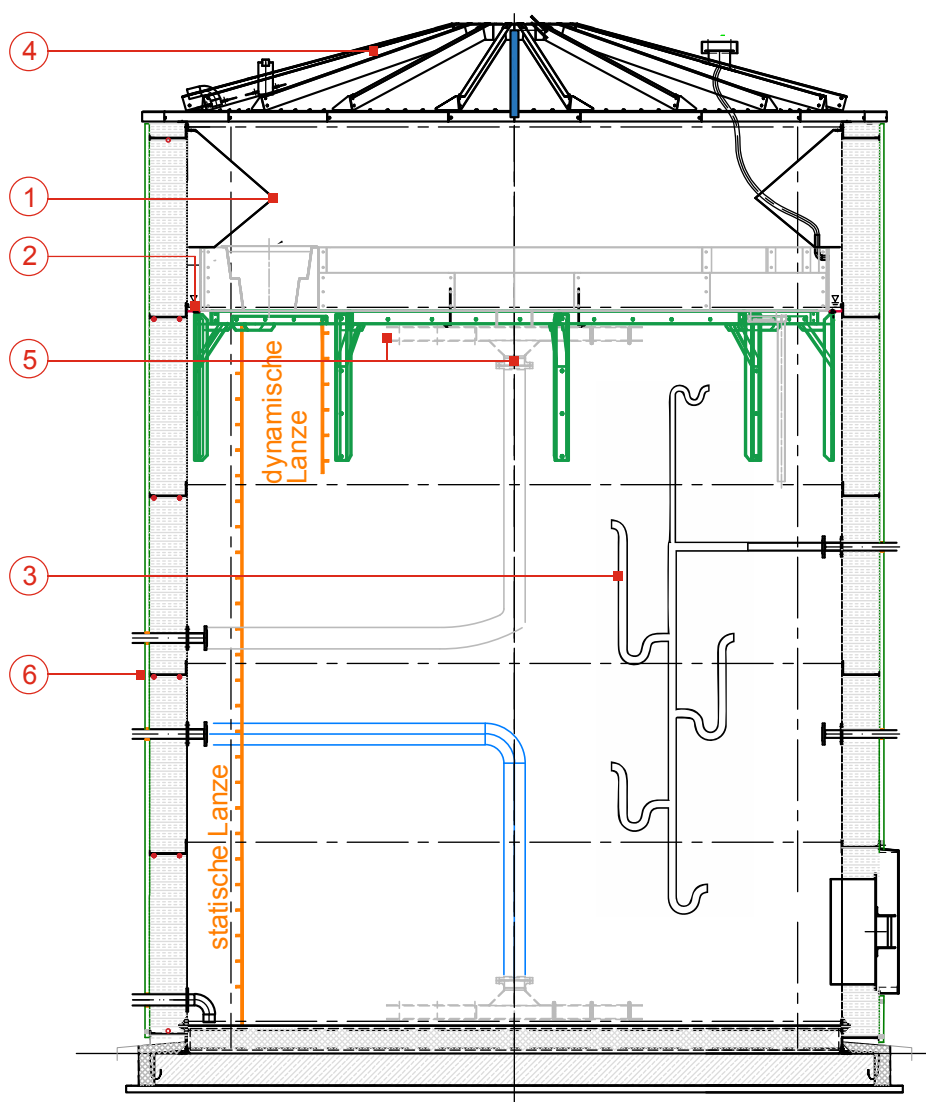


Abbildung 167: Übersichtszeichnung des Demonstrators und Kennzeichnung der Optimierungsfelder

8.5.1 Dachraum und Schwimmdecke

Während des Betriebs in den Sommermonaten, insbesondere bei höheren Außentemperaturen, war im Dachraum keine nennenswerte Kondensation zu beobachten. Bei sinkenden Außentemperaturen und gleichzeitig steigenden Speichertemperaturen (Heißtests im November und Dezember 2017) kam es jedoch zu einer starken Kondensatbildung an der Innenseite des Gespärredachs. Weiterhin bildete sich ebenfalls durch Kondensation eine Flüssigkeitsansammlung auf der innenliegenden Seite der flexiblen Abdichtung (Ringraum- bzw. Speicherseitig).

Kondensatbildung ist aus mehreren Gründen problematisch für die externen Wärmeverluste. Zum einen erhöht sich der Wärmeübergangskoeffizient stark, zum anderen wäre ein dauerhaft befeuchtetes Wärmedämmmaterial (bspw. durch heruntertropfendes Kondensat im Dachraum) weniger wirkungsvoll als im trockenen Zustand. Hinzu kommt die Gefahr der Schimmelbildung.

Um die Kondensation an der Innenseite des Dachs zu unterbinden, ist beispielsweise eine aktive Belüftung des Dachraums möglich. Bei Überschreitung einer gewissen relativen Luftfeuchte kann ein Ventilator für einen Luftaustausch mit der Umgebung sorgen. Weiterhin wäre

eine Wärmedämmung der Innenseite sinnvoll. Wichtig ist hierbei, dass die Dämmung alle Profile und Verstrebungen des Gespärredachs mit einschließt, da es sonst an diesen Profilen zu Kondensation kommen kann. Berechnungen zur Taupunktunterschreitung zeigen, dass eine Dämmstärke von ca. 10 mm ausreicht, um Kondensation bei Außentemperaturen über 8 °C zu vermeiden. Bei Berücksichtigung eines Sicherheitsfaktors von 2-3 ergäbe sich eine Dämmstärke von 20-30 mm. Somit könnte einerseits eine Unterbindung von Kondensation auf der Innenseite des Dachs erfolgen und gleichzeitig die Wärmedämmwirkung der Dachkonstruktion signifikant verbessert werden.

Weiterhin besitzt die dachraumseitige Wärmedämmung der flexiblen Abdichtung eine sehr hohe Priorität, da der Ringraum eine wesentliche Wärmebrücke darstellt. Dies ist hauptsächlich auf die ungedämmte flexible Abdichtung zurückzuführen. Eine zusätzliche Wärmedämmung verspricht daher ein erhebliches Optimierungspotential. Ein Vergleich der nicht wärmedämmten und wärmedämmten flexiblen Abdichtung erfolgte unter Berücksichtigung der durch Konvektion getriebenen Strömungsvorgänge im Ringraum mittels CFD-Simulationen. Das vereinfachte Berechnungsmodell zeigt Abbildung 168. Für die Rechnungen wird angenommen, dass eine 100 mm dicke Dämmung aus Rathipur formschlüssig auf der Abdichtung aufliegt. Im Modell erfolgt hierfür lediglich eine Anpassung der effektiven thermischen Wärmeleitfähigkeit des Materials der flexiblen Abdichtung. Für das neue Material gilt nun ein Wert von 0,0008 W/(m K) gegenüber dem vorherigen Wert von 0,2 W/(m K). Stoffübertragungsvorgänge wie bspw. Kondensation und Verdunstung können aufgrund des relativ großen betrachteten Zeitbereichs von 60 Minuten und den für die Berechnung notwendigen extrem kleinen Zeitschrittweiten nicht modelliert werden.

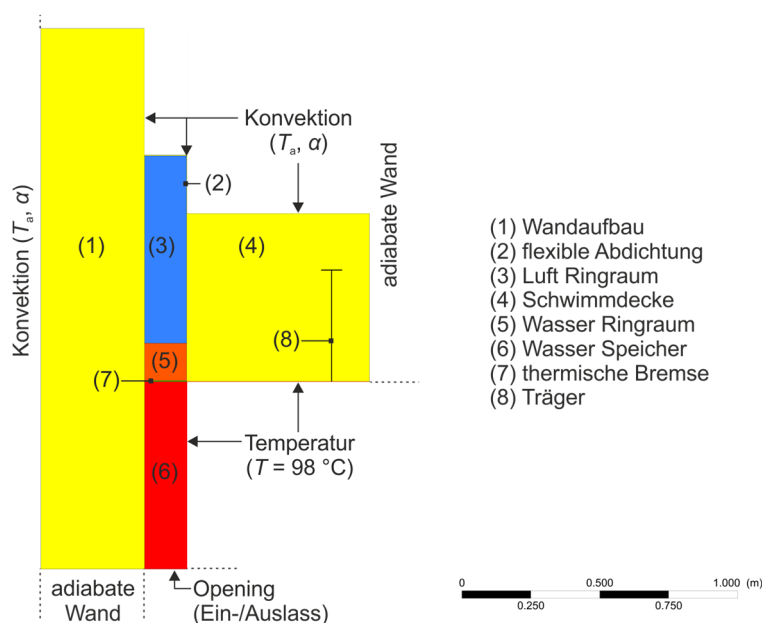


Abbildung 168: Schematische Darstellung des Ringraummodells mit Speicherwand und Schwimmdecke für die CFD-Simulation

Abbildung 169 zeigt ausgewählte Temperaturfelder für den Fall mit bzw. ohne einer zusätzlichen Dämmung der flexiblen Abdichtung. Über einen Betrachtungszeitraum von einer Stunde liegt im Ringraum ein deutlich homogeneres und wärmeres Temperaturfeld vor. Während ohne Dämmung die Temperatur zur flexiblen Abdichtung hin deutlich abfällt, bleibt sie mit Dämmung stabil und ändert sich kaum.

