

Abschlussbericht

zum BMWi-Forschungsprojekt

Entwicklung großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Dämmung zur Außenaufstellung

FKZ: 0325992A+B

Autoren: Markus Gerschitzka - Stephan Lang - Michael Rieder - Markus Sirch - Roman Marx - Dan Bauer - Harald Drück

Projektverantwortung: Dr. Dan Bauer und Dr. Harald Drück

Wissenschaftliche Leitung: Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW), Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS), Pfaffenwaldring 6, 70550 Stuttgart



Industriepartner: Firma Sirch Tankbau Tankservice Speicherbau GmbH, Schneekoppenweg 9, 87600 Kaufbeuren-Neugablonz



Laufzeit des Forschungsprojekts: 01.01.2013 - 31.12.2015

Datum dieses Abschlussberichts: 12.08.2016

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unter dem Förderkennzeichen 0325992A+B aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren danken für die Unterstützung und übernehmen die Verantwortung für den Inhalt dieses Berichts.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

ZUSAMMENFASSUNG	4
VORWORT.....	8
1 STAND DER TECHNIK	10
2 ZIELSTELLUNG DES VORHABENS	11
3 SIMULATIONSSTUDIE ZU HOCHEFFIZIENTEN WARMWASSERSPEICHERN	13
3.1 SIMULATIONSMODELLE	13
3.2 SIMULATIONSERGEBNISSE	14
3.3 ANFORDERUNGEN AN DIE SPEICHERBAUREIHE.....	17
3.4 ZUSAMMENFASSUNG	17
4 TECHNOLOGIEENTWICKLUNG VAKUUMWÄRMEDÄMMUNG	18
4.1 THEORETISCHE GRUNDLAGEN.....	18
4.2 WÄRMEDÄMMSTOFFE	20
4.3 EXPERIMENTELLER AUFBAU.....	22
4.4 MESSERGEBNISSE.....	25
4.5 VERSPIEGELTE INNENWÄNDE.....	30
4.6 ZUSAMMENFASSUNG	32
5 TECHNOLOGIEENTWICKLUNG TRANSPARENTE WÄRMEDÄMMUNG	34
5.1 STAND DER TECHNIK UND MARKTRECHERCHER.....	34
5.2 EXPERIMENTELLER AUFBAU.....	37
5.3 MESSERGEBNISSE UNTERSCHIEDLICHER TWD-STRUKTUREN	39
5.3.1 <i>Referenzmessung</i>	39
5.3.2 <i>Vergleichsmessung unterschiedlicher TWD-Strukturen</i>	40
5.3.3 <i>Messung zur Oberflächentemperaturverteilung des Absorberblechs</i>	43
5.3.4 <i>Beständigkeit der TWD-Materialien.....</i>	44
5.4 ZUSAMMENFASSUNG	45
6 TECHNOLOGIEENTWICKLUNG SCHICHTBE- UND ENTLADEEINRICHTUNG.....	46
6.1 STAND DER TECHNIK UND MARKTRECHERCHER.....	46
6.2 EXPERIMENTELLER AUFBAU.....	49
6.3 MESSERGEBNISSE UNTERSCHIEDLICHER SCHICHTBE- UND ENTLADEEINRICHTUNGEN	51
6.3.1 <i>Einströmvorrichtung mit fester Austrittshöhe.....</i>	51
6.3.2 <i>Schichtbe- und Entladeeinrichtung mit variabler Austrittshöhe.....</i>	53
6.4 ZUSAMMENFASSUNG	57
7 UNTERSUCHUNG MEHRERER FUNKTIONSMUSTER IM TECHNIKUMSMARSTAB.....	59
7.1 EXPERIMENTELLE AUFBAUTEN	59
7.2 WÄRMEDÄMMSTOFFMISCHUNG UND BEFÜLLUNG.....	60
7.3 UNTERSUCHUNG DES EVAKUIERUNGSVERHALTENS.....	61
7.4 VORUNTERSUCHUNGEN ZUM FUNKTIONSMUSTER IM REALMARSTAB.....	62
7.5 UNTERSUCHUNG DER WÄRMEDÄMMUNG	65
7.6 ALTERNATIVES WÄRMEDÄMMKONZEPT.....	67
7.7 ZUSAMMENFASSUNG	68
8 KONZEPTENTWICKLUNG, PLANUNG UND FERTIGUNG DES FUNKTIONSMUSTERS	69
8.1 KONZEPTION UND KONSTRUKTION DES FUNKTIONSMUSTERS IM REALMARSTAB	69
8.1.1 <i>Innenspeicher.....</i>	70
8.1.2 <i>Außenspeicher.....</i>	70
8.1.3 <i>Fußkonstruktion bzw. Bodengruppe</i>	71
8.1.4 <i>Füllen des Vakuumraumes mit der Materialmischung.....</i>	73
8.1.5 <i>Befestigungen Transparente Wärmedämmung.....</i>	75
8.2 FERTIGUNG FUNKTIONSMUSTER.....	75
8.2.1 <i>Fertigung Fußkonstruktion bzw. Bodengruppe</i>	75
8.2.2 <i>Fertigung Innenspeicher.....</i>	76

8.2.3	<i>Fertigung Außenspeicher</i>	77
8.2.4	<i>Zusammenführen</i>	78
8.2.5	<i>Füllen</i>	78
8.2.6	<i>Vorbereitung TWD</i>	78
8.2.7	<i>Lackierung</i>	79
9	UNTERSUCHUNG DER BASISVARIANTE DES FUNKTIONSMUSTERS	80
9.1	PRÜFSTAND FÜR AUßENAUFGESTELLTE WARMWASSERSPEICHER	80
9.2	UNTERSUCHUNG DER VAKUUMWÄRMEDÄMMUNG.....	83
9.3	UNTERSUCHUNGEN DER SCHICHTBE- UND ENTLADEEINRICHTUNG.....	87
9.4	UNTERSUCHUNGEN ZUR TRANSPARENTEN WÄRMEDÄMMUNG	92
9.5	IDENTIFIKATION, UMSETZUNG UND BEWERTUNG VON VERBESSERUNGSMAßNAHMEN	97
9.6	UNTERSUCHUNG DER MARKTREIFE	99
10	ENTWICKLUNG EINES TWD-MODELLS FÜR WARMWASSERSPEICHER	102
10.1	MODELLBILDUNG	103
10.2	MODELLVERIFIZIERUNG UND -ERWEITERUNG	106
10.3	MODELLVALIDIERUNG	109
10.4	ZUSAMMENFASSUNG	111
11	ABNAHMEVERFAHREN FÜR AUßENAUFGESTELLTE WWS	113
11.1	KONZEPT DES ABNAHMEVERFAHRENS	113
11.2	PRAKTISCHE UMSETZUNG DES ABNAHMEVERFAHRENS	115
11.2.1	<i>Kombination des TWD- und WWS-Modells</i>	116
11.2.2	<i>Örtlich aufgelöste Bestimmung der Wärmeverlustrate</i>	118
11.3	ZUSAMMENFASSUNG	123
12	WIRTSCHAFTLICHKEITSBETRACHTUNG	124
12.1	SPEICHERPREISE UND KOSTEN FÜR UMBAUTEN WOHNRAUM.....	124
12.2	SIMULATIONSMODELLE	126
12.3	ERGEBNISSE	127
12.3.1	<i>SolarAktivHaus</i>	127
12.3.2	<i>Kindergarten</i>	129
12.4	ZUSAMMENFASSUNG	131
13	ÖFFENTLICHKEITSARBEIT	132
14	AUSBLICK	134
15	LITERATURVERZEICHNIS	135
	NOMENKLATUR	143
	ANHANG	149
	ANHANG A: BEZUG DER BERICHTSINHALTE ZUR VORHABENBESCHREIBUNG.....	149
	ANHANG B: ANLIEFERUNG UND AUFSTELLUNG DES FUNKTIONSMUSTERS	150
	ANHANG C: AUFNAHMEN EINSTRÖMVORGÄNGE BELADELANZE UND PLATTENBELADER	151
	ANHANG D: MESSSENSOREN UND FUNKTIONSMUSTER.....	153
	ANHANG E: VALIDIERUNG MODELL MITBEWEGTE TWD	155
	ANHANG F: PFLICHTENHEFT	156

ZUSAMMENFASSUNG

In diesem Abschnitt sind die wissenschaftlich-technischen Ergebnisse und die gesammelten Erfahrungen des Forschungsvorhabens „StoEx“ zusammengefasst.

Potentialstudie zu hocheffizienten Warmwasserspeichern

Mit Hilfe von Simulationsstudien konnte gezeigt werden, dass sowohl mittels einer Vakuumwärmedämmung als auch durch die Erhöhung der Maximaltemperatur eines Warmwasserspeichers deutliche Reduktionen des Warmwasservolumens und damit das Gesamtvolumens des Speichers möglich sind. Für das in diesem Fall betrachtete Nahwärmenetz mit einem jährlichen Gesamtwärmebedarf von 1.200 MWh können mit Hilfe der Vakuumwärmedämmung des Pufferspeichers jährlich 14.122 bis 16.844 kWh an konventioneller Zusatzenergie gegenüber der Verwendung eines konventionell wärmegeprägten Pufferspeichers eingespart werden. Für die Anwendungsfälle SolarAktivHaus und Kindergarten konnte gezeigt werden, dass mit steigendem solaren Deckungsanteil die Relevanz der Wärmedämmung ebenfalls zunimmt.

Vakuumwärmedämmung, Schichtbe- und Entladeeinrichtung und transparente Wärmedämmung

Um Warmwasserspeicher hocheffizient betreiben zu können, ist eine Wärmedämmung mit sehr geringem Wärmedurchgangskoeffizient notwendig. Mittels einer Vakuumwärmedämmung können die geringsten effektiven Wärmeleitfähigkeiten erreicht werden. Die Untersuchungen zur Wärmedämmung haben daher diese Technologie zum Schwerpunkt. Es wurden unterschiedliche Wärmedämmstoffe und Wärmedämmkonzepte untersucht. Als Wärmedämmkonzept wurde der Zwischenraum eines doppelwandigen Warmwasserspeichers mit einem schüttfähigen Wärmedämmstoff gefüllt und auf einen Vakuumdruck zwischen 0,4 und 1 mbar evakuiert. Für den Funktionsmuster-Speicher im Realmaßstab mit einem Wasservolumen von 12 m³ wurde eine Mischung aus 70 Massenprozent grobkörnigem, expandiertem Perlit und 30 Massenprozent pyrogener Kieselsäure als Wärmedämmstoff ausgewählt. Diese Auswahl wurde auf der Basis von Labormessungen zur effektiven Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit vom Vakuumdruck und auf der Basis einer Kostenbetrachtung getroffen. Mit dieser Dämmstoffmischung wird auch bei vergleichsweise hohen Vakuumdrücken eine relativ geringe effektive Wärmeleitfähigkeit erreicht. Dadurch kann sowohl der Evakuierungsaufwand reduziert werden, als auch ein hocheffizienter Betrieb des Warmwasserspeichers über einen langen Zeitraum gewährleistet werden.