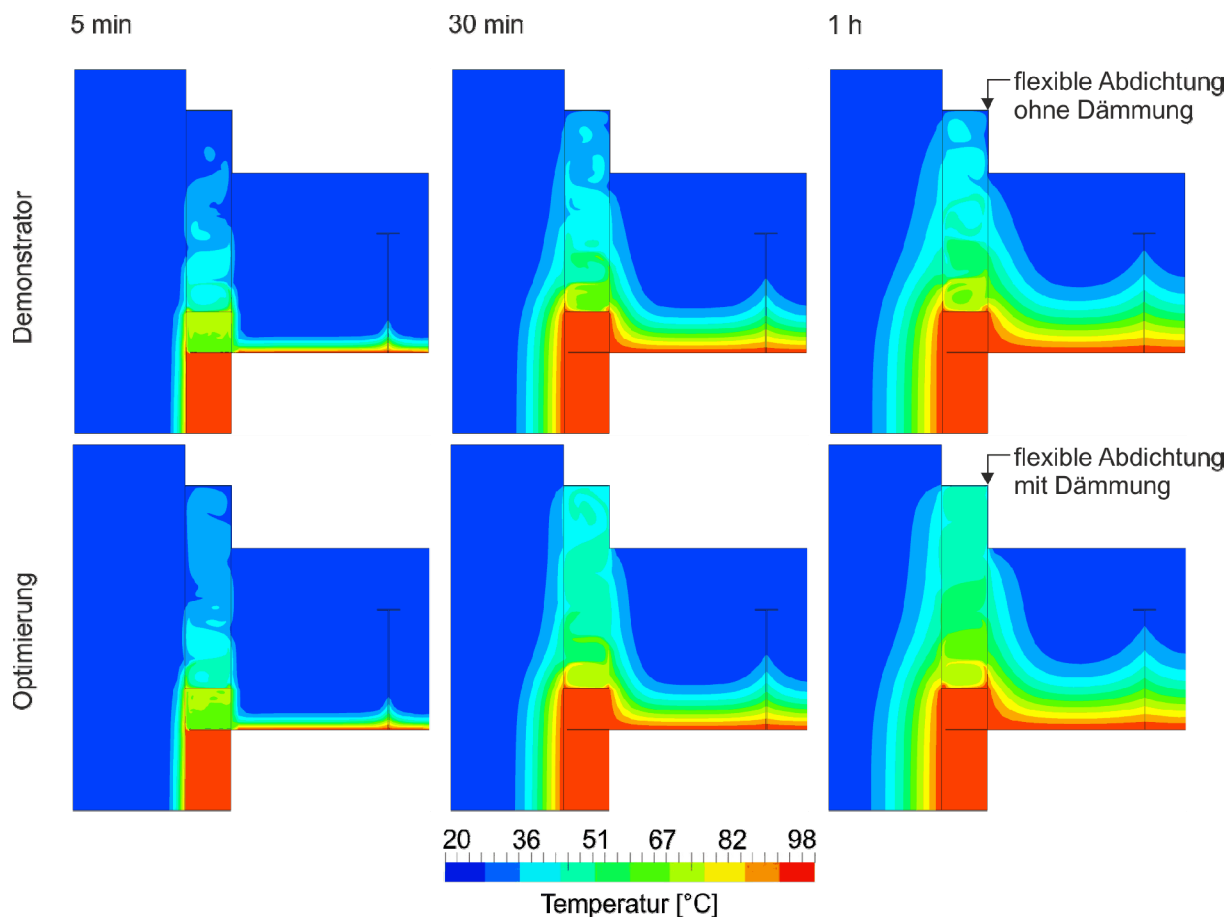


Abbildung 169: Temperaturfelder im Querschnitt des Ringraum-Simulationsmodells mit einfacher thermischer Bremse ohne bzw. mit gedämmter flexibler Abdichtung

Insgesamt liegt die mittlere Lufttemperatur im Ringraum ca. 10 K höher (Abbildung 170). Die mittlere Temperatur innerhalb der flexiblen Abdichtung steigt ebenfalls um knapp 10 K und die maximale Temperatur um 15 K (Abbildung 25). Für Kondensationsvorgänge ist jedoch der Temperaturunterschied zwischen dampfbeladener Luft und einer kälteren Oberfläche entscheidend. Abbildung 171 zeigt daher die Temperaturen an der flexiblen Abdichtung. Ohne Dämmung existiert über der relativ dünnen Abdichtung nur ein geringer Temperaturgradient, daher ist die Temperatur an der ringraumseitigen Oberfläche (ca. 24 °C) nur geringfügig höher als im Dachraum (20 °C). Mit Dämmung ergibt sich ein größerer Gradient. Die ringraumseitige Oberflächentemperatur (ca. 32 °C) liegt so deutlich über der Temperatur im Dachraum. Die Ergebnisse machen deutlich, dass die Dämmung eine wirkungsvolle Maßnahme darstellt, um Kondensation an der flexiblen Abdichtung zu mindern.

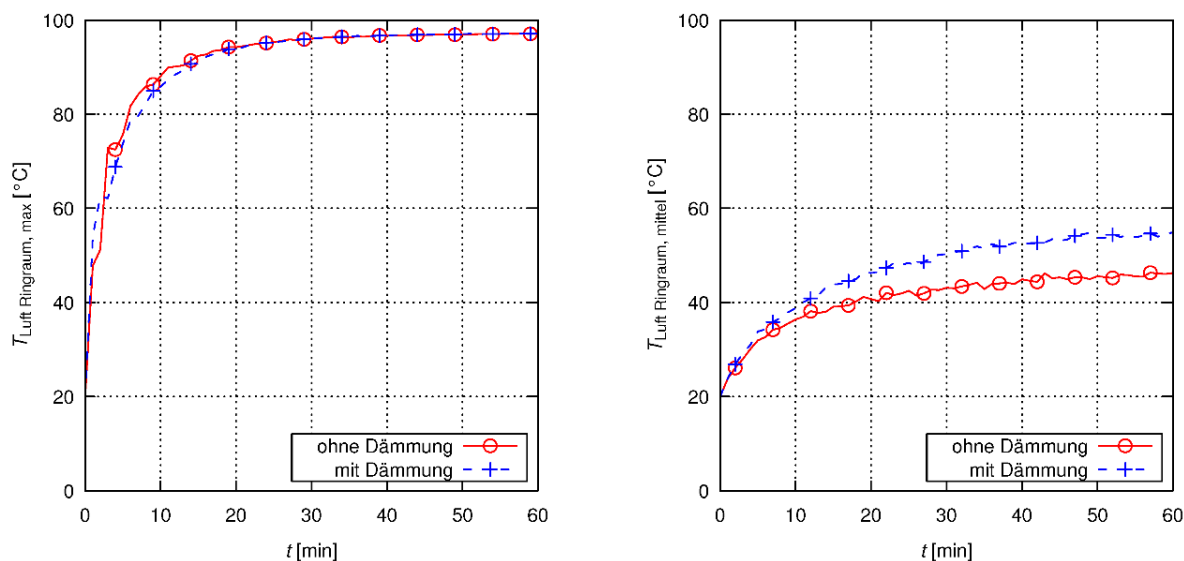


Abbildung 170: Zeitliche Entwicklung der maximalen (links) bzw. der mittleren (rechts) Temperatur der Luft im Ringraum mit/ohne einer zusätzlichen Dämmung der flexiblen Abdichtung, CFD-Simulation

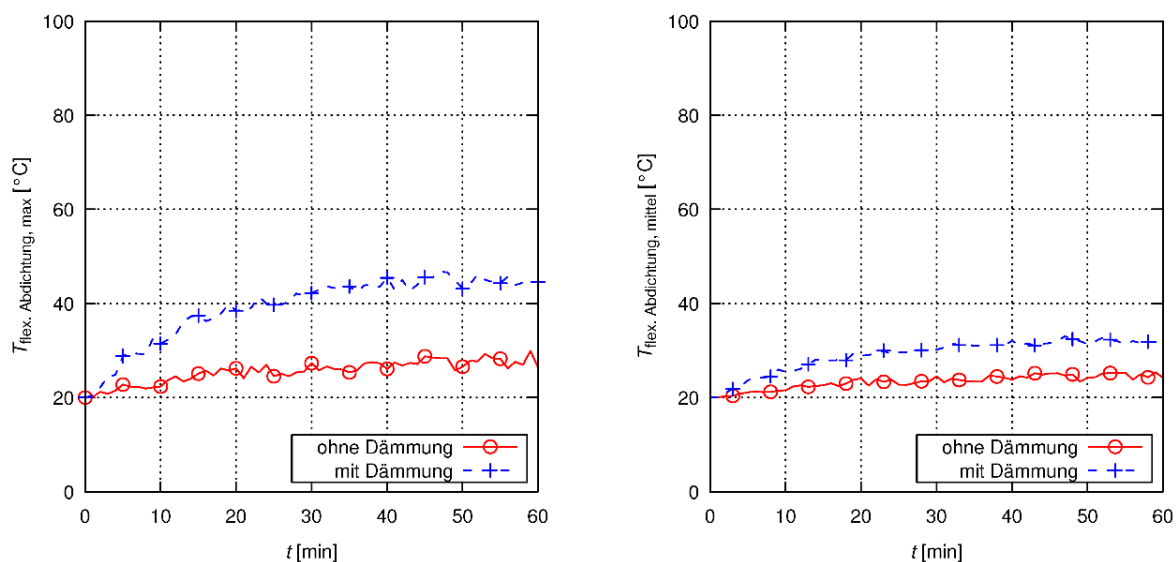


Abbildung 171: Zeitliche Entwicklung der maximalen (links) bzw. der mittleren (rechts) Temperatur der flexiblen Abdichtung mit/ohne einer zusätzlichen Dämmung, CFD-Simulation

Die vorangegangene Rechnung repräsentiert den Fall im Demonstrator, wenn eine thermische Bremse in Form einer Dichtlippe eine Konvektionsströmung von heißem Speicherwasser in den Ringraum hinein verzögert. Untersuchungen mit drei übereinander angeordneten Dichtlippen (sog. Dreifachbremse, s. a. Patentanmeldung der Schwimmdeckenkonstruktion [32]) zeigen, dass sich die Erwärmung gegenüber der einfachen Bremse um weitere ca. 10 Minuten verlangsamen lässt. Zu beachten ist, dass das Modell einen Spalt von ungefähr 10 mm zur Speicherwand besitzt, wodurch stets freie Konvektion zwischen Speicher- und Ringraumwasser möglich ist. Eine optimal gestaltete thermische Bremse sollte jedoch eine ausreichende Steifigkeit besitzen, um den Spalt zu schließen und Konvektionsströmungen zu unterbinden. Das Wasser im Ringraum erwärmt sich dann nur primär aufgrund von Wärmeleitung über der thermischen Bremse. Berechnungen mit einem einfachen FEM-Modell deuten darauf hin, dass hierbei die minimale Wassertemperatur erst nach ca. 15 h einen Wert über 80 °C erreicht. Kondensationsvorgänge an der flexiblen Abdichtung würden mit entsprechender Verzögerung beginnen.

Die CFD-Ergebnisse zeigen, dass es vorteilhaft ist, Konvektionsströmungen zwischen Ringraum und Speicher zu unterbinden. Umso besser die thermische Bremse gegenüber der Speicherwand abdichtet, desto langsamer erfolgt auch die Temperaturerhöhung im Ringraum. Gleichzeitig muss die thermische Bremse aber auch eine Bewegung der Schwimmdecke infolge der Volumenänderung des Wassers sowie die Verdrängung von Wasser in den Ringraum hinein zulassen. Die optimale Gestaltung einer thermischen Bremse sollte daher zum Ziel haben, einen sehr guten Formschluss zur Speicherwand bei hoher Steifigkeit und dennoch ausreichender Flexibilität zu erreichen. Auch kann es sinnvoll sein, mehrere thermische Bremsen übereinander zu positionieren. Falls sich ein Spalt zur Speicherwand nicht vermeiden lassen sollte, können dadurch mehrere Konvektionsräume die Erwärmung verzögern.

8.5.2 Wärmebrücken im Wandaufbau

Die Außenblechhalter im Wandaufbau bieten großes Optimierungspotential hinsichtlich der auftretenden Wärmeverluste. Vor allem der Einsatz von alternativen Materialien wie glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) oder Kunststoff (bspw. Polypropylen PP) erscheint vielversprechend. Um den Einfluss unterschiedlicher Materialien für die Abstandshalter des Außenblechs auf den Wärmeverlust am Demonstrator besser einschätzen zu können, erfolgte die Simulation verschiedener Varianten mit dem Programm DELPHIN [51].

Simulation verschiedener Außenblechhalter mit DELPHIN

Folgende Parameter und Annahmen wurden dabei für alle DELPHIN-Simulationen zugrunde gelegt:

- ausschließlich Wärmeleitung,
- Speichertemperatur: 98 °C,
- Außentemperatur: 20 °C,
- Wärmeübergangskoeffizient zum Speicherwasser: 500 W/(m² K),
- Wärmeübergangskoeffizient am Außenblech (ruhige Wetterlage): 8 W/(m² K),
- simulierte Realzeit bis zur Erreichung eines stationären Zustandes (in der Regel 2-3 Tage).

Die verschiedenen Varianten sind in Tabelle 48 zusammengefasst. Abbildung 172 zeigt einen Abstandshalter aus Aluminium (Variante 1) als Beispiel für eine übliche Ausführung. Im Wandaufbau des Demonstrators kam, als erste Optimierungsmaßnahme, Variante 2 zum Einsatz. Der Aufbau kann Abbildung 173 entnommen werden.

Tabelle 48: Variantenübersicht zur Simulation der Abstandshalter des Außenblechs mit den jeweils zum Einsatz kommenden Materialien

Variante	verwendete Materialien
1	Aluminium
2	Aluminium
	Edelstahl
	Kunststoff-Unterlegscheibe (PET-C)
3	Aluminium
	glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)
4	Polypropylen (PP)



Abbildung 172: Abstandshalter im Wandaufbau; Standardausführung mit Aluminium

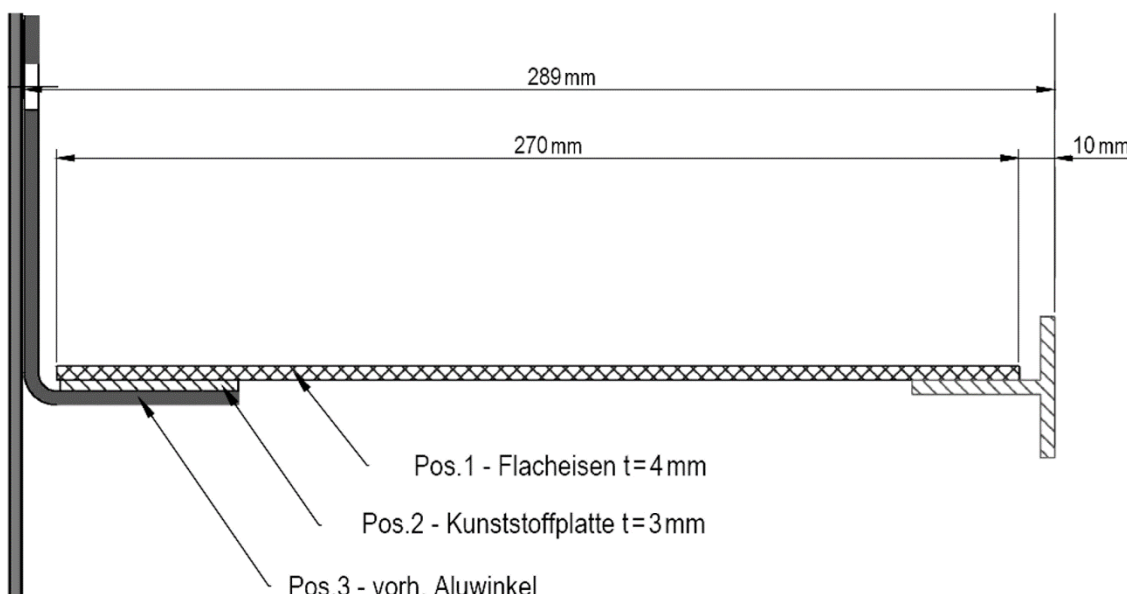


Abbildung 173: Zeichnung des momentan am Demonstrator verbauten Abstandshalters (Variante 2) [15]

Variante 3 ist eine Konstruktion aus GFK, ähnlich Variante 2. Das Edelstahlblech wird dabei durch eine GFK-Platte ersetzt und die Unterlegscheiben aus Kunststoff entfallen (Abbildung 174c). Bei Variante 4 ist der Halter vollständig aus Polypropylen hergestellt (Dauereinsatztemperatur ca. 100-110 °C [68]; Abbildung 174d). Die exakten Maße der verschiedenen Halter sind Tabelle 49 zu entnehmen.

Tabelle 49: Maße der verschiedenen Varianten der Abstandshalter des Außenblechs

Variante	Material	Länge (horizontal) [mm]	Höhe (vertikal) [mm]	Breite (radial) [mm]	Stärke Material [mm]
1	Aluminium	279	114	50	4
2	Aluminium	60	114	50	4
	Edelstahl	270	4	50	4
	PET-C	50	3	50	3
3	Aluminium	60	114	50	4
	GFK	270	8	50	8
4	Polypropylen	279	114	50	40

Da die Elastizitätsmodule (als Anhaltspunkt für die Biegefestigkeit des Materials) von GFK und vor allem von PP signifikant niedriger sind als von Aluminium oder Edelstahl, sind die Varianten 3 und 4 größer dimensioniert [68]. Vor allem die Maße von Variante 4 sind deutlich größer als bei den anderen Haltern. Die Auslegung erfolgte überschlagsmäßig. Die Wandstärke des Halters ist daher voraussichtlich zu groß dimensioniert. Der Unterschied zu den anderen Varianten dürfte sich somit bei exakterer Auslegung noch erhöhen. Das umlaufende T-Profil, welches die Verbindung zwischen Halter und Außenblech herstellt, ist bei allen Varianten analog zur Konstruktion des Demonstrators aus Aluminium. Tabelle 50 fasst die Stoffwerte zusammen. Abbildung 174 stellt die Geometrie der verschiedenen Varianten schematisch dar. Dabei befinden sich jeweils links die Speicherwand und rechts das Außenblech.

Tabelle 50: Wärmeleitfähigkeit und Elastizitätsmodul für 20 °C eingesetzten Werkstoffe [68]

Material	Wärmeleitfähigkeit [W/(m K)]	Elastizitätsmodul [kN/mm ²]
Aluminium	236,00	~ 70
Edelstahl	17,00	~ 200
Kunststoff-Unterlegscheibe (PET-C)	0,29	~ 1
GFK	0,30	~ 24
Polypropylen	0,30	~ 1

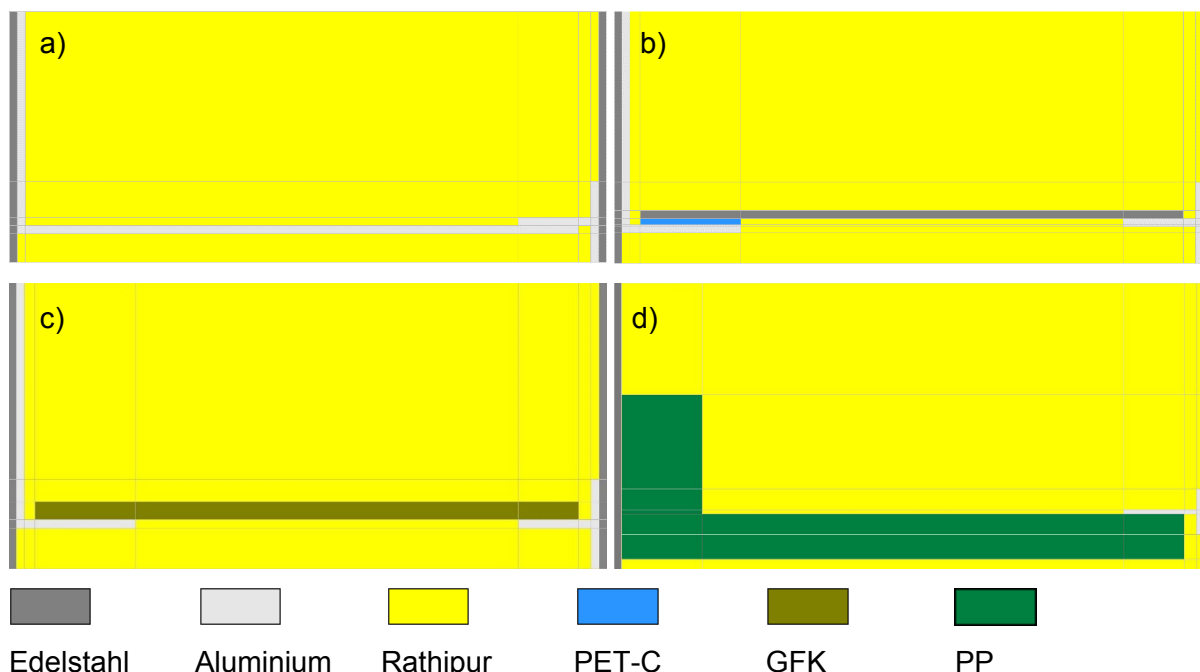


Abbildung 174: Schematische Darstellung der Abstandshalter, a) Variante 1, b) Variante 2, c) Variante 3, d) Variante 4

Ergebnisse und Auswertung

Temperaturverlauf

Die Temperaturfelder liefern einen Überblick zu den Temperaturen im Halter, innerhalb der Dämmung und am Außenblech. Abbildung 175 zeigt die Temperaturfelder für die vier verschiedenen Varianten.

Es ist deutlich zu erkennen, dass der Aluminium-Halter (Variante 1) eine starke Wärmebrücke darstellt. In direkter Umgebung des Halters beträgt die Temperatur am Außenblech noch ca. 70 °C. Bei der real verbauten Variante 2 (siehe Abschnitt 7.1) beträgt die Temperatur am Außenblech bereits nur noch ca. 35 °C. Die Nutzung des Edelstahl-Flacheisens und die Entkopplung des Aluminiumwinkels mittels PET-C-Scheibe erscheinen wirkungsvoll und bestätigt sich als korrekte und wichtige Maßnahme.