Mit dem Ziel der Adaption einer kommerziell erhältlichen Schichtbe- und Entladeeinrichtung für einen Warmwasserspeicher im Volumenbereich von 5 bis 100 m³, die eine thermisch geschichtete Be- und Entladung des Speichers ermöglicht, wurde zunächst eine Marktrecherche durchgeführt. Unter Berücksichtigung einer einfachen Skalierbarkeit einer solchen Einrichtung fiel die Wahl auf eine aktive Schichtbe- und Entladeeinrichtung, die auf vier diskreten Höhen dem Speicher Beladefluid zuführen kann. Eine Erweiterung dieses

Beladekonzepts um eine neu entwickelte passive Schichtbe- und Entladeeinrichtung ermöglichte darüber hinaus zusätzlich zwischen den vier diskreten Beladehöhen Beladefluid entsprechend der im Speicher vorhandenen Temperaturverteilung einzuschichten. Zur Entwicklung dieser passiven Schichtbe- und Entladeeinrichtung wurden verschiedene Einströmvorrichtungen in einem neu aufgebauten transparenten Versuchsspeicher mit Hilfe von Prüfsequenzen und optischer Messverfahren untersucht. Der Fokus der optischen Untersuchungen lag auf der Identifikation und Bewertung von Ansaugeffekten und Strömungsphänomenen, wie z.B. der Vermischung von Speicher- und Beladefluid innerhalb der passiven Schichtbe- und Entladeeinrichtung. Es konnte eine für den Speichergrößenbereich anwendbare, nachweislich funktionsfähige und modulare passive Schichtbe- und Entladeeinrichtung entwickelt werden.

Um eine für einen außenaufgestellten Warmwasserspeicher geeignete transparente Wärmedämmung zu identifizieren, wurde ein Außenprüfstand mit fünf Versuchsträgern errichtet. Diese dienten zur vergleichenden Messung des thermischen Verhaltens unterschiedlicher Strukturen transparenter Wärmedämmungen und der erzielbaren Temperatur der transparenten Wärmedämmung im Tagesgang. Weiterhin wurden anwendungs- und fertigungsrelevanten Aspekte unterschiedlicher Strukturen transparenter Wärmedämmungen auf Basis einer Literaturrecherche bewertet. Unter Berücksichtigung dieser Aspekte und des thermischen Verhaltens der untersuchten Strukturen wurden gebogene Glassegmente in Verbindung mit einer schwarzen absorbierenden Oberfläche des Speichermantels als geeignetste Lösung identifiziert. Diese stellen einen Kompromiss zwischen Langzeit- und Temperaturbeständigkeit, Kosten und erwarteter Fähigkeit zur Reduktion der Speicherwärmeverluste dar.

Untersuchung von Funktionsmustern im Technikums- und Realmaßstab

Anhand von drei Funktionsmuster-Speichern im Technikumsmaßstab mit einem Wasservolumen von $1,5 \text{ m}^3$ wurden Untersuchungen zur Dämmstoffbefüllung, Evakuierung, Wärmeverlustrate, zu Wärmebrücken und zu unterschiedlichen Wärmedämmkonzepten durchgeführt. Dabei zeigte eine Dämmstoffbefüllung mittels Zyklonabscheider vielversprechende Ergebnisse im Labormaßstab. Zur Beschleunigung der Evakuierung eignete sich sowohl ein Aufheizen des Dämmvolumens bei gleichzeitigem Anschluss und Betrieb einer Vakuumpumpe, als auch der Einsatz einer sogenannten Zeolith-Falle zur Desorption von Restfeuchte aus dem Wärmedämmstoff. Bei den thermischen Untersuchungen der Funktionsmuster-Speicher konnte durch eine zusätzliche Steinwolle-Wärmedämmung am Boden mit 240 mm Dämmstärke und im Fußringbereich des Speichers mit 50 mm Dämmstärke die Wärmeverlustrate um 15 bis 17 % gesenkt werden. Mit einer im Rahmen des Projekts untersuchten folienumhüllten Wärmedämmung konnte eine vielversprechende Alternative zum Konzept eines doppelwandigen Speichers mit starrer Außenhülle demonstriert werden. Dabei wird eine Barriere-Folie luftdicht um die Wärmedämmung angebracht. Dieses Konzept eignet sich sowohl für eine Vakuumwärmedämmung im Grobvakuumbereich (1 – 1000 mbar) als auch für den Einsatz

von konventionellen Wärmedämmstoffen wie Mineralwollematten in Kombination mit einem Gas mit geringer Wärmeleitfähigkeit, wie z. B. Argon, unter leichtem Überdruck. Dieses Wärmedämmkonzept bedarf allerdings weiterer Optimierungen und Untersuchungen im Technikumsmaßstab hinsichtlich Dichtheit und Schutz der Barriere-Folie. Außerdem ist eine Kombination der Folienumhüllung mit einer transparenten Wärmedämmung nach bisherigem Kenntnisstand nur unter großen Einschränkungen durchführbar, weshalb das Konzept eines doppelwandigen Warmwasserspeichers mit starrer Außenhülle für die Untersuchungen im Realmaßstab ausgewählt wurde.

Unter Berücksichtigung der erzielten Erkenntnisse aus den Versuchen im Labor- und Technikumsmaßstab wurde ein Funktionsmuster mit einem Wasservolumen von 12 m³ konzipiert und gefertigt. Dieses verfügt über eine kombinierte aktive und passive Schichtbe- und Entladeeinrichtung, eine transparente Wärmedämmung auf der Speichermantelfläche und eine Vakuumwärmedämmung. Weiterhin besteht eine Zugangsmöglichkeit über den Speicherboden. Um die thermische Leistungsfähigkeit des Speichers bzw. die Güte der Umsetzung der einzelnen vorab im Labor- und Technikumsmaßstab entwickelten Technologien zur thermisch geschichteten Be- und Entladung zu untersuchen, wurde dieses Funktionsmuster an einem neu erreichten Außenspeicherprüfstand für Großspeicher über den Zeitraum eines Jahres betrieben.

Es konnte mit Hilfe von Einschichtungsversuchen gezeigt werden, dass die kombinierte Schichtbe- und Entladeeinrichtung ihre Funktion erfüllt und einen thermischen geschichteten Speicherbetrieb ermöglicht. Die transparente Wärmedämmung aus gebogenen Glassegmenten zeigt ebenfalls das erwartete thermische Verhalten, wobei Wärme- und Stofftransportvorgänge innerhalb der transparenten Wärmedämmung zu Unterschieden im Vergleich zu den Messungen im Labormaßstab führten. Die Qualität der Vakuumwärmedämmung mit der für diesen Speicheranwendungsbereich als optimal angenommenen Füllmaterialmischung wurde erfolgreich mit Auskühlversuchen untersucht und deren sehr gute Wärmedämmwirkung bestätigt. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass sowohl eine gute Evakuierbarkeit als auch eine für den Betriebszeitraum solcher Speicher von bis zu 50 Jahren ausreichende Vakuumdichtigkeit vorliegt.

Entwicklung eines Abnahmeverfahrens für außenaufgestellte Warmwasserspeicher

Auf Basis der heute für innenaufgestellte Warmwasserspeicher üblichen Verfahren zur Ermittlung der thermischen Leistungsfähigkeit anhand modellgestützter Parameteridentifikationsverfahren wurde eine Vorgehensweise der Modellierung zur Berücksichtigung der Außenaufstellung solcher Speicher entwickelt. Diese ist auch für Speicher ohne transparente Wärmedämmung anwendbar. Die Funktionsfähigkeit des Modells und des zugehörigen Parameteridentifikationsverfahrens wurden mit Hilfe von Validierungssequenzen bestätigt. Eine Umsetzung des Modells fand in der für Jahressimulationen geeigneten Software TRNSYS¹ statt. Weiterhin wurde ein zweites, im

¹ Version: 17.01.0025 /Trn16/

Vergleich deutlich einfacheres, Warmwasserspeichermodell entwickelt, dass mit einem modellgestützten Parameteridentifikationsverfahren erlaubt, eine über der Speicherhöhe örtlich hoch aufgelöste, lokale Wärmeverlustrate zu bestimmen. Dieses Verfahren ermöglicht es auf Basis einfacher Auskühlversuche lokale Wärmebrücken der Speichermantelwärmedämmung zu identifizieren.

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit einer Vakuumwärmedämmung und einer transparenten Wärmedämmung stark vom Anwendungsfall und den angestrebten solaren Deckungsanteilen abhängt. Je höher der angestrebte solare Deckungsanteil, desto wirtschaftlicher werden diese innovativen Wärmedämm-Technologien gegenüber den konventionellen Wärmedämm-Technologien. Für die betrachteten Szenarien im Anwendungsfall „Kindergarten“ kann eine Vakuumwärmedämmung Einsparungen der Speicherkosten bis zu 8.074 € gegenüber einer konventionellen Wärmedämmung erreichen. Im Anwendungsfall „SolarAktivHaus“ sind für die betrachteten Szenarien maximale Einsparungen bis zu 19.309 € möglich. Für die transparente Wärmedämmung ergeben sich bei den wirtschaftlichsten Lösungen Grenzkosten von bis zu 4.728 €. Als Grenzkosten werden die maximalen Kosten bezeichnet, bis zu welchen eine Investition wirtschaftlich ist.

VORWORT

Die solarthermische Wärmezeugung ist in Deutschland seit langem etabliert und nimmt mit einem Anteil von 31 % der am europäischen Solarthermie-Wärmemarkt neu installierten Kollektorleistung in 2014 eine Vorreiterrolle ein /Est15/. Dennoch beträgt der Anteil der solarthermischen Wärmezeugung an der gesamten erneuerbaren Wärmebereitstellung in Deutschland nur 2,1 % /Uba15/. Damit in diesem Markt die Technologieführerschaft Deutschlands langfristig gesichert ist, muss eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Technologie der solarthermischen Wärmebereitstellung erfolgen. Ein wichtiger Aspekt ist hierbei die Steigerung des solaren Deckungsanteils bei der Wärmeversorgung von Wohngebäuden. Laut der Vision 2030 der Technologieplattformen DSTTP (Deutsche Solarthermie-Technologie Plattform) und ESTTP (European Solar Thermal Technology Platform) sollen im Neubau sogenannte „SolarAktivHäuser“ zum Standard werden, welche nahezu den gesamten Wärme- und Kältebedarf vollständig durch Solarenergie abdecken /Dst10/, /Iva14/. Im Sanierungsfall soll durch eine solarthermische Modernisierung ein solarer Deckungsanteil von deutlich über 50 % erzielt werden /Dru09/.

Zur Steigerung der solaren Deckungsanteile sind größere Solarkollektorflächen bzw. Warmwasserspeicher mit einer größeren Wärmespeicherkapazität als der derzeitige Stand der Technik erforderlich. Ein weiterer Ausbau der Kollektorfläche kann aber insbesondere bei kleinen kompakten Wohngebäuden und auch bei Nichtwohngebäuden, wie Büro- und Verwaltungsbauten wegen des Mangels an geeigneten Dachflächen zu Schwierigkeiten führen. Eine zukunftsfähige Alternative ist deshalb die Steigerung der solaren Deckungsanteile durch die Integration von Warmwasserspeichern mit großer Wärmespeicherkapazität in Solaranlagen zur Trinkwarmwasserbereitung und Raumheizung. /Dst10/. Dass dies bereits in einem großem Maßstab technisch realisierbar ist und ein ausgeprägtes wirtschaftliches Potential aufweist, zeigen die in Deutschland seit 1996 bestehenden Pilotanlagen zur solar-unterstützten Nahwärmeversorgung ganzer Wohngebiete /Bau10/. Jedoch ist die Integration von Nahwärmenetzen nicht überall sinnvoll oder möglich. Zur Erschließung eines großen Marktes sind Warmwasserspeicher mit einem Wasservolumen von 5 m³ bis 100 m³ für Ein- und Mehrfamiliengebäude sowie öffentliche Gebäude erforderlich.