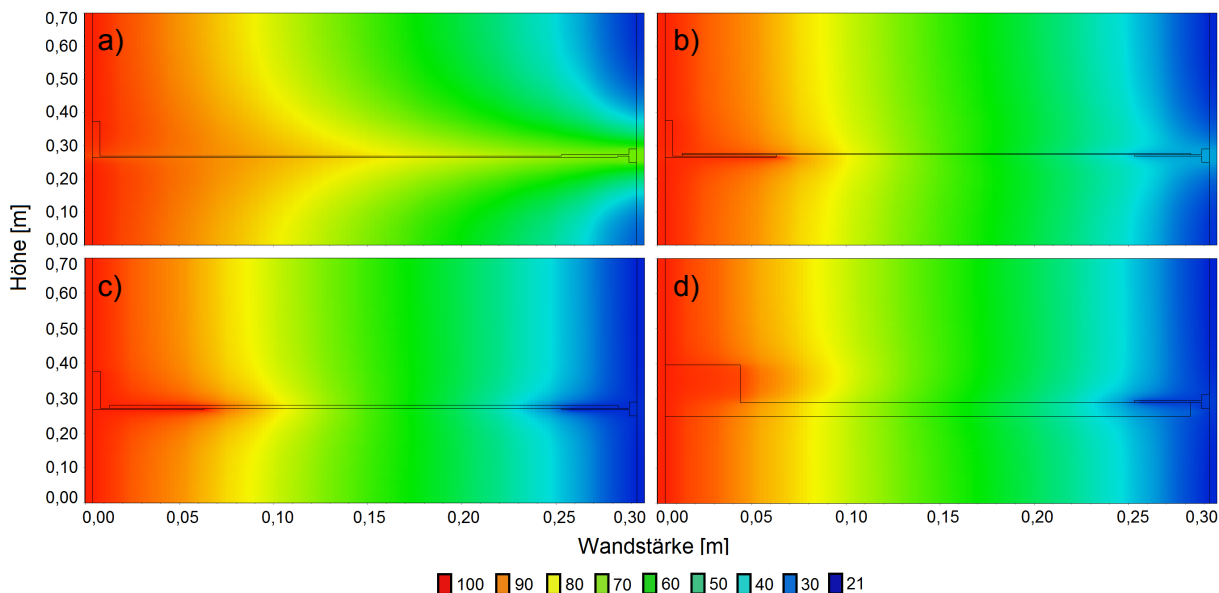


Abbildung 175: Temperaturfelder der Abstandshalter; a) Variante 1 aus Aluminium, b) Variante 2 aus Edelstahl mit Kunststoff-Unterlegscheibe, c) Variante 3 aus GFK, d) Variante 4 aus Polypropylen [14]

Die Temperaturen bei Variante 3 sind am Außenblech nochmals deutlich niedriger als bei Variante 2 und liegen nur noch bei ca. 23 °C. Bei dem Halter aus Polypropylen (Variante 4) ist die Temperatur am Außenblech ebenfalls niedriger als bei Variante 1 und 2 und liegt bei ca. 24 °C.

Abbildung 176 fasst die Temperaturverläufe im Bereich der Halter zusammen. Die hohe Wärmeleitung des Aluminiumprofils ist deutlich zu erkennen. Der noch aus Aluminium gefertigte Winkel an der Speicherwand bei Variante 2 und 3 zeigt sich an dem Knick bei ca. 0,06 m. Die Halter der Varianten 3 und 4 zeigen erwartungsgemäß die niedrigsten Temperaturen am Außenblech (Abbildung 43 rechts). Vor allem der Übergang zum Aluminium Profil an der Außenwand ist optimiert. Der Einsatz von alternativen Materialien bei den Außenblechhaltern zur Reduzierung der Wärmebrücken im Wandaufbau erscheint sehr aussichtsreich.

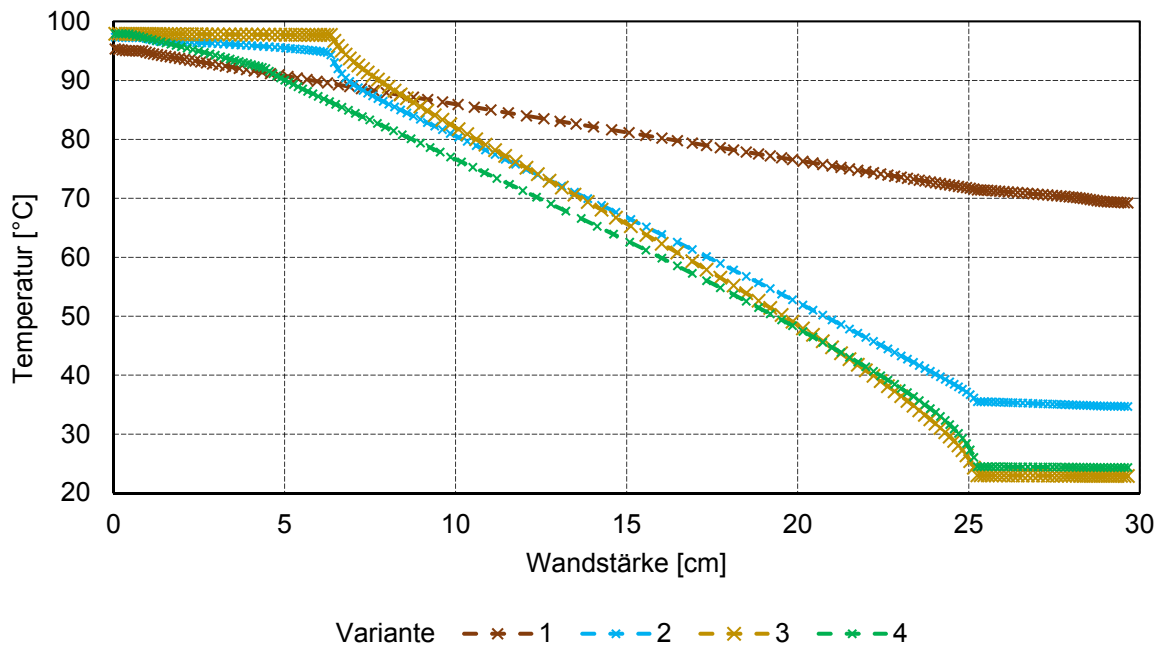


Abbildung 176: Temperaturprofil der simulierten Außenblechhalter-Varianten über die Wandstärke

Wärmestromdichte

Die Übersicht zur Wärmestromdichte (Abbildung 177) verdeutlicht nochmals den Vorteil der Varianten 3 und 4. Der Unterschied zwischen der am Demonstrator zum Einsatz kommenden Variante 2 und der gebräuchlichen Standart-Variante mit Aluminium beträgt bereits ca. 50 %. Bei Variante 3 bzw. 4 verringert sich der Wärmeverlust nochmals. Es ist dann nur noch mit 11 % bzw. 17 % des ursprünglichen Wärmeverlustes bei Variante 1 zu rechnen. Diese oder eine vergleichbare Lösung sind dementsprechend langfristig anzustreben.

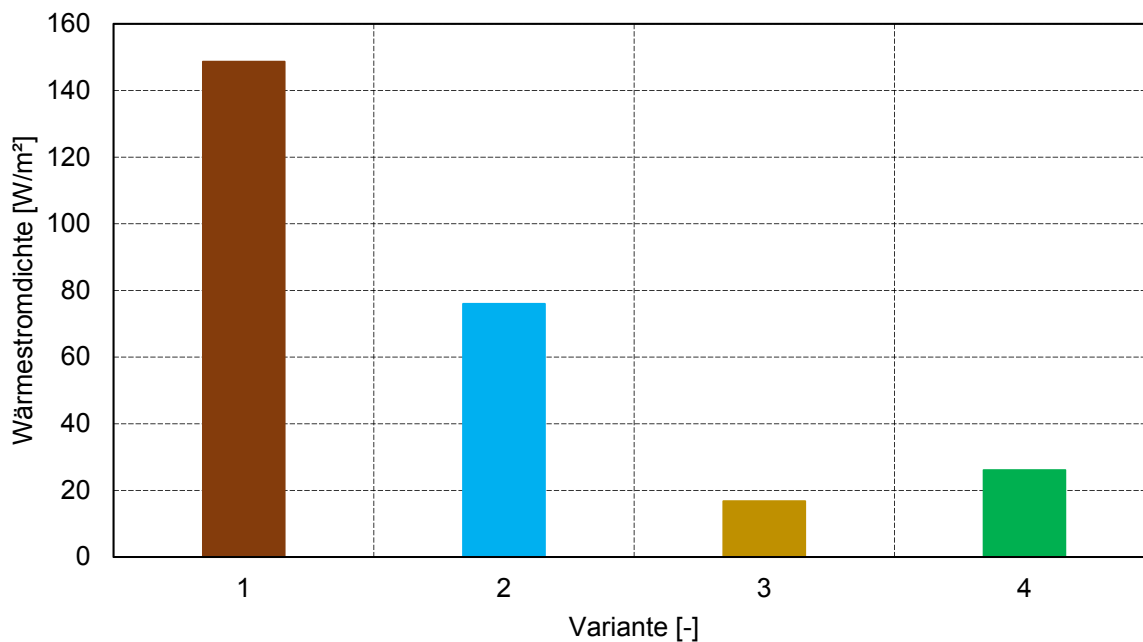


Abbildung 177: Wärmestromdichte der verschiedenen Abstandshalter-Varianten

Die momentan am Demonstrator verbaute Lösung für die Abstandshalter bringt bereits einen großen Vorteil gegenüber den üblichen Aluminium-Haltern. Eine weitere Optimierung der Abstandshalter hinsichtlich einer Verringerung des Wärmeverlustes erscheint vor allem durch die Nutzung von alternativen Werkstoffen wie GFK oder Kunststoffen bzw. ähnlichen Materialien möglich. Die Simulationsergebnisse deuten dabei auf ein sehr großes Einsparungspotential hin.

8.5.3 Beladesysteme

Auch wenn mit dem Radialdiffusor und dem Schichtenlader sehr gute Ergebnisse hinsichtlich des Beladeverhaltens erreicht werden konnten, existieren noch weitere Optimierungsfelder.

Schichtenlader

Für eine Optimierung hat sich zum einen der Aufbau der warmen Zone als günstig herausgestellt. Um diesen zu verbessern, sollte eine Positionierung des Schichtenladers direkt unterhalb der Schwimmdecke erfolgen. Hierdurch wird das Vermischungsgebiet über dem obersten Auslass deutlich reduziert. Aufgrund der Auslenkung der Schwimmdecke befindet sich bei einer festen Fixierung des Beladers im Speicher allerdings noch immer Speicherwasser oberhalb des Schichtenladers. Hier kann in einer weiteren Optimierungsstufe der Schichtenlader auch direkt an der Schwimmdecke befestigt und ggf. sogar anstatt des obersten Auslasses mit einem Radialdiffusor an der Decke kombiniert werden.

Zum anderen stellt die Überprüfung der Funktionsfähigkeit des Schichtenladerkonzeptes für Speicherhöhen über 5 m ein Optimierungsfeld dar. Für diese existiert derzeit keine validierte Auslegungsrichtlinie. Um den Schichtenlader für größere Speicherhöhen zu nutzen, hat sich in numerischen Strömungsberechnungen bspw. die Kombination mehrerer übereinander angeordneter Schichtenlader als sinnvoll erwiesen.

Radialdiffusor

Für den Radialdiffusor steht die Verbesserung des Ausströmverhaltens im Vordergrund. Wie die Untersuchungen am Plexi II veranschaulichten (vgl. mit Abschnitt 4.1.2) kann ein über dem Belader auftretendes asymmetrisches und einseitiges Ausströmen die thermische Schichtung verschlechtern. In den Laboruntersuchungen hat sich die Verwendung von Leit- und Lochblechen bzw. eines Metallschaumrings als wirkungsvolle Maßnahmen erwiesen. Eine Übertragung der Maßnahmen auf den Realmaßstab steht jedoch noch aus.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Im Projekt wurde eine alternative Speicherkonstruktion für den Einsatzbereich von 500 bis 6000 m³ entwickelt. Die Bautechnologie bietet ein signifikantes Kostenreduktionspotenzial gegenüber geschweißten Flachbodentanks. Jedoch mussten aufgrund der dünnwandigen Bauweise und der Projektziele der Wandaufbau, die Einbauten und die Peripherie vollkommen überarbeitet werden.

Im Bereich der Kraft-Wärme-Kopplung besteht auf der Anwendungsseite ein sehr hoher Bedarf zum besseren Ausgleich von Erzeugerleistung und Netzlast bzw. zur Spitzenlastdeckung. Damit können folgende Vorteile erreicht werden:

- bessere Vermarktung von Wärmeüberschüssen,
- Freimachung der Leistung von KWK-Erzeugern (Betrieb nach dem Strommarkt, Überbrückung von Perioden mit niedrigen Strompreisen),
- Minimierung des Taktens von Erzeugern, Vermeidung von Anfahrverlusten usw.,
- technischer Service im Netzgebiet (Notversorgung, Druckhaltung usw.).

Damit soll die Speicherentwicklung einen direkten Beitrag zur Effizienzsteigerung bei den konventionellen Strom- und Wärmeerzeugern und einen indirekten Beitrag für weitere Verbreitung der Wärme- und Stromversorgung aus erneuerbaren Energiequellen liefern. Weiterhin kann man solarthermische Systeme direkt einbinden, um bundesweit den Anteil der solaren Wärmeerzeugung zu steigern. Perspektivisch sollen Synergien zwischen den verschiedenen Energiequellen genutzt werden. Dadurch streben die Autoren wesentliche Beiträge zur Wärmewende an.

Quellen

- [1] Levai, A.: Wärmekraftwerke. Bd. 1 Wirtschaftlichkeitsplanung, Wärmeschaltplan. Berlin: Verlag der Technik, 1959
- [2] Goldstern, W.: Dampfspeicheranlagen. 2. Aufl. Berlin: Springer, 1963.
- [3] Häußler, W. (Hrsg.): Taschenbuch Maschinenbau. Bd. 2 Energieumformung und Verfahrenstechnik. Berlin: Verlag der Technik, 1967
- [4] Pauer, W.; Munser, H.: Grundlagen der Kraft- und Wärmewirtschaft. Wärmelehre und Wärmewirtschaft in Einzeldarstellungen. Dresden: Theodor Steinkopff, 1970. Bd. 20
- [5] Munser, H.: Fernwärmeversorgung. 2. Aufl. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie 1983
- [6] Thümmler, E.: DE102013111543 A1. 2014
- [7] Hedbäck, A.: EP 2 698 584. 2014
- [8] inetz GmbH: www.inetz.de. 2018
- [9] Brædstrup Fjernvarme: <http://www.braedstrup-fjernvarme.dk>. 2018
- [10] Urbaneck, T.; Uhlig, U.; Göschel, T.: Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mit großen Kaltwasserspeichern. 1. VDI-Fachkonferenz - Thermische Energiespeicher in der Energieversorgung (CD-Rom), Düsseldorf: VDI Wissensforum GmbH, 2012. ISBN 978-3-942980-93-7
- [11] Urbaneck, T.; Platzer, B.; Schirmer, U.; Uhlig, U.; Göschel, T.; Baumgart, G.; Fiedler, G.; Zimmermann, D.; Wittchen, F.; Schönfelder, V.: Pilotprojekt zur Optimierung von großen Versorgungssystemen auf Basis der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung mittels Kältespeicherung. Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau (Hrsg.), Stadtwerke Chemnitz AG (Hrsg.), Chemnitz, 2010, Forschungsbericht, Projektträger Jülich (PTJ), FKZ 0327357B/C. - ISBN 3-9811424-4-6 <http://archiv.tu-chemnitz.de/pub/2010/0011/index.html>
- [12] Urbaneck, T.; Platzer, B.: Overground storages in segmental construction for district heating systems (OBSERW) - Project overview. Greenstock, 13th International Conference on Thermal Energy Storage, Peking (China), 2015
- [13] Gerschitzka, M.; Marx, R.; Lang, S.; Bauer, D.; Drück, H.: New developments related to thermal insulation materials and installation techniques for over ground seasonal thermal energy stores. Greenstock, 13th International Conference on Thermal Energy Storage, Peking (China), 2015
- [14] Urbaneck, T.; Findeisen, F.; Mücke, J.; Marx, R.; Lang, S.; Bauer, D.; Rohde, T.; Hoffmann, F.; Gebhardt, S.; Fischer, M.; Beyer, R.: Oberirdische Tankspeicher in Segmentbauweise (OBSERW) – Vorstellung des Projektes. 5. Fachforum Thermische Energiespeicher, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.), 2016, Tagungsband, S. 93-100
- [15] Urbaneck, T.; Findeisen, F.; Mücke, J.; Platzer, B.; Gensbaur, M.; Lang, S.; Bestenlehner, D.; Drück, H.; Herrmann, T.; Beyer, R.: Performance of Overground Hot Water Stores in Segmental Construction for Solar and District Heating Systems. 5th International Solar District Heating Conference, Graz (Österreich), 2018
- [16] Urbaneck, T.; Findeisen, F.; Mücke, J.; Platzer, B.; Gerschitzka, M.; Lang, S.; Bestenlehner, D.; Drück, H.; Herrmann, T.; Beyer, R., 2017: Development of Overground Hot Water Stores in Segmental Construction for Solar and District Heating Systems Within the Project OBSERW. In: International Solar Energy Society (Hrsg.): ISES Solar World Conference 2017 and the IEA SHC Solar Heating and Cooling. Freiburg, 2018, S. 790-797. - ISBN 978-3-9814659-7-6 doi:10.18086/swc.2017.13.11
- [17] Urbaneck, T.; Mücke, J. M.; Findeisen, F.; Gensbaur, M.; Lang, S.; Bestenlehner, D.; Drück, H.; Herrmann, T.; Pieper, K.; Beyer, R.: Entwicklung eines Warmwasserspeichers in Segmentbauweise für Solar- und Fernwärmesysteme. Symposium Solarthermie – Technik für die Energiewende, Staffelstein, Conexio, Pforzheim (Hrsg.), 2018, S. 183-202 (Tagungsband als PDF).

- [18] Mücke, J.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Versuchsstand zum praxisnahen Test von Wandaufbauten für thermische Energiespeicher – Materialuntersuchung des Einblasdämmstoffs aus Polyurethan-Hartschaum-Partikeln 24. Energie - Symposium Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik; Luschtinetz, T.; Lehmann, J. (Hrsg.), Stralsund, 2017, Tagungsband, S. 73-81. – ISBN 978-3-9817740-3-0
- [19] Mücke, J.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Experimental Identification of Effective Thermal Conductivities in Wall Constructions with Blow-In Insulation for Thermal Energy Storage Tanks in Segmental Construction. 5th International Solar District Heating Conference, Graz (Österreich), 2018, Tagungsband, S. 125
- [20] Findeisen, F.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Radiale Diffusoren in Warmwasserspeichern – Funktionale Optimierung mittels CFD; Teil 1 Grundlagen und Modellierung. HLH Lüftung/Klima Heizung/Sanitär Gebäudetechnik Springer 67. Jg. (2016) Heft 10 S. 20-28. - ISSN 1436-5103
- [21] Findeisen, F.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Radiale Diffusoren in Warmwasserspeichern – Funktionale Optimierung mittels CFD; Teil 2 Optimierung des Be- und Entladeverhaltens. HLH Lüftung/Klima Heizung/Sanitär Gebäudetechnik Springer 68. Jg. (2017) Heft 2 S. 25-33. - ISSN 1436-5103
- [22] Findeisen, F.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Radiale Diffusoren in Warmwasserspeichern – Funktionale Optimierung mittels CFD; Teil 3: Detaillierte Untersuchung des Beladeverhaltens. HLH Lüftung/Klima Heizung/Sanitär Gebäudetechnik Springer 68. Jg. (2017) Heft 6 S. 19-27. - ISSN 1436-5103
- [23] Findeisen, F., Urbaneck, T., Platzer, B.: Radiale Diffusoren – Untersuchung des dreidimensionalen Strömungsverhaltens mittels CFD (Teil 1). Chemie Ingenieur Technik, 90. Jg. (2018) Heft 7 S. 956-968. – ISSN 0009-286X, <https://doi.org/10.1002/cite.201700023>
- [24] Findeisen, F., Urbaneck, T., Platzer, B.: Radiale Diffusoren – Untersuchung des dreidimensionalen Strömungsverhaltens mittels CFD (Teil 2). Chemie Ingenieur Technik, 90. Jg. (2018) Heft 7 S. 969-978. – ISSN 0009-286X, <https://doi.org/10.1002/cite.201700070>
- [25] Findeisen, F.; Urbaneck, T. und Platzer, B.: Radiale Diffusoren – Untersuchung des dreidimensionalen Strömungsverhaltens mittels CFD (Teil 3). Chemie Ingenieur Technik. 2017, doi:10.1002/cite.201700126
- [26] Findeisen, F.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Radial Diffusers in Stratified Hot Water Stores: Geometry Optimization with CFD. In: International Solar Energy Society (Hrsg.): ISES Solar World Conference 2017 and the IEA SHC Solar Heating and Cooling. Freiburg, 2018, S. 726-734. - ISBN 978-3-9814659-7-6 doi:10.18086/swc.2017.13.04
- [27] Findeisen, F.; Kroll, U.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Radial Diffusers in Stratified Hot Water Stores: Simulation of Three-Dimensional Flow Behavior with CFD. 5th International Solar District Heating Conference, Graz (Österreich), 2018, Tagungsband, S. 132
- [28] Urbaneck, T.; Platzer, B.; Findeisen, F.: Warmwasserspeicher – Stand der Technik und Entwicklungen. HLH Lüftung/Klima Heizung/Sanitär Gebäudetechnik Springer 67. Jg. (2016) Heft 07-08 S. 16-21. - ISSN 1436-5103
- [29] Findeisen, F.: Radiale Diffusoren in Warmwasserspeichern – Einfluss der Beladegerometrie auf Strömungsverhalten und Schichtungsqualität. Dissertation, TU Chemnitz. 2018. – ISBN 978-3-9811424-7-1
- [30] Lang, S.; Marx, R.; Gerschitzka, M.; Drück, H.; Urbaneck, T.; Mücke, J.; Hoffmann, F.; Gebhardt, S.; Beyer, R.: Hot water stores in segmental construction: adhesive strength between sealing materials and segment coatings. Book of Abstracts, The Energy and Material Research Conference (EMR2017), Lisbon, Portugal, 2017
- [31] Lang, S.; Bauer, D.; Drück, H.: Neue Untersuchungen zu Wärmedämmstoffen für thermische Energiespeicher. 5. Fachforum Thermische Energiespeicher, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.), 2016, Tagungsband, S. 53-55