Warmwasserspeicher sind heute in vielen verschiedenen Ausführungen und Größen kommerziell erhältlich. Nahezu alle am Markt verfügbare Warmwasserspeicher zeichnen sich dadurch aus, dass sie für eine Aufstellung im Inneren des Gebäudes konzipiert sind. Die Positionierung des Warmwasserspeichers innerhalb des Gebäudes hat folgende Nachteile:

- Der Warmwasserspeicher verringert die innerhalb des Gebäudes nutzbare Fläche und schränkt die Freiheitsgrade der Gebäudekonstruktion ein.
- Insbesondere im Gebäudebestand ist die Einbringung von Warmwasserspeichern mit einem Wasservolumen von mehr als 5 m³, die sich oft über mehrere Stockwerke erstrecken, nicht mit vertretbarem Aufwand realisierbar. Eine alternative Möglichkeit zur Realisierung solcher Wasservolumen im Gebäudebestand sind Speicherkaskaden.

- Die Wärmeverluste des Warmwasserspeichers werden direkt in das Gebäude abgegeben, was zu Komforteinbußen durch eine Überhitzung der Innenräume im Sommer führen kann.
- Die Installation großer Speicher mit mehr als 5 m³ Volumen ist zumeist nicht ohne Vorort-Montage möglich und die Zusammenstellung aus mehreren Komponenten birgt die Gefahr von Montagefehlern.
- Eine Innenaufstellung ermöglicht nur eingeschränkte Reparatur- und Erweiterungsarbeiten bzw. einen vollständigen Tausch des Warmwasserspeichers.

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

Die gegenüber saisonalen thermischen Energiespeichern für Nahwärmenetze geringe Größe und das damit einhergehende relativ größere Oberflächen-zu-Volumen-Verhältnis bzw. die im Vergleich zur Innenaufstellung im Jahresmittel niedrigeren Umgebungslufttemperaturen machen eine hocheffiziente Wärmedämmung von derartigen außen aufgestellten Warmwasserspeichern unabdingbar. Konventionelle Wärmedämmstoffe und -technologien führen bei dieser Größe von Warmwasserspeichern entweder zu einer nicht ausreichenden Reduktion der Wärmeverluste oder zu nicht praktikablen hohen Dämmstärken. Es kommt erschwerend hinzu, dass der thermische Widerstand der Wärmedämmung durch die größer werdende Außenoberfläche nicht proportional zur Dämmstärke ansteigt. Großes Potential wird daher in modernen hocheffizienten Wärmedämmtechnologien gesehen /May13/, /Bei13/. So bietet die Technologie der Vakuumwärmedämmung die Möglichkeit, trotz geringerer Dämmstärken im Vergleich zu konventionellen Wärmedämmungen, die externen Wärmeverluste zu reduzieren.

Ein im Freien aufgestellter Speicher ermöglicht darüber hinaus die Realisierung einer weiteren erfolgversprechenden Wärmedämmtechnologie, einer sog. transparenten Wärmedämmung. Diese ermöglicht die Temperatur an der Außenoberfläche des Warmwasserspeichers deutlich über die Umgebungslufttemperatur anzuheben und somit die Wärmeverluste zu reduzieren /Ger14/.

In dem hier vorliegenden Abschlussbericht wird die Entwicklung einer großvolumigen Warmwasserspeicher-Baureihe zur Außenaufstellung mit hocheffizienter Wärmedämmung für eine Langzeit-Energiespeicherung vorgestellt. Die Entwicklung der Warmwasserspeicher findet als Kooperation zwischen dem Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS) des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart und der Firma Sirch Tankbau Speicherbau Tankservice GmbH statt.

1 Stand der Technik

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „StoEx“ wurde eine Speicherbaureihe für Ein- und Mehrfamiliengebäude mit einem Wasservolumen von mehr als 5 m³ entwickelt. Im deutschsprachigen Raum werden in dieser Größe bereits gebäudeinterne Kunststoffspeicher, die vor Ort aufgebaut werden, angeboten /Haa16/, /Ene16/, /Bun16/, /Ens16/. Alternative Einbringkonzepte in die Gebäudehülle sind u. a. Stahlspeicher für die vor Ort Verschweißung oder die Verwendung von mehreren kleineren Speichern /Cub16/, /Har16/. Des Weiteren werden in sogenannten „SolarAktivHäusern“ große Warmwasserspeicher aus Stahl im Gebäudeinneren baulich integriert. Angeboten werden hierfür geeignete Speicher u.a. von Citrin Solar /Cit16/, Lorenz Behälterbau /Lor16/, Jenni Energietechnik /Jen16/, Hummelsberger Schlosserei /Hum16/ und Sirch Speicherbau /Sir16/. Da größere Speichervolumina innerhalb von Gebäuden teilweise nur schwer zu realisieren sind, werden in jüngster Zeit auch Warmwasserspeicher zur Erdvergrabung außerhalb des Gebäudes angeboten. Hierbei sind insbesondere der auf einer Regenwasserzisterne aus Beton basierende und mit Blähglasgranulat wärmegeämmte Pufferspeicher der Firma Mall /Mal16/ und der unterirdische Wärmespeicher der Firma Haase /Haa16/ zu nennen. Z. T. werden auch Warmwasserspeicher für die oberirdische Außenaufstellung angeboten /Bun16/, /Sts16/.

Die oben genannten Speicher sind i. d. R. nicht zur saisonalen Speicherung von thermischer Energie geeignet. Für die Wärmedämmung kommen Techniken und Materialien zum Einsatz, die für Pufferspeicher geringe Wärmeverluste ermöglichen, zur saisonalen Speicherung von thermischer Energie jedoch nicht ausreichen. Nur von der Firma Hummelsberger wird bereits ein Warmwasserspeicher mit einer hocheffizienten Wärmedämmung, einer Vakuumwärmedämmung, zur Außenaufstellung und zur (teilweisen) Erdvergrabung angeboten /Hum16/. Messungen des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung (ZAE) belegen diesem Warmwasserspeicher eine zur langzeitigen Speicherung von thermischer Energie ausreichend niedrige Auskühlrate von 0,23 K/d /Bei13/.

Auf den Stand der Technik und den Stand der Wissenschaft der einzelnen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens untersuchten Themenfelder wird in den jeweiligen Kapiteln dieses Abschlussberichts detailliert eingegangen. Eine Liste der Veröffentlichungen, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entstanden sind, ist in Kapitel 13 dargestellt.

2 Zielstellung des Vorhabens

Das zentrale Ziel des Vorhabens war die Entwicklung eines großvolumigen, preiswerten Warmwasserspeichers mit hocheffizienter Wärmedämmung zur Außenaufstellung. Die Außenaufstellung eines Warmwasserspeichers führt im Jahresmittel zu niedrigeren Temperaturen auf der Außenoberfläche der äußeren Wärmedämmung als dies bei einem im Gebäude installierten oder erdvergrabenen Warmwasserspeichern der Fall ist. Um die hieraus resultierenden Wärmeverluste des Warmwasserspeichers dennoch gegenüber konventionellen Warmwasserspeichern zu senken, kommt eine Vakuumwärmedämmung zum Einsatz. Mit dieser sind effektive Wärmeleitfähigkeiten von bis zu $0,005 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ zu erreichen /Ger15/. Dies entspricht einer Verbesserung der Wärmedämmwirkung bei gleicher Dämmstärke um den Faktor 10 gegenüber konventionellen Wärmedämmstoffen. Durch den Einsatz hochwertiger Kernmaterialien im evakuierten Bereich die dazu führen, dass an die Güte des Vakuums geringe Anforderungen gestellt werden können, wird untersucht, ob auf ein Nachevakuierten der Vakuumwärmedämmung während der Lebensdauer des Warmwasserspeichers verzichtet werden kann.

Zusätzlich zur Reduzierung der Wärmeverluste an die Umgebung, der sogenannten externen Verluste, wurden die internen Verluste des Warmwasserspeichers reduziert. Interne Verluste sind Verluste an effektiv nutzbarer thermischer Energie, d.h. Exergie, durch eine Vermischung von Wasser unterschiedlicher Temperatur innerhalb des Warmwasserspeichers. Es wird eine Recherche am Markt verfügbarer Vorrichtungen zur thermisch geschichteten Be- und Entladung durchgeführt. Im Anschluss daran wird eine Detailuntersuchung zu relevanten Strömungsphänomenen an ausgewählten Schichtbe- und Entladeeinrichtungen mit Hilfe optischer Messmethoden vorgenommen und die am geeignetsten erscheinende Vorrichtung für die Umsetzung an einem Funktionsmuster im Realmaßstab ausgewählt.

Für die Aufstellung im Freien wird ein witterungsfestes, optisch anpassbares und ästhetisch ansprechendes Konzept entwickelt. Die Aufstellung im Freien wird ebenfalls dazu genutzt, den Speicher auf der Außenseite mit einer transparenten Wärmedämmung zu versehen. Diese wird bezüglich ihrer thermischen Leistungsfähigkeit charakterisiert und deren Beitrag zur Reduktion der Wärmeverluste quantifiziert.

Ein weiteres Entwicklungsziel ist die Umsetzung der oben erläuterten Technologien aus dem Labor- und Technikumsmaßstab in den Realmaßstab. Hierzu wurde ein Warmwasserspeicher mit einem Wasservolumen von 12 m^3 und ausgewählten Technologien, wie einer Vakuumwärmedämmung, einer transparenten Wärmedämmung und einer Schichtbe- und Entladeeinrichtung, realisiert. Neben der Untersuchung der auslegungs- und fertigungstechnischen Aspekte ist hierbei die Demonstration der Zugänglichkeit des Warmwasserspeicherinneren bei einer doppelwandigen Konstruktion mit Vakuumwärmedämmung von Bedeutung. Die Zugänglichkeit stellt die Möglichkeit zur Reparatur des Warmwasserspeichers sowie dessen Anpassbarkeit an geänderte

Systemrandbedingungen sicher. Beide Aspekte sind insbesondere unter Berücksichtigung einer geplanten Nutzungsdauer im Bereich von bis zu 50 Jahren relevant.