- [32] Urbaneck, T.; Findeisen, F.; Platzer, B.: Thermischer Energiespeicher in Form eines Flachbodentanks. DE102016100649A1
- [33] Urbaneck, T.; et al.: www.obserw.de. Version: 22.10.2018
- [34] Einstein project: Effective Integration of Seasonal Thermal Energy Storage Systems in existing Buildings: https://cordis.europa.eu/project/rcn/102067_en.html. FKZ: 284932. 2012-2015
- [35] Gensbaur, M.: Interne Arbeiten. Universität Stuttgart Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), 2017
- [36] Urbaneck, T.: Interne Arbeiten. 2016-2018
- [37] Morgan Advanced Materials; Porextherm, Datenblatt Vacupor(R) NT, 2017
- [38] 3M GmbH, 3M Power Line Kleb- und Dichtmassen 760 Technisches Datenblatt, Neuss, 2009
- [39] tewipack Uhl GmbH, Dow Corning, Distributors Group Europe (DGE), Silikon Kleb- und Dichtstoffe in Industriequalität, Althengstett, 2016
- [40] SABA Dinxperlo BV, Produktdatenblatt SABA Sealer MB, Dinxperlo, NL, 2018
- [41] Sika Deutschland GmbH, Produktdatenblatt Version 2 (07 /2010) Sikasil(R) AS-70, Stuttgart, 2010.
- [42] Findley, W. N.: Creep Characteristics of Plastics, Symposium on Plastics. Am. Soc. Testing Mats., 1944
- [43] Roscher, W.: Interne Arbeiten. Technische Universität Chemnitz Institut für Mechanik und Thermodynamik, 2017
- [44] Rathi-Dämmsysteme GmbH: <http://www.rathi.de/produkte/rathipur-daemmgranulat-kd/>. 2018
- [45] Norm DIN 19661-2: September 2000. Sohlenbauwerke
- [46] Norm DIN 14688-2: Dezember 2013. Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden – Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen
- [47] VDI e.V.; VDI-GVC: VDI-Wärmeatlas. 11. Auflage Berlin Heidelberg. Springer-Verlag 2013, 754ff.
- [48] Bauer, D.; Drück, H.; Lang, S.; Marx, R.; Plaz, T.: Weiterentwicklung innovativer Technologien zur solaren Nahwärme und saisonalen Wärmespeicherung. Universität Stuttgart Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), 2016.
- [49] Michejew, M. A.: Grundlagen der Wärmeübertragung. 3. Auflage Berlin. VEB Verlag Technik 1964.
- [50] Lang, S.: Interne Arbeiten. Universität Stuttgart Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), 2017
- [51] Institut für Bauklimatik, TU Dresden: DELPHIN. Software. Dresden, 2016.
- [52] Urbaneck, T.: Berechnung des thermischen Verhaltens von Kies-Wasser-Speichern. Diss., TU Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, 2004. Berichte aus der Energietechnik, Aachen, Shaker, 2004. - ISBN 3-8322-2762-8
- [53] Ochs, F.; Bianchi Janetti, M.; Klesnil, O.: Wärmeleitfähigkeit von Schüttungen aus Glasschaumgranulat: Messtechnische Analyse sowie analytische und numerische Modellierung. Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, 2015.
- [54] Herwig, H.: Wärmeübertragung A-Z. 1. Auflage Berlin: Springer-Verlag, 2000
- [55] Norm DIN EN ISO 10456: Mai 2010. Baustoffe und Bauprodukte – Wärme- und feuchtetechnische Eigenschaften
- [56] Phymas GbR: http://www.phymas.de/?page_id=25. 2018
- [57] Holzbecher, E.: Modeling Density-Driven Flow in Porous Media. 1. Auflage Berlin: Springer-Verlag, 1998
- [58] MacGregor, R. K.; Emery, A. F.: Trans. ASME, Journal of Heat Transfer, Series C 91, 1969, S. 391/403

- [59] VDI e.V.; VDI-GVC: VDI-Wärmeatlas. 11. Auflage Berlin Heidelberg. Springer-Verlag 2013, 445 ff., 643, 650, 765 ff.
- [60] Albrecht, W.: Cell-Gas Composition – An Important Factor in the Evaluation of Long-Term Thermal Conductivity in Closed-Cell Foamed Plastics. In: Cellular Polymers, Vol. 19, No. 5, 2000
- [61] Berkovsky, B.M.; Polevikov, V.: Numerical Study of Problems on high-intensive free convection. In: Heat transfer and turbulent buoyant convection, Vol. 1 and 2. Washington: Spalding, 1976
- [62] Krischer, O.; Kast, W.: Trocknungstechnik: Bd. 1: 3. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [63] Pflugradt, N.; Lehnguth, M.; Schirmer, U.: Ikr (Luft-Kennwert-Rechner), Software. Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik, 2009.
- [64] Urbaneck, T.: Kältespeicher – Grundlagen, Technik, Anwendung. München: Oldenbourg 2012. – ISBN 978-3-486-70776-2
- [65] Herwig, A.; Rühling, K.: Kriterien zur Bewertung der Energieeffizienz von Wärmespeichern – Teil 2 Chancen einer neuen Messmethodik. EuroHeat&Power 44. Jg. (2015) H. 4 S. 28-35.
- [66] Coanda, H.: Lifting apparatus. USA Patent US3261162A, 1911
- [67] Urbaneck, T.; Barthel, U.; Uhlig, U.: Be- und/oder Entladesystem und Verfahren zum Be- und/oder Entladen eines thermischen Energiespeichers mit einem zwischen den Diffusionsplatten vorgesehenen Einsatz. EP 2003414
- [68] Verein Deutscher Ingenieure: VDI-Wärmeatlas. 10. Auflage. Springer, 2006. ISBN 978-3-540-25504-8
- [69] Gan, G.; Riffat, S. B.: Pressure loss characteristics of orifice and perforated plates. Experimental Thermal and Fluid Science. 1997, 14, Nr. 2, S. 160–165
- [70] Shaaban, S.: On the performance of perforated plate with optimized hole geometry. Flow Measurement and Instrumentation. 2015, 46, S. 44–50
- [71] Göppert, S.; Lohse, R.; Urbaneck, T.; Schirmer, U.; Bühl, J.; Nilius, A.; Platzer, B.: Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Speicher- und Erdbeckenspeicher. Abschlussbericht BMU-Forschungsvorhaben, FKZ: 0329271A, Chemnitz: TU Chemnitz, 2009. – ISBN 978-3-9811424-0-2
- [72] Lohse, R.; Göppert, S.; Urbaneck, T.; Rauh, H.; Schirmer, U.; Platzer, B.: Schichtenbeladeeinrichtung mit mehreren über der Höhe verteilten Auslässen. DE10 2007056720
- [73] Lohse, R.; Göppert, S.; Urbaneck, T.; Schirmer, U.; Platzer, B.; Bühl, J.; Nilius, A.: Planungsleitfaden zur geschichteten Be- und Entladung thermischer Speicher in solarthermischen Anlagen. Hrsg.: TU Chemnitz, Professur Technische Thermodynamik und TU Ilmenau, Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik, 2009. – ISBN 978-3-9811424-1-9
- [74] Lohse, R.: Einfluss von Beladeeinrichtungen auf die thermische Schichtung in Warmwasserspeichern. TU Chemnitz, Dissertation. 2010
- [75] Schlötter, M.; Grobstich, A.: EP 2881 682.2015
- [76] Hedbäck, T.; Hedbäck, A.: DE 43 05 867. 1993.
- [77] Dittmann, A.; Dittmann, L.; Neske, C.; Wirths, A.: Kriterien zur Bewertung der Energieeffizienz von Wärmespeichern – Teil 1 Grundlagen. EuroHeat&Power 44. Jg. (2015) H. 3 S. 24-30.
- [78] Herwig, A.; Rühling, K.: Kriterien zur Bewertung der Energieeffizienz von Wärmespeichern – Teil 2 Chancen einer neuen Messmethodik. EuroHeat&Power 44. Jg. (2015) H. 4 S. 28-35.
- [79] Delphin Technology AG: Profisignal Basic. 2017
- [80] Delphin Technology AG: <https://www.delphin.de/produkte/mess-und-pruefgeraete/profimesage.html>. 2018
- [81] Kroll, U.: Radialdiffusoren in Warmwasserspeichern – Auswertung der Schichtungsqualität mit mathematischen Methoden. TU Chemnitz, Masterarbeit, 2018
- [82] Kähler, N.; Lilienthal, S.; Rohde, T.: Abstandshalter für Behälterisolierung 5543 – 10 WI 10 # 01, 01.11.2016

- [83] Reichelt Chemietechnik GmbH + Co.: <http://www.rct-online.de/de/HmswGlossar/detail/id/18>. 2018
- [84] Lambert GmbH: http://www.lambert-metall.com/dokumente/Aluminium_Werkstoffuebersicht.pdf. 2018
- [85] Material Archiv: http://www.ezentraubilder.de/rg/pdf/td_de_GFK-Plattenhalbzeuge.pdf. 2018
- [86] Beikircher, T.; Benz, N.; Gut, M.; Kronthaler, P.; Oberdorf, C.; Schölkopf, W.; Drück, H.: In situ short term test procedure for large solar thermal systems. In: Proceedings of ISES Solar World Congress 1999, Jerusalem, Israel, 1999.
- [87] International Standard 9459-4:2013(E): Solar heating - Domestic water heating systems - Part 4: System performance characterization by means of component tests and computer simulation. 2013.
- [88] Rainer, J.: Validierung eines Rechenmodells für Großspeicher zur Auslegung solarer Heizsysteme. Dissertation. Philipps-Universität Marburg, Fachbereich Physik, 2002.
- [89] Gerschitzka, M., Lang, S., Rieder, M., Sirch, M., Marx, R., Bauer, D., Drück, H.: Entwicklung großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Dämmung zur Außenaufstellung. Abschlussbericht zur Forschungsprojekt StoEx (FKZ: 0325992A+B), Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, 2016. DOI 10.2314/GBV: 871703238.
- [90] Cruickshank C. A.; Harrison S. J.: Heat loss characteristics for a typical solar domestic hot water storage. Energy and Buildings 42 (2010) S. 1703-1710, 2010.
- [91] DIN EN 12977-3:2012: Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile -Kundenspezifisch gefertigte Anlagen -Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.,2012.
- [92] DIN EN 12977-4:2012: Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile -Kundenspezifisch gefertigte Anlagen -Teil 4: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung (Kombispeicher). DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2012.
- [93] Gerschitzka, M.; Schmidt, D.; Bestenlehner, D.; Marx, R.; Drück, H.: Thermal performance testing of outdoor hot water stores for long-term thermal energy storage. In: International Solar Energy Society (Hrsg.): ISES Solar World Conference 2017 and the IEA SHC Solar Heating and Cooling. Freiburg, 2018, S. 742-752. - ISBN 978-3-9814659-7-6 doi:10.18086/swc.2017.13.06
- [94] Drück, H.: Weiterentwicklung und Validierung des Modells für solare Warmwasserspeicher "4Port" für das Simulationsprogramm TRNSYS. Diplomarbeit. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart, 1994. (nicht veröffentlicht)
- [95] Drück, H.: MULITPORT 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, Version 1.99F, March 2006.
- [96] Drück, H.: Mathematische Modellierung und experimentelle Prüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen / Mathematical modelling and experimental testing of hot water stores for thermal solar systems. Dissertation Universität Stuttgart, Shaker Verlag 2007. - ISBN 978-3-8322-6215-0, ISSN 0945-0726
- [97] Spirkl, W.: Dynamische Vermessung von Solaranlagen zur Warmwasserbereitung. Fortschrittsbericht VDI-Reihe 6, Nr. 241, Düsseldorf: VDI-Verlag 1990. - ISBN: 3-18-144106-6.
- [98] Beikircher, T.; Buttinger, F.; Demharter, M.; Herzog, F.; Reuß, M.: Superisolierter Heißwasser-Langzeitwärmespeicher (FKZ: 0325964A). ZAE Bayern. Abschlussbericht. 2013. <http://opac-tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=3/TTL=3/SHW?FRST=1>. [Online-Zugriff am 04.12.2017]
- [99] 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
- [100] Gensbaur, M.; Gohl, N.; Bestenlehner, D.; Drück, H.: Investigation of the integration of a newly developed overground hot water store in solar district heating system. 5th International Solar District Heating Conference, Graz (Österreich), 2018, Tagungsband

- [101] Raab, S.: Simulation, Wirtschaftlichkeit und Auslegung solar unterstützter Nahwärmesysteme mit Heißwasser-Wärmespeicher, Dissertation, Cuvillier Verlag, Göttingen, 2006. - ISBN: 3-86727-048-1
- [102] Marx, R.; Nußbicker-Lux, J.; Bauer, D.; Heidemann, W.; Drück, H.: Saisonale Wärmespeicher – Bauarten, Betriebsweise und Anwendungen. Chemie Ingenieur Technik 2011, 83, No. II, 1994-2001

Vorträge & Poster

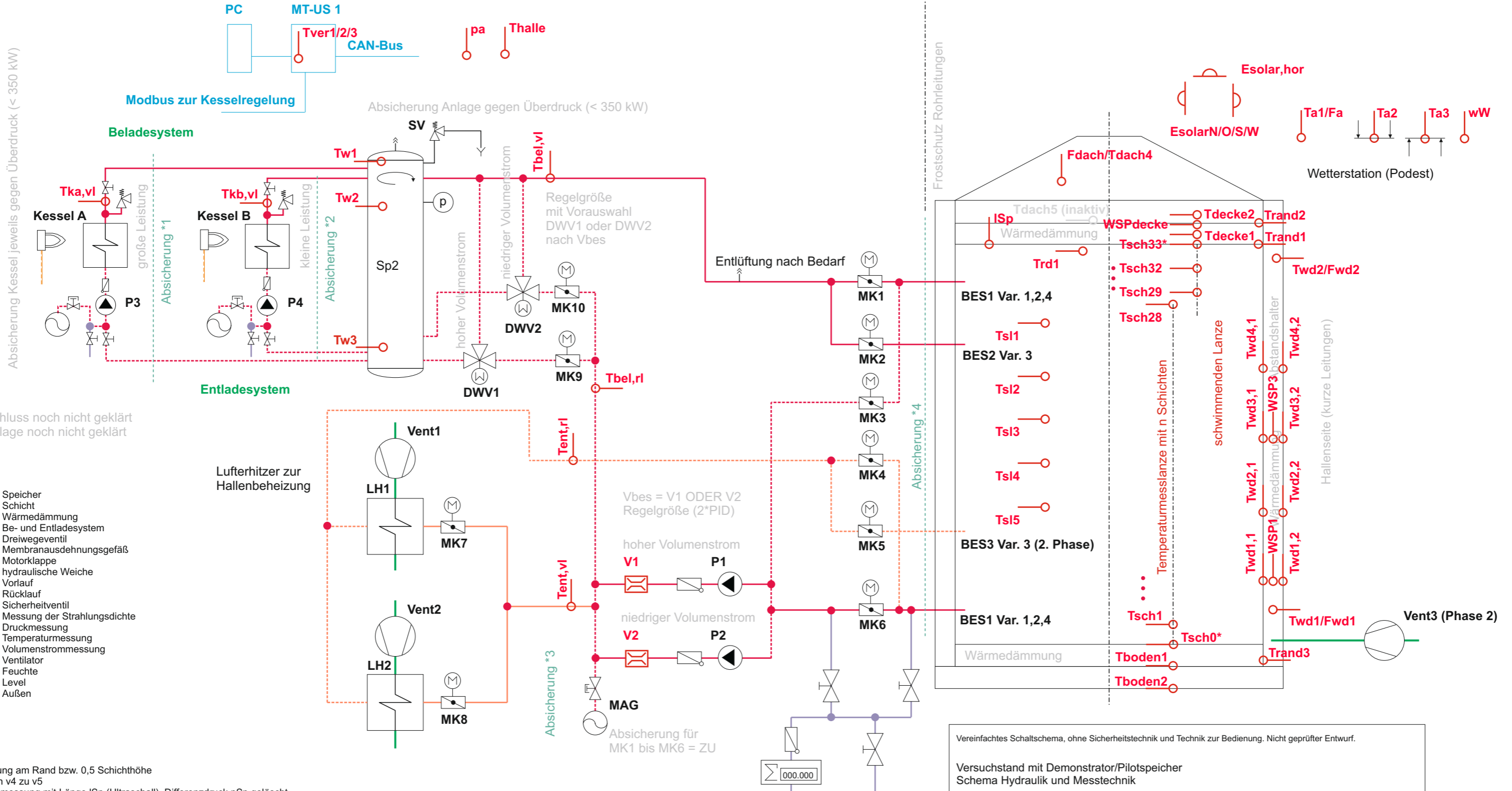
- 1) Urbaneck, T.; Bauer, D.; Drück, H.; Hoffmann, F.; Beyer, R.: Verbundvorhaben: Oberirdische Speicher in Segmentbauweise für Wärmeversorgungssysteme (OBSERW). Vortrag, Statusseminar der Förderinitiative Energiespeicher 2015, Berlin, 22. bis 23.04.2015, Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi)
- 2) Urbaneck, T.; Platzer, B.: Overground storages in segmental construction for district heating systems (OBSERW) - Project overview. Poster, Greenstock, 13th International Conference on Thermal Energy Storage, Peking (China), 19.05.bis 21.05.2015, China Academy of Building Research
- 3) Gerschitzka, M.; Marx, R.; Lang, S.; Bauer, D.; Drück, H.: New developments related to thermal insulation materials and installation techniques for over ground seasonal thermal energy stores. Poster, Greenstock, 13th International Conference on Thermal Energy Storage, Peking (China), 19.05.bis 21.05.2015 China Academy of Building Research
- 4) Lang, S.; Bauer, D.; Drück, H.: Neue Untersuchungen zu Wärmedämmstoffen für thermische Energiespeicher. Postervortrag, 5. Fachforum Thermische Energiespeicher, Neumarkt (Oberpfalz), 30.06. bis 01.07.2016, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.)
- 5) Urbaneck, T., Findeisen, F.; Mücke, J.; Marx, R.; Lang, S.; Bauer, D.; Rohde, T.; Hoffmann, F.; Gebhardt, S.; Fischer, M.; Beyer, R.: Oberirdische Tankspeicher in Segmentbauweise (OBSERW) – Vorstellung des Projektes. Vortrag, 5. Fachforum Thermische Energiespeicher, Neumarkt (Oberpfalz), 30.06. bis 01.07.2016, Ostbayerisches Technologie Transfer Institut e.V. (OTTI), Regensburg (Hrsg.)
- 6) Lang, S.; Marx, R.; Gerschitzka, M.; Drück, H.; Urbaneck, T.; Mücke, J.; Hoffmann, F.; Gebhardt, S.; Beyer, R.: Hot water stores in segmental construction: adhesive strength between sealing materials and segment coatings. Vortrag, Book of Abstracts, The Energy and Material Research Conference (EMR2017), Lisbon, Portugal, 05.-07.04.2017.
- 7) Urbaneck, T.; Findeisen, F.; Mücke, J.; Gerschitzka, M.; Lang, S.; Drück, H.; Herrmann, T.; Beyer, R.: OBSERW Project – Network: Overground storages in segmental construction for district heating systems. Vortrag, Energy Conservation Through Energy Storage (ECES), Annex 30 Thermal Energy Storage for Cost Effective Energy Management and CO2 Mitigation, 4th Expert Workshop and Joint workshop, Lleida (Spanien), 24.04. bis 26.04.2017, International Energy Agency (IEA)
- 8) Gerschitzka, M.; Schmidt, D., Bestenlehner, D., Marx, R.; Drück, H.: Thermal performance testing of outdoor hot water stores for long-term thermal energy storage. Poster, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Abu Dhabi (UAE), 29.10. bis 02.11.2017, PSE AG
- 9) Urbaneck, T.; Findeisen, F.; Mücke, J.; Platzer, B.; Gerschitzka, M.; Lang, S.; Bestenlehner, D.; Drück, H.; Herrmann, T.; Beyer, R.: Development of Overground Hot Water Stores in Segmental Construction for Solar and District Heating Systems Within the Project OBSERW. Poster, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Abu Dhabi (UAE), 29.10. bis 02.11.2017, PSE AG
- 10) Findeisen, F.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Radial Diffusers in Stratified Hot Water Stores: Geometry Optimization with CFD. Poster, International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Abu Dhabi (UAE), 29.10. bis 02.11.2017, PSE AG

- 11) Mücke, J.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Versuchsstand zum praxisnahen Test von Wandaufbauten für thermische Energiespeicher – Materialuntersuchung des Einblasdämmstoffs aus Polyurethan-Hartschaum-Partikeln. Vortrag, 24. Energie - Symposium Nutzung regenerativer Energiequellen und Wasserstofftechnik, Stralsund, 09.11. bis 11.11.2017, Hochschule Stralsund
- 12) Urbaneck, T.; Uhlig, U.; Göschel, T.: Warm- und Heißwasserspeicher – Stand der Technik und Entwicklungen. Vortrag, VDI-Fachkonferenz – Sektorenkopplung im Bereich Industrie, Netze und Quartiere, Frankfurt am Main, 13.12. bis 14.12.2017, VDI Wissensforum GmbH
- 13) Urbaneck, T.; Findeisen, F.; Mücke, J.; Platzer, B.; Gensbaur, M.; Lang, S.; Bestenlehner, D.; Drück, H.; Herrmann, T.; Beyer, R.: Performance of Overground Hot Water Stores in Segmental Construction for Solar and District Heating Systems. Poster, 5th International Solar District Heating Conference, Graz (Österreich), 11.04. bis 12.04.2018, AEE - Institut für Nachhaltige Technologien u. a.
- 14) Findeisen, F.; Kroll, U.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Radial Diffusers in Stratified Hot Water Stores: Simulation of Three-Dimensional Flow Behavior with CFD. Poster, 5th International Solar District Heating Conference, Graz (Österreich), 11.04. bis 12.04.2018, AEE - Institut für Nachhaltige Technologien u. a.
- 15) Mücke, J.; Urbaneck, T.; Platzer, B.: Experimental Identification of Effective Thermal Conductivities in Wall Constructions with Blow-In Insulation for Thermal Energy Storage Tanks in Segmental Construction. Poster, 5th International Solar District Heating Conference, Graz (Österreich), 11.04. bis 12.04.2018, AEE - Institut für Nachhaltige Technologien u. a.
- 16) Urbaneck, T.; Mücke, J. M.; Findeisen, F.; Gensbaur, M.; Lang, S.; Bestenlehner, D.; Drück, H.; Herrmann, T.; Pieper, K.; Beyer, R.: Entwicklung eines Warmwasserspeichers in Segmentbauweise für Solar- und Fernwärmesysteme. Vortrag, Symposium Solarthermie – Technik für die Energiewende, Staffelstein, 13.06. bis 15.04.2018, Conexio
- 17) Urbaneck, T.; Mücke, J. M.; Findeisen, F.; Gensbaur, M.; Lang, S.; Bestenlehner, D.; Drück, H.; Beyer, R.; Pieper, K.: Demonstration of an Overground Hot Water Store in Segmental Construction for District Heating Systems. Poster, 16th International Symposium on District Heating and Cooling (DHC2018). Hamburg, 09.09. bis 12.09.2018, HafenCity Universität Hamburg u. a.