Neben der Entwicklung des hocheffizienten Warmwasserspeichers wird für das Simulationsprogramm TRNSYS das für kleine Warmwasserspeicher mit einem Wasservolumen von bis zu 5 m³ entwickelte Multiport Store Model Type 340 /Dru06/ für größere Warmwasserspeicher in Außenaufstellung erweitert. Hierzu müssen besonders technologische Charakteristika des in diesem Vorhaben zu entwickelnden Warmwasserspeichers, wie z.B. die transparente Wärmedämmung an der Außenoberfläche, in die entsprechenden Rechenprogramme der Simulationssoftware implementiert werden. Zusätzlich wird ein Abnahmeverfahren für große Warmwasserspeicher mit einem Volumen von 5 m³ bis 100 m³ entworfen. Ein derartiges Verfahren wird zur Qualitätssicherung benötigt, da Warmwasserspeicher entsprechender Größe nicht im Labor nach /EN 12977-3:2012/ (Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen) und /EN 12977-4:2012/ (Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung - Kombispeicher) geprüft werden können. Das Abnahmeverfahren soll auf Basis von durchzuführenden Prüfzyklen eine Charakterisierung der thermischen Leistungsfähigkeit dieser Art von Warmwasserspeichern ermöglichen. Mittels der hierbei ermittelten Kenngrößen, wie z. B. der Wärmeverlustrate des Speichermantels, -bodens und -deckels, ist eine Aussage bzgl. der thermischen Eigenschaften des Speichers möglich und es kann somit z. B. überprüft werden, ob der Warmwasserspeicher die vorgegebenen Anforderungen erfüllt.

Die oben aufgeführten Entwicklungsziele erfordern eine systematische Vorgehensweise in mehreren Entwicklungsschritten. Ausgehend von Laborversuchen zur Vakuumwärmedämmung, zur transparenten Wärmedämmung und zur thermisch geschichteten Be- und Entladung werden mehrere vielversprechende Konzepte an drei Warmwasserspeichern im Technikumsmaßstab mit einem Wasservolumen von 1,5 m³ realisiert und untersucht. Im Anschluss daran wird ein Funktionsmuster mit 12 m³ Wasservolumen gefertigt, am neu errichteten Außenspeicherprüfstand in Betrieb genommen und dessen thermische Leistungsfähigkeit charakterisiert. Ebenfalls werden an diesem Funktionsmuster Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert, umgesetzt und mit Hilfe von Messdaten bewertet. Die Messdaten des Funktionsmusters am Außenspeicherprüfstand dienen auch zur Modellentwicklung der Erweiterung des Warmwasserspeicher-Modells Type 340 der Simulationssoftware TRNSYS und als Basis für den Entwurf eines für diese Warmwasserspeicher geeigneten Abnahmeverfahrens. Das Funktionsmuster soll am Ende des Vorhabens einen, für die kommerzielle Vermarktung notwendigen Stand der Technik erreichen.

Der direkte Bezug der Inhalte des hier vorliegenden Abschlussberichts zu den Arbeitspaketen der Vorhabensbeschreibung ist in **Anhang A** beschrieben.

3 Simulationsstudie zu hocheffizienten Warmwasserspeichern

Durch hocheffiziente thermische Energiespeicher für Solaranlagen können die Wärmeverluste deutlich gegenüber konventionellen thermischen Energiespeichern reduziert werden. Welche finanziellen Einsparpotentiale durch die verringerten Verluste erzielt werden können, hängt jedoch vom Anwendungsfall und der Speichergröße im Verhältnis zur Dimensionierung der Solaranlage und dem Wärmebedarf ab. Um die Potentiale aufzuzeigen wurden vom ITW mit dem Simulationsprogramm TRNSYS 17 typische Einsatzfälle abgebildet, auf deren Basis die Anforderungen an die Ausführung der Wärmedämmung, die Auswirkungen einer thermisch geschichteten Be- und Entladung des Speichers, sowie die notwendige maximale Temperatur des Speichermediums abgeleitet werden können.

Die Anforderungen an die zu entwickelnde Speicherbaureihe, insbesondere im Hinblick auf die aus einer Außenaufstellung sowie dem Anspruch auf äußerst geringe Wärmeverluste resultierenden Anforderungen, wurden daraufhin spezifiziert. Das Ziel dieser Arbeiten war die mit der Fa. Sirch gemeinsame Erstellung eines Pflichtenhefts, auf dessen Basis die geplanten Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zielgerichtet und effizient durchgeführt werden konnten.

3.1 Simulationsmodelle

Es wurden Warmwasserspeicher unterschiedlicher Größe und Qualität der Wärmedämmung in drei unterschiedlichen Anwendungen untersucht. Die Anwendungen sind ein SolarAktivHaus (SAH; Einfamilienhaus mit einem solaren Deckungsanteil des Gesamtwärmebedarfs von $\geq 50\%$) bei Speicher-Innen- und Außenaufstellung, sowie ein Kindergarten und einem Nahwärmenetz – jeweils mit Außenaufstellung des Speichers. Der Standort aller betrachteten Anwendungen ist Würzburg.

Zur Gebäudesimulation des **SolarAktivHauses** (SAH) wurde der TRNSYS-Type 56 Multi-Zone Building verwendet. Es wurden ein Trinkwarmwasserwärmebedarf von ca. 3.000 kWh/a und ein Heizwärmebedarf von ca. 6.350 kWh/a zu Grunde gelegt. Es werden täglich 200 Liter Warmwasser bei einer Temperatur von 45 °C gezapft. Die Heizungsvorlauftemperatur ist auf maximal 55 °C ausgelegt (für eine minimale Außenlufttemperatur von -12 °C) und beträgt im volumenstromgewichteten Jahresmittel 48 °C. Es sind 70 m² Flachkollektoren in Südausrichtung und mit einem Anstellwinkel von 60 ° installiert.

Für die Untersuchung von unterschiedlichen maximalen Speichertemperaturen wurden folgende Änderungen gegenüber dem oben beschriebenen Modell des SAH vorgenommen:

- Anwendung von CPC-Vakuumröhrenkollektoren (CPC: Compound Parabolic Concentrator)
- Warmwasserwärmebedarf: 2.600 kWh/a
- Heizwärmebedarf 6.650 kWh/a

Der Heizwärmebedarf ist in diesem Fall um ca. 300 kWh/a höher und der Warmwasserwärmebedarf um 400 kWh/a geringer im Vergleich zu den anderen Simulationen, da geringfügig veränderte Randbedingungen des Gebäudemodells verwendet wurden. Der Gesamtwärmebedarf unterscheidet sich um nur ca. 1 %.

Für die Simulation des **Kindergartens** (Kiga) wurden ein Trinkwarmwasserwärmebedarf von 1.100 kWh/a und ein Heizwärmebedarf von 30.600 kWh/a zu Grunde gelegt. Die Beheizung erfolgt über eine Fußbodenheizung mit einer volumenstromgemittelten Vorlauftemperatur von 31,7 °C. Für das Kiga-Modell werden 100 m² Flachkollektoren in Südausrichtung mit einem Anstellwinkel von 45 ° angenommen.

Das **Nahwärmenetz** hat einen Gesamtwärmebedarf von 1.200 MWh/a und die Solaranlage besteht u. a. aus 2.500 m² Flachkollektoren sowie einem 6.000 m³ erdvergrabenen Kies-Wasser-Wärmespeicher als saisonaler Wärmespeicher. Es ergibt sich damit ein solarer Deckungsanteil von ca. 60 %. In diesem System ist ein Warmwasserspeicher als Pufferspeicher notwendig. Für diesen Pufferspeicher dessen Volumen zwischen 30 und 100 m³ variiert wurde, wurde der Einsatz einer Vakuumwärmedämmung (VWD) mit dem Einsatz einer konventionellen Wärmedämmung (kWD) verglichen.

Um die unterschiedlichen Arten der Wärmedämmung im Modell abzubilden, kann nach EN 12977-3 /EN 12977-3:2012/ eine äquivalente Wärmeverlustrate UA_{Sp} in W/K für Warmwasserspeicher unterschiedlicher Größe mit Hilfe eines Faktors a gemäß Zahlenwert-Gleichung 3.1 bestimmt werden²:

$$UA_{Sp} = a \cdot \sqrt[2]{V_{Sp} [l]} \quad (3.1)$$

Mit:

V_{Sp} Volumen des Speicher in Liter

Der maximal zulässige Wert des Faktors ist $a = 0,16$. Dieser Wert wurde für die konventionelle Wärmedämmung angenommen. Für die Vakuumwärmedämmung wurde mit $a = 0,032$ ein um Faktor 5 geringerer Wert gewählt.

Als numerisches Speichermodell wurde jeweils der TRNSYS-Type 340 Multiport Store Model nach /Dru06/ verwendet. Dieser ermöglicht die Auswahl einer ideal thermisch geschichteten Be- und Entladung sowie einer Be- und Entladung in einer festen, vordefinierten Anschlusshöhe.

3.2 Simulationsergebnisse

In Abbildung 1 ist links der solare Deckungsanteil für ein SAH und rechts für einen Kiga in Abhängigkeit vom Volumen des Speichers aufgetragen. Dabei wurde jeweils die Art der

² EN 12977-3, in der Gleichung 3.1 enthalten ist, gilt für Speichervolumina bis 3 m³. Diese Einschränkung wird im Folgenden vernachlässigt.

Wärmedämmung variiert. Für das SAH wurde sowohl eine Außen- als auch eine Innenaufstellung des Speichers untersucht. Im Fall des Kiga war der Aufstellungsort des Speichers ausschließlich außen.

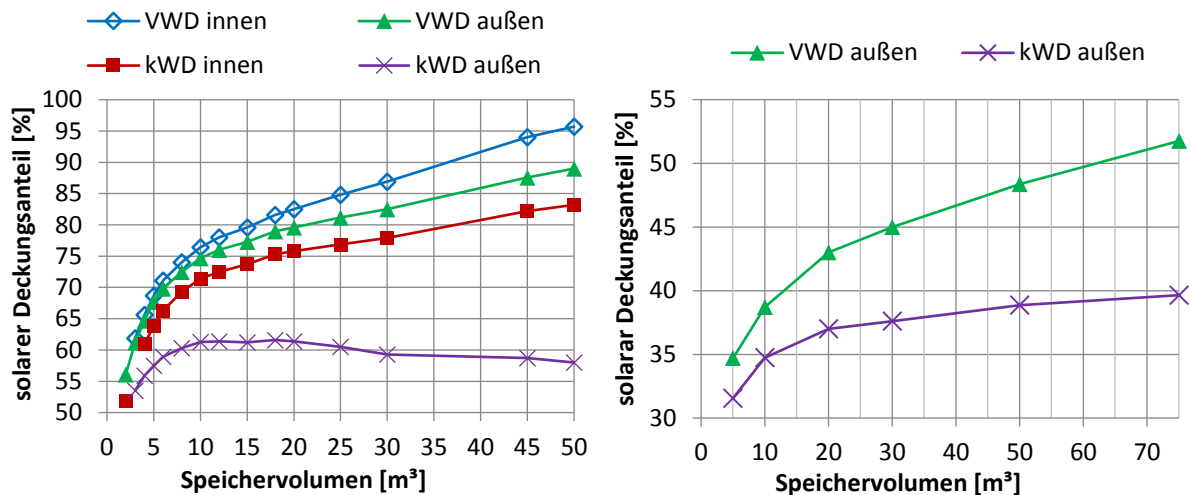


Abbildung 1. Solarer Deckungsanteil für ein SAH, links und für einen Kiga, rechts in Abhängigkeit vom Speichervolumen. VWD: Vakuumwärmedämmung; kWD: konventionelle Wärmedämmung.