Anlage A zum Abschlussbericht OBSERW - FKZ: 03ET1230A/B/C

Innenbereich

Außenbereich



Absicherung Kessel jeweils gegen Überdruck (< 350 kW)

Gasanschluss noch nicht geklärt
Abgasanlage noch nicht geklärt

- Sp ... Speicher
- Sch ... Schicht
- WD ... Wärmedämmung
- BES ... Be- und Entladesystem
- DWV ... Dreiwegeventil
- MAG ... Membranausdehnungsgefäß
- MK ... Motorklappe
- W ... hydraulische Weiche
- VL ... Vorlauf
- RL ... Rücklauf
- SV ... Sicherheitventil
- E ... Messung der Strahlungsdichte
- p ... Druckmessung
- T ... Temperaturmessung
- V ... Volumenstrommessung
- Vent ... Ventilator
- F ... Feuchte
- I ... Level
- a ... Außen

- * ... Messung am Rand bzw. 0,5 Schichthöhe
- Änderungen v4 zu v5
- Füllstandsmessung mit Länge lSp (Ultraschall), Differenzdruck pSp gelöscht
- keine Einbindung Heizkreis, zwei Lufterhitzer
- P5, Trh,vi, Trh,rl entfernt -> neu: Tka,vi und Tkb,vi
- Vent 2 neu im Lufterhitzer 2
- Begriff LH neu

Vereinfachtes Schaltschema, ohne Sicherheitstechnik und Technik zur Bedienung. Nicht geprüfter Entwurf.

Versuchstand mit Demonstrator/Pilotspeicher
Schema Hydraulik und Messtechnik

Technische Universität Chemnitz
Fakultät für Maschinenbau
Professur Technische Thermodynamik
PD Dr.-Ing. habil. Thorsten Urbaneck; M. Sc. Jan Mücke

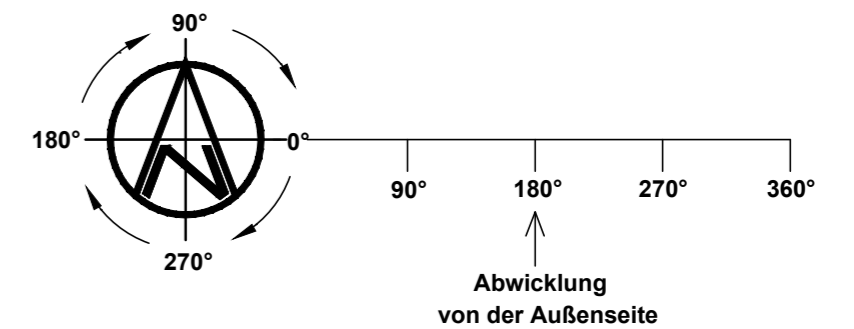
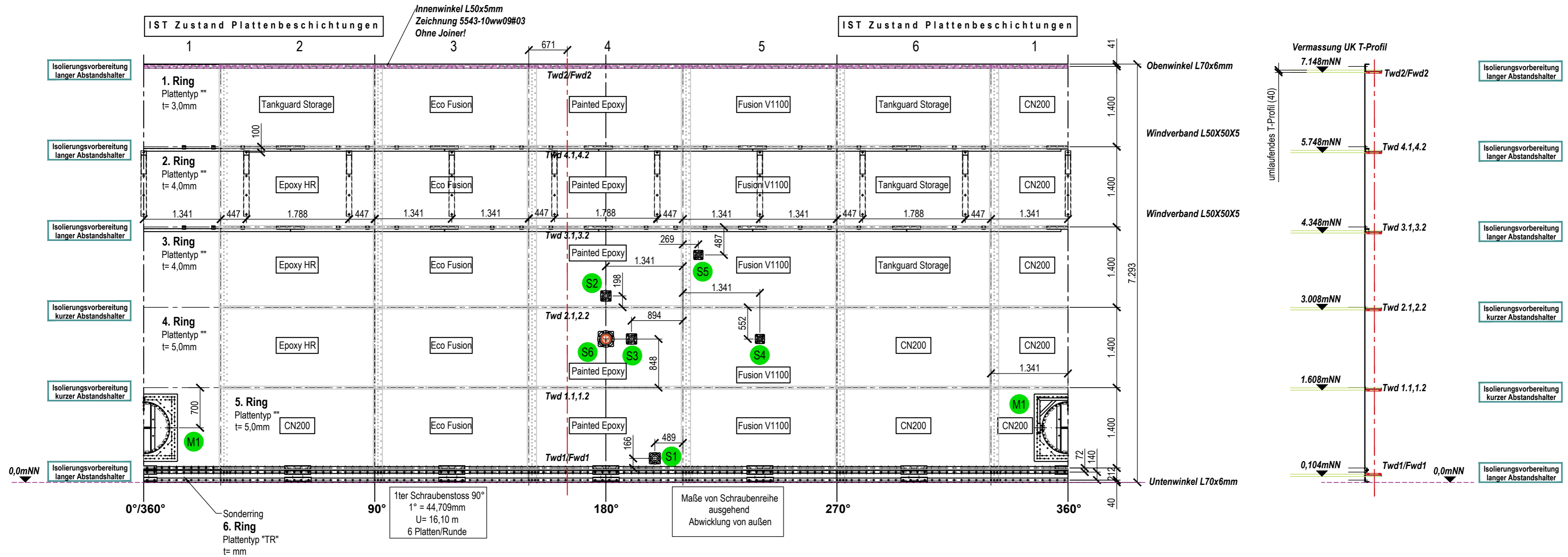
Stand: 20.09.2016

- Absicherung**
- *1: Kessel A (maximale Temperatur/Druck, Füllung) MAG, Kessel-Sicherheitsgruppe mit Kappenventil, Manometer, Druckwächter, Sicherheits-Temperaturbegrenzer; Temperaturüberwachung (Delphin)
 - *2: Kessel B (maximale Temperatur/Druck, Füllung) MAG, Kessel-Sicherheitsgruppe mit Kappenventil, Manometer, Druckwächter, Sicherheits-Temperaturbegrenzer; Temperaturüberwachung (Delphin)
 - *3: Anlage (maximale Temperatur/Druck, Füllung) MAG, Sicherheitsventil, Temperaturüberwachung (Delphin)
 - *4: Speicher (maximaler/minimaler Druck, Füllung, maximale/minimale Temperatur) Verbindung zur Atmosphäre und Luke im Schwimmdach, Temperaturüberwachung (Delphin), Füllstandsüberwachung (Delphin)

SCHATTENSEITE

Schichtdicken:

Ceramic Polymer CN200	350-400µm
Jotun Epoxy HR	240-250µm
Jotun Tankguard Storage	230-260µm



OBSERV		Stutzenliste für Thermischer Speicher / Demonstrator										
PR005543		Demonstrator										
Nr.	DN	PN	einseitiger Flansch	zweiseitiger Flansch	DIN EN	Länge außen	Länge innen	Höhe "(ausgehend von Fundament)"	Grad	Material	Benennung	Anmerkung
1	DN80	10	x		1092-1	450	x	418	199°	1.4301	Entleerung	
2	DN65	10		x	1092-1	450	150	3.250	180°	1.4301	Anschluss Diffusor, oben	BES 1
3	DN65	10		x	1092-1	450	150	2.500	190°	1.4301	Anschluss Diffusor, unten	BES 1
4	DN50	10		x	1092-1	450	150	2.500	240°	1.4301	freier Stutzen	BES 3
5	DN50	10		x	1092-1	450	150	3.965	216°	1.4301	Anschluss Schichtlader	BES 2
6	DN150	10	x		1092-1	400	50	2.500	180°	1.4301	für Kabeldurchführung	
7	DN150	10	x		1092-1	150 +	--	Dach R= 1.605mm	359°	St. Fvz.	Be- und Entlüftung	
8	DN65	10			1092-1	x	25	Dach R= 2.335mm	160°	1.4301	(ohne Flansch)	
9	DN100	10			1092-1	x	25	Dach R= 2.335mm	193°	1.4301	Ultraschallmessung (mit Muffe 1 1/2")	
10								Dach R= 2.063mm	132°		dynamische Messlanze	
11								Dach R= 2063mm	160°		statische Messlanze	
12								Dach - Center	Mittelpunkt		Dachlanze	
M 1	DN800	Sonderbau						952	120°	Epoxy	Mannloch	

Änd. 6			
Änd. 5			
Änd. 4			
Änd. 3	Beschichtung, Mannloch	07.02.2017	S. Lilienthal, K. Pieper
Änd. 2	Konsolen	02.03.2016	S. Lilienthal, T. Rohde
Änd. 1	überarbeitet nach Mail vom 25.02.2016	26.02.2016	S. Lilienthal, T. Rohde
Änderung		Datum	Zeichner
Dokumentenart	Allgemeintoleranz	DIN ISO 5456-2	Werkstoff
	ISO 2768-1mK		J.
	Erstellt durch	Genehmigt von	Projektnummer
	S. Lilienthal	T. Rohde	PR 005543
	Titel, Zusätzlicher Titel		Zeichnungsnummer
	BMW Projekt: OBSERV		5543 - 10 WW 03
	Thermischer Speicher / Demonstrator		Maßstab
	Mantelabwicklung		1:50
		Änd.	3
		Ausgabedatum	18.02.2016
		Format	DIN A2 1
		Blatt	
SCHUTZVERMERK: Weitergabe sowie Vervielfältigung dieser Unterlage, Verwertung und Mitteilung ihres Inhalts ist nicht gestattet, soweit nicht ausdrücklich zugestanden. Zuwiderhandlungen verpflichten zu Schadenersatz. Alle Rechte sind für den Fall der Patenterteilung oder GM-Eintragung vorbehalten. Copyright reserved!			



FEE Solutions GmbH
 Kolberger Straße 13
 24589 Nortorf
 www.ffe-solutions.com
 Tel. +49 (0)4392 91 77-0
 Fax +49 (0)4392 5864