Es ist ersichtlich, dass eine um den Faktor fünf verringerte Wärmeverlustrate des Speichers – wie sie im Fall einer VWD im Vergleich zu einer kWD angenommen wird – deutlich geringere Speichergrößen erfordert, um den gleichen solaren Deckungsanteil zu erzielen wie mit einer kWD. Bei einer kWD und Außenaufstellung sind, aufgrund der hohen Wärmeverluste des Speichers, nur vergleichsweise geringe solare Deckungsanteile erzielbar. Um im Fall des SAH einen solaren Deckungsanteil von bspw. 80 % zu erreichen, ist bei einem innenaufgestellten, vakuumwärmegedämmten Speicher ein Volumen von 16 m³ erforderlich. Bei VWD und Außenaufstellung sind 22 m³ und bei kWD und Innenaufstellung sind 38 m³ erforderlich. Bei einem Speicher mit kWD und Außenaufstellung ist nur ein maximaler solarer Deckungsanteil von 62 % erreichbar.

Bei einer Innenaufstellung ist somit im Vergleich zur Außenaufstellung bei gleicher Art der Wärmedämmung ein geringeres Volumen des Speichers notwendig. Dies ist neben der höheren Speicherumgebungslufttemperatur innen zum größten Teil darauf zurückzuführen, dass die Wärmeverluste des Speichers an das Gebäude abgegeben werden, wodurch sich der Heizwärmebedarf durch eine reguläre Speicherentladung reduziert. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass diese Wärmeabgabe in den Sommermonaten aus dem Gebäude abgeführt werden muss, um eine Überhitzung der Wohnräume zu vermeiden.

Im Fall des **Kiga** einen solaren Deckungsanteil von 40 % zu erreichen, ist ein außenaufgestellter Speicher mit VWD und einem Volumen von 13 m³ ausreichend. Bei einem außenaufgestellten Speicher mit kWD werden hierfür mehr als 75 m³ Speichervolumen benötigt.

Bei einem solaren Deckungsanteil von 60 % im Anwendungsfall **SAH**, wird für den außenaufgestellten Warmwasserspeicher mit VWD ein Speichernutzungsgrad³ von 91,5 % erreicht. Im Anwendungsfall Kiga erreicht der außenaufgestellte Speicher mit VWD bei einem solaren Deckungsanteil von 50 % einen Speichernutzungsgrad von 89,8 %.

In Abbildung 2 ist der solare Deckungsanteil für ein SAH in Abhängigkeit vom Speichervolumen für unterschiedliche maximale Speichertemperaturen und Kollektortypen dargestellt. Es wird dabei von einem außenaufgestellten, vakuumwärmegedämmten Warmwasserspeicher ausgegangen.

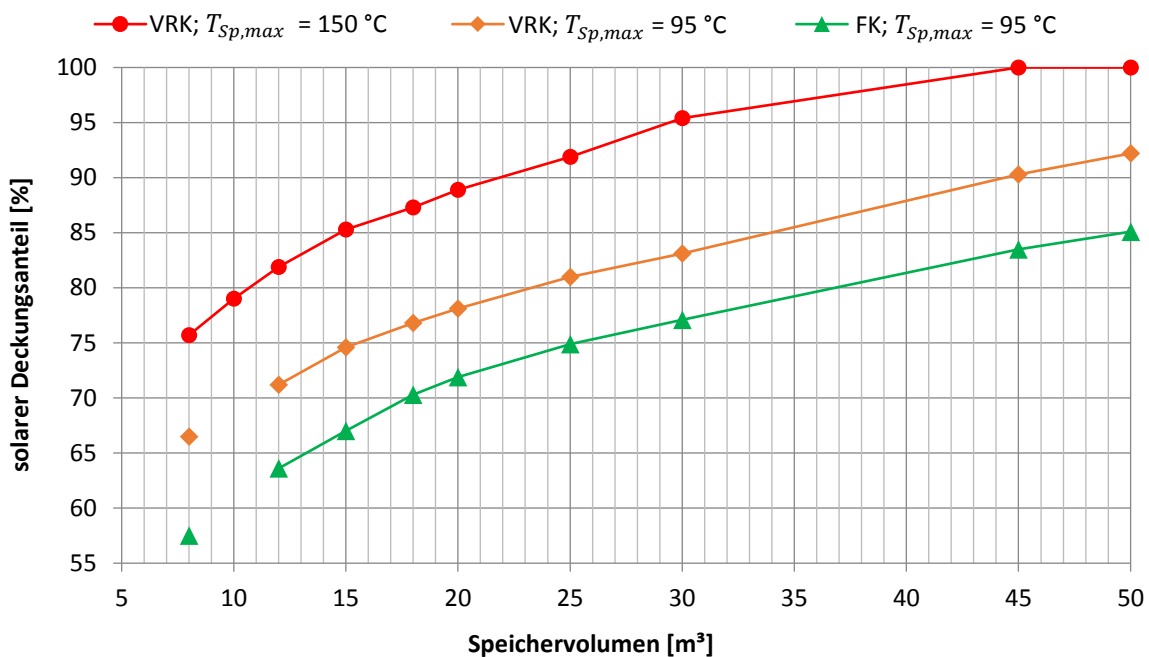


Abbildung 2. Solarer Deckungsanteil für ein SAH in Abhängigkeit des Speichervolumens für unterschiedliche Speicher-Maximaltemperaturen ($T_{Sp,max}$ [°C]) und Kollektortypen. Speicheraufstellung: außen. Wärmedämmung des Speichers: VWD; VRK: Vakuumröhrenkollektor; FK: Flachkollektor.

Bei gleicher maximaler Speichertemperatur von 95 °C sind mit den effizienteren CPC-Vakuumröhrenkollektoren (VRK) deutlich höhere solare Deckungsanteile bei gleichem Volumen des Speichers erreichbar als mit Standard-Flachkollektoren (FK). Die Steigerung beträgt für Speichervolumina von 8 bis 50 m³ zwischen 6 und 9 Prozentpunkte. Die VRK sind notwendig, um eine maximale Speichertemperatur von 150 °C zu erreichen. Diese Erhöhung der maximalen Speichertemperatur von 95 °C auf 150 °C erhöht die effektiv nutzbare Wärmekapazität des Speichers um den Faktor 2,2. Es können dadurch bei gleichem Volumen des Speichers und gleichem Kollektortyp die solaren Deckungsanteile um 7,8 bis 10,9 Prozentpunkte erhöht werden. Durch die Erhöhung der maximalen Speichertemperatur kann ein solarer Deckungsanteil von 80 % bereits mit einem Speichervolumen von 11 m³

³ Der Speichernutzungsgrad ist der Quotient aus der dem Speicher jährlich entnommenen thermischen Energie und der dem Speicher jährlich zugeführten Energie.

erreicht werden. Das sind ca. 13 m³ weniger als bei einer maximalen Speichertemperatur von 95 °C mit dem Einsatz von VRK und ca. 26 m³ weniger als beim Einsatz von FK.

Für den Anwendungsfall SAH wurde die Speicherbe- und -entladung sowohl ideal geschichtet als auch mit vordefinierter Höhe der Anschlüsse bei Be- und Entladung simuliert. Für Volumina der Speicher von 2 und 3 m³ ergeben sich durch die ideal geschichtete Be- und Entladung Steigerungen des solaren Deckungsanteils von 1,3 bis 4,5 Prozentpunkten. Für größere Warmwasservolumina wurden Steigerungen von 0 bis 0,8 Prozentpunkten erreicht. Für die Simulationen des **Nahwärmenetzes** wurde das Volumen des Pufferspeichers von 30 bis 100 m³ variiert. Für diese Speichergrößen konnte durch den Einsatz einer VWD eine Einsparung an konventioneller Zusatzenergie von 14.122 bis 16.844 kWh/a gegenüber einer kWd erzielt werden. Diese Einsparungen resultieren aus der Steigerung des solaren Deckungsanteils. Der Speichernutzungsgrad des vakuumwärmegeprägten Pufferspeichers lag dabei jeweils über 98 %.

3.3 Anforderungen an die Speicherbaureihe

Es wurde ein Pflichtenheft für die im Rahmen des Projektes zu entwickelnde Speicherbaureihe erstellt (siehe Anhang F). Darin sind Ziele zu den Kosten, zur Speicherkapazität, zur Art der Be- und Entladung, zur thermischen Effizienz, zur Zugänglichkeit des Speicherinneren und zu den mechanischen Anforderungen an den Speicher definiert. In den weiteren Kapiteln dieses Dokuments werden die im Rahmen des Projektes erreichten Ziele dargelegt.

3.4 Zusammenfassung

Durch die Simulationsstudie konnte gezeigt werden, dass sowohl mit Hilfe einer Vakuumwärmedämmung als auch durch die Erhöhung der Maximaltemperatur eines Warmwasserspeichers deutliche Reduktionen des Wasservolumens und damit das Gesamtvolumens des Speichers möglich sind. Für das betrachtete Nahwärmenetz können mit Hilfe der Vakuumwärmedämmung des Pufferspeichers jährlich 14.122 bis 16.844 kWh an konventioneller Zusatzenergie gegenüber der Verwendung eines konventionell wärmegeprägten Pufferspeichers eingespart werden. Für die Anwendungsfälle SolarAktivHaus und Kindergarten konnte gezeigt werden, dass mit steigendem solarem Deckungsanteil die Relevanz der Qualität der Wärmedämmung zunimmt.

4 Technologieentwicklung Vakuumwärmedämmung

Mittels einer Vakuumwärmedämmung (VWD) können die geringsten effektiven Wärmeleitfähigkeiten (eff. WLF) bei der Wärmedämmung eines Speichers erreicht werden. Die Untersuchungen zur Wärmedämmung haben daher diese Technologie zum Schwerpunkt.

Um eine möglichst effektive und kostengünstige Wärmedämmung der Speicher zu realisieren, wurden unterschiedliche Wärmedämmstoffe und Wärmedämmkonzepte untersucht. Dabei lag der Schwerpunkt auf Wärmedämmstoffen und -technologien, die eine sehr niedrige eff. WLF haben bzw. eine sehr gute Wärmedämmwirkung ermöglichen. Dies ist entscheidend für die thermische Leistungsfähigkeit sowie Marktakzeptanz eines Warmwasserspeichers der angestrebten Größe, der durch eine niedrige Wärmeverlustrate hohe solare Deckungsanteile ermöglichen soll. Es wurden folgende Materialien untersucht:

- Spaceloft^{®4}-Aerogel der Firma Aspen Aerogels, Inc
- Perlite
- Pyrogene Kieselsäure
- Kostengünstige Mischungen aus pyrogener Kieselsäure und Perlit
- Infrarot-Trübungsmittel

Ursprünglich war geplant, auch die im Rahmen des Projektes „Neuartiges Konzept für kosteneffiziente erdvergrabene Heißwasserspeicher (KES)“ (FKZ 0325950A&B) neu entwickelten XPS-Platten der Firma BASF zu untersuchen. Die Firma BASF teilte jedoch mit, dass diese nicht mehr hergestellt und vertrieben werden.

Das ZAE Bayern hat bereits zusammen mit der Firma Hummelberger einen expandierten Perlit für die Vakuumwärmedämmung eines doppelwandigen Warmwasserspeichers untersucht und angewendet /Bei13/. Im Rahmen des Projekts StoEx wurden weitere Wärmedämmstoffe untersucht.

4.1 Theoretische Grundlagen

In Wärmedämmstoffen treten üblicherweise drei verschiedene Wärmetransportmechanismen auf. Dies sind die Wärmeleitung über die Feststoffmatrix und die Gasphase, die Wärmestrahlung und die Konvektion. Ein weiterer Effekt, der die eff. WLF von feinkörnigen Schüttungen und Fasermaterialien deutlich erhöhen kann, ist der Kopplungseffekt. Dieser beschreibt, dass sich Gasmoleküle an den Kontaktstellen der Fasern oder Partikel akkumulieren und den Wärmewiderstand der Festkörperwärmeleitung, der durch die kleinen Kontaktflächen entsteht, überbrücken. Bei Atmosphärendruck kann dieser Kopplungseffekt bis zu 50 % zur eff. WLF von feinkörnigen Pulverschüttungen beitragen. Der Wärmetransport durch Konvektion kann für die in diesem Projekt betrachteten Wärmedämmstoffe aufgrund ihrer geringen Porengröße vernachlässigt werden.

⁴ Produktbezeichnung der Fa. Aspen Aerogels, Inc

Die relevanten Wärmetransportmechanismen sowie der Kopplungseffekt können als einzelne Wärmeleitfähigkeiten (WLF) beschrieben werden, die sich zu einer eff. WLF λ_{eff} [W/(m·K)] aufsummieren lassen (siehe Gleichung 4.1). Dieses Superpositionsprinzip hat sich bereits in mehreren wissenschaftlichen Arbeiten als geeignet erwiesen /Ret95/, /Sch09/, /Wie09/, /Spr11/, /Bou12/, /Son13/.

$$\lambda_{\text{eff}} = \lambda_r + \lambda_s + \lambda_{\text{gas}} + \lambda_{\text{cpl}} \quad (4.1)$$

- λ_r WLF durch Wärmestrahlung [W/(m·K)]
- λ_s WLF der Feststoffmatrix [W/(m·K)]
- λ_{gas} WLF der Gasphase [W/(m·K)]
- λ_{cpl} WLF durch den Kopplungseffekt [W/(m·K)]

λ_r steigt mit der Temperatur und sinkt mit steigender Extinktion des Dämmstoffes. Die Extinktion beschreibt in diesem Zusammenhang die Fähigkeit des Wärmedämmstoffes die im betrachteten Temperaturbereich auftretende Infrarotstrahlung durch Absorption oder Streuung abzuschwächen.

λ_s steigt mit der Schüttdichte, dem externen Druck und der WLF des Feststoffes und sinkt mit ansteigender Porosität.

λ_{gas} steigt mit dem Vakuumdruck, der mittleren Porengröße des porösen Wärmedämmstoffes und der Temperatur. Je kleiner die Poren des Wärmedämmstoffes sind, desto höher kann der Vakuumdruck sein, unterhalb welchem die Gaswärmeleitung unterbunden werden kann. Dieser Zusammenhang kann mit Gleichung 4.2 am Beispiel der Wärmeleitfähigkeit von Luft λ_{Luft} (Luft-WLF) beschrieben werden und ist in Abbildung 3 für verschiedene Porengrößen bzw. Spaltweiten dargestellt.

Ein Erhöhen der Schüttdichte führt zu kleineren Poren und kann damit zu einer Verringerung der Gaswärmeleitung führen.

λ_{cpl} steigt mit dem Vakuumdruck, der Temperatur und der Anzahl von Kontaktstellen zwischen den Partikeln oder Fasern eines Wärmedämmstoffes.

$$\lambda_{\text{Luft}}(p) = \frac{\lambda_0}{1 + \frac{p_{1/2}}{p}} \quad (4.2)$$

Mit:

- λ_0 Kontinuums-WLF der Luft (temperaturabhängig) [W/(m·K)]
- p Druck [mbar]
- $p_{1/2}$ Halbwertsdruck, bei welchem die Luft-WLF auf die Hälfte des Wertes der Kontinuums-WLF gefallen ist [mbar]

Für Luft gilt die Zahlenwert-Gleichung 4.3:

$$p_{1/2} = \frac{230}{d_{RS} [\mu m]} \quad (4.3)$$

Mit:

d_{RS} Porengröße bzw. Spaltweite [μm]

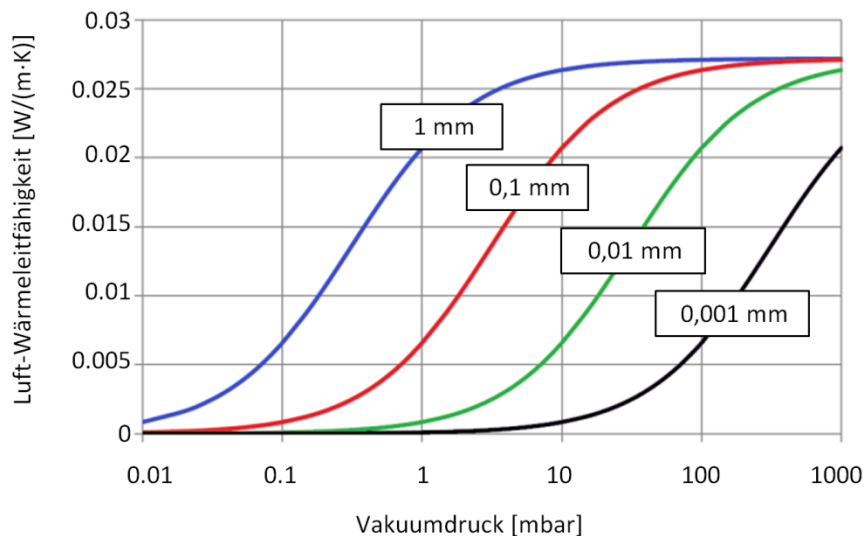


Abbildung 3. Wärmeleitfähigkeit der Luft in Abhängigkeit vom Vakuumdruck für verschiedene Wandabstände oder mittlere Porengrößen, berechnet nach Gleichung 4.2.

4.2 Wärmedämmstoffe

Für die Anwendung eines Wärmedämmstoffs in einem doppelwandigen Behälter mit starrer Außenhülle, dessen Zwischenraum mit dem Wärmedämmstoff befüllt und evakuiert ist, wird im Vergleich zu einem Vakuumisulationspaneel kein externer Druck auf den Wärmedämmstoff aufgebracht. Es existieren hauptsächlich zwei Gründe, den Zwischenraum mit Wärmedämmstoffen zu befüllen. Einer der Gründe ist, dass durch die geringe Porengröße der Wärmedämmstoffe im Vergleich zum Wandabstand des Zwischenraumes die Luftwärmeleitung und der Kopplungseffekt bei deutlich höheren Vakuumdrücken unterdrückt werden können (siehe Abbildung 3). Die Luftwärmeleitung hat zusammen mit dem Kopplungseffekt bei Umgebungsdruck, sowie den betrachteten Temperaturen und Wärmedämmstoffen, den größten Anteil am Wärmetransport durch die Speicherhülle. Das Generieren und Halten eines sehr tiefen Vakuumdrucks ist mit hohen Kosten durch die notwendige Qualität der Dichtheit und der Oberflächenbeschaffenheiten sowie den langen notwendigen Laufzeiten von Vakuumpumpen verbunden. Der zweite Grund für den Einsatz von Wärmedämmstoffen ist die gezielte Erhöhung der Extinktion von Wärmestrahlung (IR-Strahlung). Der Wärmetransport über die Festkörpermatrix, der durch die Wärmedämmstoffe vorhanden ist, hat am Anteil der eff. WLF für die meisten Wärmedämmstoffe hingegen einen vergleichsweise geringen Anteil.

Die Hauptanforderungen an Wärmedämmstoffe für die oben genannten Anwendung sind:

- Schüttfähigkeit

- Offene Poren
- Kleine Poren
- Keine ausgasenden Bestandteile bei Anwendungsdruck und -temperatur
- Temperaturbeständigkeit
- Hohe Infrarot-Extinktion
- Geringe Kosten

Die identifizierten und untersuchten Wärmedämmstoffe und deren wichtigste Eigenschaften sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Tabelle 1. Untersuchte Wärmedämmstoffe

Wärmedämmstoff	Korngröße ¹ [μm]	Mittlere Poren- größe [μm]	Schüttdichte ¹ [kg/m^3]	Preis ² [€/m ³]
grobkörniger expandierter Perlit (gEP)	bis 2000	ca. 44 ³	53	62,8
feinkörniger expandierter Perlit (fEP)	bis 200	ca. 30 ³	140	126
pyrogene Kieselsäure (pKS)	0,01 – 10	0,36 – 12,8 ⁴	40	180 – 320
Siliziumkarbid (SiC)	0,6 – 10,5	N. N.	939 ³⁾	1220
Aerogelmatte	N. N.	N. N.	150	3560

¹ Herstellerangaben

² gemäß Angeboten der Hersteller oder Vertreiber an Fa. Sirch oder an das ITW

³ Eigenmessung

⁴ pyrogene Kieselsäure mit IR-Trübungsmittel; Porengröße abhängig vom Verdichtungsgrad /Son13/

In Abbildung 4 sind Lichtbildaufnahmen der untersuchten Wärmedämmstoffe dargestellt.



Abbildung 4. Untersuchte Wärmedämmstoffe. (a) gEP; (b) fEP; (c) pKS; (d) SiC; (e) Aerogelmatte /Sta16/

Alle Materialien verfügen über eine weitgehend offenporige Struktur, sind ausgasungsarm und temperaturbeständig. Pyrogene Kieselsäure (pKS) wird häufig in

Vakuumisolationspaneelen in gepresster Form eingesetzt und wurde aufgrund der geringen erreichbaren Porengröße und der durch die Struktur bedingten geringen Festkörper-WLF ausgewählt. Das Herstellungsverfahren und die Struktur der Körner kann bspw. /Wac16/ entnommen werden.

Nachteile der pKS sind der vergleichsweise hohe Preis und die geringe Extinktion. Daher wurden zwei verschiedene expandierte Perlite (EP) identifiziert, die eine höhere Extinktion aufweisen und zu einem geringeren Preis verfügbar sind. Die Herkunft und das Herstellungsverfahren von EP ist in /Per16/ beschrieben. Es wurden Perlite verschiedener Korngröße ausgewählt, um den Einfluss der Porengröße und Schüttdichte auf die eff. WLF zu untersuchen. Um den Wärmetransport durch Wärmestrahlung weiter zu verringern, wurde mit einem Siliziumkarbid-Pulver (SiC) der Einsatz eines Infrarot-Strahlungshemmers untersucht. Mit dem Material „Spaceloft® grey“ wurde zudem eine Fasermatte mit eingearbeitetem Aerogelpulver (Aerogelmatte) hinsichtlich der eff. WLF untersucht.

4.3 Experimenteller Aufbau

Zur Messung der eff. WLF wurden zwei verschiedene Prüfstände verwendet. Ein Prüfstand besteht aus einer Zweiplatten-Apparatur mit geschützter Heizplatte (ZPA) und einem für dieses Projekt konstruierten und gefertigten evakuierbaren Probenbehälter (siehe Abbildung 5). Die Stützen sind notwendig um die Last, die aus dem Vakuumdruck resultiert, aufzunehmen. Der Einfluss dieser Stützen auf die gemessene eff. WLF wurde durch Messungen, eindimensionale Berechnungen und mehrdimensionale Simulationen bestimmt.

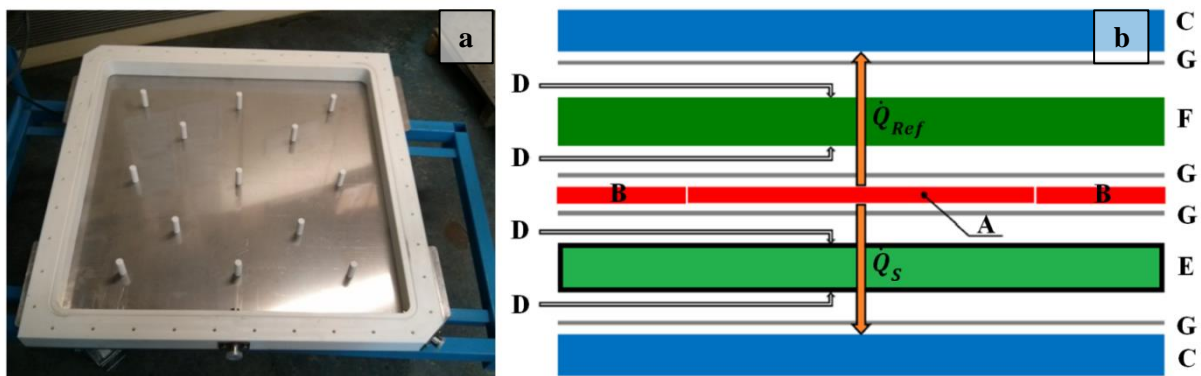


Abbildung 5. (a) geöffneter evakuierbarer Probenbehälter; (b) Messprinzip der ZPA. A: Messbereich der Heizplatte, B: Schutzheizungsring, C: Kühlplatten, D: Temperaturmessung, E: Probenbehälter inklusive Probe, F: Referenz-Material mit bekannter eff. WLF, G: Kontaktmatten um den Wärmeübergang zwischen Heiz- und Kühlplatten und der Probe zu verbessern. \dot{Q}_S : Wärmestrom durch Probenbehälter inklusive Probe, \dot{Q}_{Ref} : Wärmestrom durch das Referenzmaterial

Der zweite Prüfstand ist eine Zylinderapparatur mit einem sogenannten geschützten Heizzylinder (ZA). Dieser besteht aus einer zylindrischen, beheizbaren Vakuumkammer, die einen konzentrisch gelagerten Heizzylinder mit Schutzheizungszyklindern enthält (siehe

Abbildung 6). Die Vakuumkammer wird zur Messung mit schüttfähigen Wärmedämmstoffen befüllt. Diese Messapparatur wurde speziell für dieses Projekt konstruiert und aufgebaut.

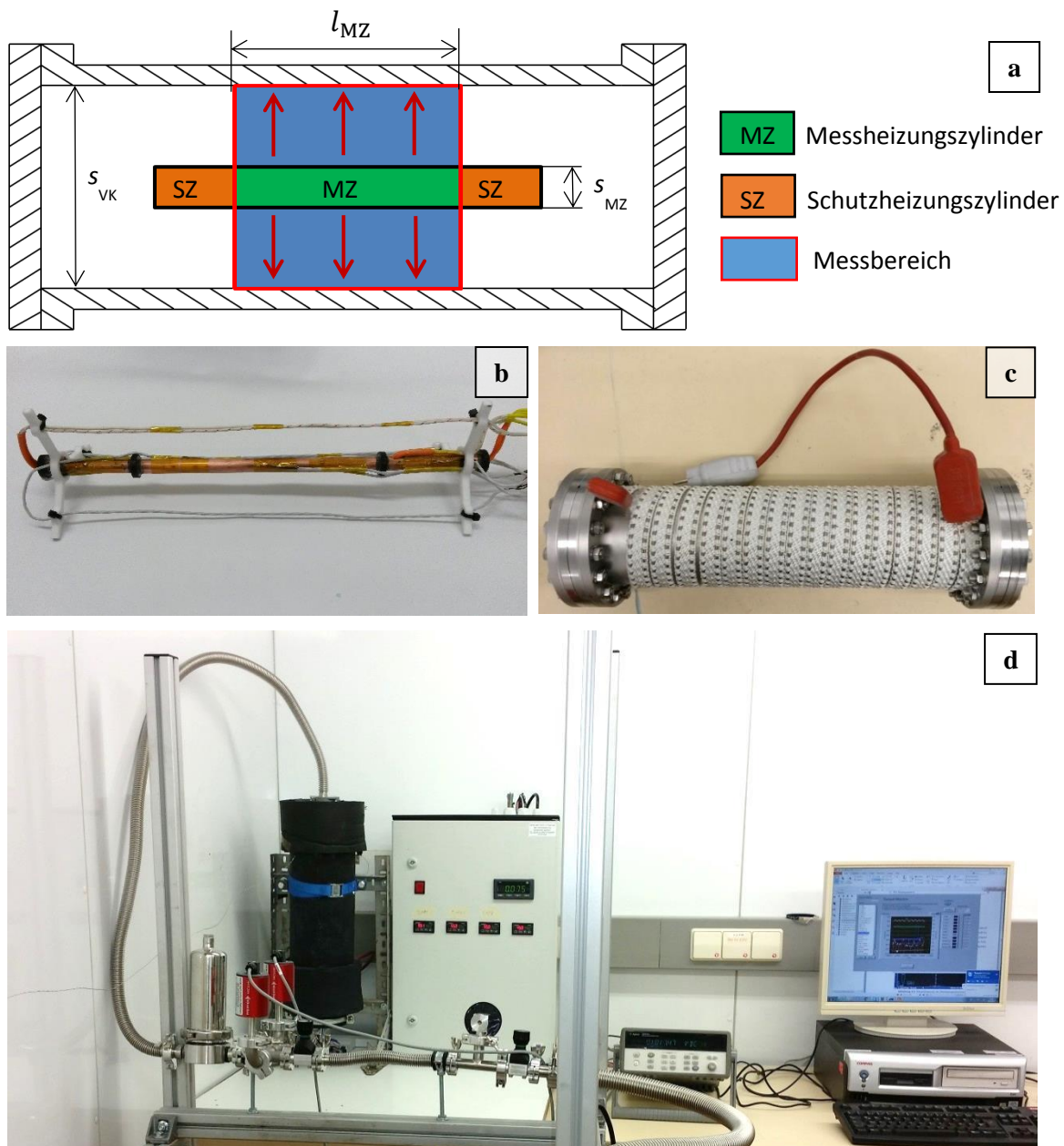


Abbildung 6. (a) Funktionsprinzip der Zylinderapparatur (ZA) (l_{MZ} [mm]: Länge des Messheizungszyinders, s_{VK} [mm]: Innendurchmesser der Vakuumkammer, s_{MZ} [mm]: Außendurchmesser des Messheizungszyinders; (b) Messheizungszyylinder und Schutzheizungszyylinder, separiert durch thermische Widerstände (schwarz); inklusive Temperatursensoren, Verkabelung und Abstandshaltern (weiß); (c) Vakuumkammer mit Heizband; (d) installierte und außengedämmte ZA mit EMSR-Technik und Vakuum-Ausrüstung

Beide Messapparaturen arbeiten nach dem gleichen, stationären Messprinzip. Eine vordefinierte Temperaturdifferenz ΔT [K] wird an die Probe angelegt. Das innere Heizelement (Heizplatte oder Heizzyylinder) wird durch elektrische Beheizung auf die höhere Temperatur gebracht. Der zugeführte Wärmestrom kann über einen elektrischen Leistungsmesser bestimmt werden. Unter Einbeziehung der Probenabmessungen,

zusammengefasst in einem Formkoeffizient S [mm], kann die eff. WLF λ_{eff} gemäß Gleichung 4.4 bestimmt werden.

$$\dot{Q} = S \cdot \lambda_{\text{eff}} \cdot \Delta T \quad (4.4)$$

Der Formkoeffizient bei der Messung mit der ZPA ist der Quotient aus der Fläche des Messbereichs der Heizplatte zur Dicke der Probe. Die Berechnung des Formkoeffizienten der ZA S_{ZA} [m] ist in Gleichung 4.5 definiert.

$$S_{\text{ZA}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot l_{\text{MZ}}}{\ln\left(\frac{s_{\text{VK}}}{s_{\text{MZ}}}\right)} \quad (4.5)$$

l_{MZ} Länge des Messheizungszyinders [m]

s_{VK} Innendurchmesser der Vakuumkammer [m]

s_{MZ} Außendurchmesser des Messheizungszyinders [m]

Gleichung 4.5 ist jedoch nur gültig für die Annahme einer vollständigen Elimination von axialen Wärmeströmen im Messbereich. Da die Schutzheizungszyinder diese aber nicht vollständig eliminieren können und aufgrund des Einflusses der notwendigen Verkabelung innerhalb des Messbereichs, wurde der Formkoeffizient durch eine Kalibrierung angepasst. Hierfür wurden Messungen in der ZA bei Atmosphärendruck mit einem Material, das zuvor in der ZPA in offenen Edelstahl-Probenbehältern vermessen wurde, durchgeführt. Die Probenmitteltemperatur, die Schüttdichte und die klimatischen Bedingungen bei der vorherigen Lagerung des Materials waren bei beiden Messungen identisch. Somit konnte der Formkoeffizient derart angepasst werden, dass sich bei Messungen in der ZA der gleiche Wert der eff. WLF wie in der ZPA ergibt. Weitere Messergebnisse in der ZA zeigten bei Atmosphärendruck Abweichungen im Vergleich zu den Messungen mit der ZPA von bis zu $\pm 11\%$. Daher wird die Unsicherheit bei der Ermittlung des Formkoeffizienten zu $\pm 11\%$ angenommen.

Um den Einfluss des evakuierbaren Probenbehälters für die ZPA auf die Messergebnisse zu bestimmen, wurden Messungen, Berechnungen und Simulationen durchgeführt. Messungen der eff. WLF von Wärmedämmstoffen mit und ohne evakuierbaren Probenbehälter, sowie im evakuierbaren Probenbehälter mit und ohne Stützen (vgl. Abbildung 5a) wurden bei Atmosphärendruck durchgeführt. Der Einfluss der Stützen ist gering und konnte mit geringem Aufwand bestimmt werden. Es existiert aber ein weiteres Phänomen, das einen großen Einfluss auf die Messungsgüte hat: Aufgrund der vergleichsweise hohen WLF der oberen Edelstahl-Abdeckung des evakuierbaren Probenbehälters, die an der Heizplatte anliegt, können selbst kleine Temperaturdifferenzen zwischen Messbereich und Schutzheizring der Heizplatte (Schutzheizungsversatz) von 0,1 bis 0,5 K einen großen Einfluss auf die gemessene eff. WLF haben. Diese Abweichungen werden durch Wärmeströme entlang der Edelstahlplatte ausgelöst, die den Wärmewiderstand zwischen Messbereich und

Schutzheizring der Heizplatte kurzschließen. Durch thermische Simulationen⁵ dieses Phänomens konnte die Größenordnung der Abweichungen in Abhängigkeit des Schutzheizungsversatzes bestimmt werden. Da jedoch die Messung des Schutzheizungsversatzes über den gesamten Grenzbereich zwischen Messbereich und Schutzbereich nicht in hinreichend großer Auflösung möglich war, konnte die Abweichung in den Messungen nicht hinreichend genau quantifiziert werden. Daher wurden die Messwerte aus diesem experimentellen Aufbau nicht verwertet. Aufgrund der beschriebenen Probleme bei der Messung mit dem evakuierbaren Probenbehälter in der ZPA wurde mit der ZA eine neue Messapparatur aufgebaut.

Messungen in der ZPA, bei welchen keine Schicht mit vergleichsweise hoher WLF an der Heizplatte anliegt, haben sich durch zahlreiche Messungen mit Referenzmaterialien hingegen als sehr genau und reproduzierbar erwiesen. Die maximale Unsicherheit kann mit $\pm 5\%$ angenommen werden.

Im Vergleich zur ZPA kann in der ZA der Schutzheizungsversatz manuell eingestellt werden, womit die Sensitivität dieser Temperaturdifferenz ermittelt werden konnte. Obwohl auch bei der ZA der Schutzheizungsversatz nicht über den gesamten Grenzbereich mit hoher Auflösung ermittelbar ist, konnte durch Referenz-Messungen in der ZPA bei Atmosphärendruck und durch Ermittlung einer linearen Korrelation zwischen Schutzheizungsversatz und Abweichungen der Messergebnisse der eff. WLF der Fehler vergleichsweise gering gehalten werden. Bei einer maximalen Abweichung zwischen gemessenem und tatsächlichem Schutzheizungsversatz von $\pm 0,5\text{ K}$ kann der absolute Messfehler zu $\pm 1,4\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ angenommen werden.

4.4 Messergebnisse

In Abbildung 7 und Abbildung 8 sind die Messergebnisse aus der ZA dargestellt. Es ist jeweils die eff. WLF als Funktion des Vakuumdrucks bei einer Mitteltemperatur von 48 °C und einer Temperaturdifferenz von 10 K zwischen Heizzylinder und Innenwand der Vakuumkammer aufgetragen. Nach den Erfahrungen, die in diesem Projekt gesammelt wurden, lässt sich in großen Dämmstoffvolumina, wie sie in den betrachteten Warmwasserspeichern vorhanden sind, technisch nur sehr aufwendig ein Vakuumdruck von $< 1\text{ mbar}$ erreichen und über einen längeren Zeitraum aufrechterhalten. Daher ist für die Bewertung des am besten geeigneten Wärmedämmstoffes die eff. WLF zwischen 1 und 10 mbar eine entscheidende Bewertungsgröße.

In Abbildung 7 sind die eff. WLF der Perlite, der pyrogenen Kieselsäure (pKS) und Mischungen aus gEP und pKS dargestellt. Der gEP weist bei Atmosphärendruck eine eff. WLF von $46,4\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ auf. Die minimale WLF von $11,5\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ wird bei einem Druck kleiner als $0,1\text{ mbar}$ erreicht. Zwischen 1 und 10 mbar liegt die eff. WLF mit zwischen $21,8$ und $33,7\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ am höchsten im Vergleich der untersuchten Wärmedämmstoffe. Die eff. WLF von fEP ist bei Umgebungsdruck mit $61,6\text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ deutlich höher, sinkt bei

⁵ Simulationssoftware: Comsol Multiphysics, Version 4.4

Vakuumdrücken zwischen 0,1 und 1 mbar auf einen minimalen Wert von 8,7 mW/(m·K) und erreicht damit jedoch die geringste minimale eff. WLF im Vergleich der untersuchten Wärmedämmstoffe. Zwischen 1 und 10 mbar liegt die effektive WLF zwischen 11,7 und 29 mW/(m·K). Die pKS besitzt bei Atmosphärendruck eine eff. WLF von 34,6 mW/(m·K) und erreicht die minimale WLF von 16,4 mW/(m·K) bereits im Bereich eines Vakuumdrucks zwischen 1 und 10 mbar. Die Kurvenverläufe entsprechen qualitativ denen der Luft-WLF aus Abbildung 3 für die verschiedenen Porengrößen, die für die untersuchten Wärmedämmstoffe Tabelle 1 entnommen werden können.

Die Luft-WLF wird bei pKS durch die geringe Porengröße bereits bei Umgebungsdruck reduziert. Außerdem besitzt pKS aufgrund der geringeren Dichte und der feineren Struktur eine geringere Festkörper-WLF als die untersuchten Perlite. Allerdings ist die spezifische Extinktion von pKS geringer als die der Perlite, weshalb die minimale eff. WLF von pKS im Vergleich größer ist.

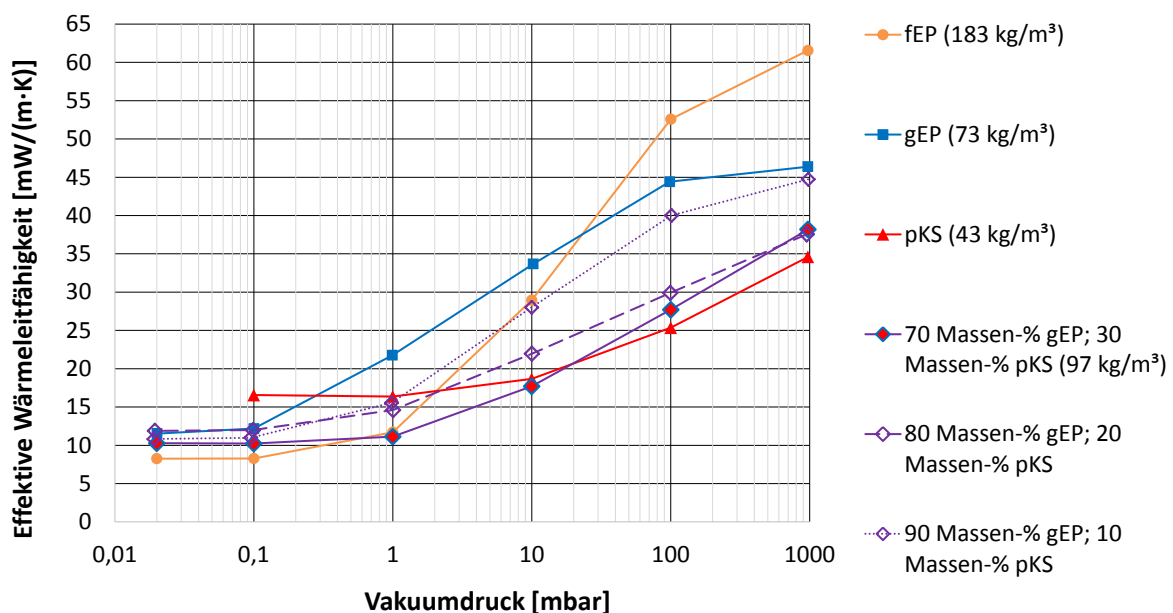


Abbildung 7. Eff. WLF von EP, pKS und Mischungen in Abhängigkeit vom Vakuumdruck, in der ZA gemessen bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

Die eff. WLF von fEP liegt bei Umgebungsdruck höher als die von gEP aufgrund der höheren Schüttdichte, die eine höhere Festkörper-WLF verursacht und aufgrund der kleineren Körner, die eine größere Anzahl an Kontaktstellen zwischen den Körnern hervorrufen, was zu einem erhöhten Einfluss des Kopplungseffektes führt. Die mittlere Porengröße von fEP ist aufgrund der kleineren Kornzwischenräume geringer als die von gEP, weshalb sich die minimale eff. WLF durch Unterdrückung der Luft-Wärmeleitung und des Kopplungseffektes bereits bei einem höheren Vakuumdruck einstellt. Dass die minimale eff. WLF von fEP gegenüber gEP geringer ist, kann mit einer höheren Infrarot-Extinktion durch die höhere Schüttdichte begründet werden.

Um die Vorteile der Perlite und der pKS zu verbinden, wurde eine Mischung aus gEP und pKS als vielversprechend identifiziert. Die kleinen Körner der pyrogenen Kieselsäure können sich

zwischen den größeren Perlitkörnern einlagern und somit die mittlere Porengröße reduzieren. Die höhere spezifische Extinktion des Perlits reduziert den Wärmetransport durch Infrarotstrahlung. Außerdem werden die Kosten im Vergleich zum Einsatz reiner pyrogener Kieselsäure durch einen hohen Anteil an kostengünstigerem Perlit deutlich reduziert. Es wurden zunächst Mischversuche durchgeführt, um das Mischverhältnis mit der höchsten Schüttdichte zu ermitteln. Der gEP hat eine höhere Schüttdichte und größere Körner als pKS. Bei der maximalen Schüttdichte kann davon ausgegangen werden, dass die Körner der pKS die Kornzwischenräume des gEP vollständig ausgefüllt haben, ohne darüber hinaus Körner des gEP zu verdrängen. Dieses Mischverhältnis stellt nach den Gesichtspunkten der Dämmstoffkosten und der Porengröße einen vielversprechenden Kompromiss dar. Das Mischverhältnis mit der höchsten Schüttdichte stellte sich zwischen 80 und 90 Massenprozent gEP und 10 – 20 Massenprozent pKS ein. Wie in Abbildung 7 zu sehen, stellt sich die beste Dämmwirkung zwischen 1 und 10 mbar jedoch für die Mischung aus 70 Massenprozent gEP und 30 Massenprozent pKS ein. Das kann zum einen darauf zurückgeführt werden, dass ein geringerer Anteil an Perlit ausreicht um die spezifische Extinktion des Wärmedämmstoffes effektiv zu erhöhen. Zum anderen sinkt die mittlere Porengröße durch den höheren Anteil an pKS, was zu einer Minimierung der eff. WLF bei höheren Vakuumdrücken führt, im Vergleich zu den anderen Mischverhältnissen. Außerdem wird die Festkörper-WLF durch den geringeren Anteil an Perlit reduziert. Durch die Kombination der thermisch vorteilhaften Eigenschaften beider Wärmedämmstoffe konnte somit eine Dämmstoffmischung identifiziert werden, die im Anwendungsbereich zwischen 1 und 10 mbar deutlich geringere eff. Wärmeleitfähigkeiten als die Reinstoffe besitzt. Mischungen mit höheren Anteilen an pKS als die hier dargestellten wurden mit Hinblick auf deren hohe Dämmstoffkosten und die lange Messdauer der ZA im Rahmen des Projektes nicht untersucht.

Abbildung 8 zeigt den Effekt des Einsatzes des Strahlungshemmers SiC auf die eff. WLF von pKS. Durch das Beimischen dieses IR-Strahlungshemmers lässt sich die eff. WLF bei der betrachteten Probenmitteltemperatur um 6,3 bis 9,0 mW/(m·K) reduzieren. Damit wird im Druckbereich zwischen 1 und 10 mbar eine eff. WLF zwischen 9,4 und 11,5 mW/(m·K) erreicht. Es ist davon auszugehen, dass die Beimischung eines Strahlungshemmers wie SiC auch bei den weiteren untersuchten Dämmstoffmischungen zur Reduzierung der eff. WLF eingesetzt werden kann. Diese Untersuchungen konnten im Rahmen des Projektes aufgrund der zeitintensiven Messungen und des notwendigen Aufbaus einer neuen Messapparatur (ZA) nicht mehr durchgeführt werden.

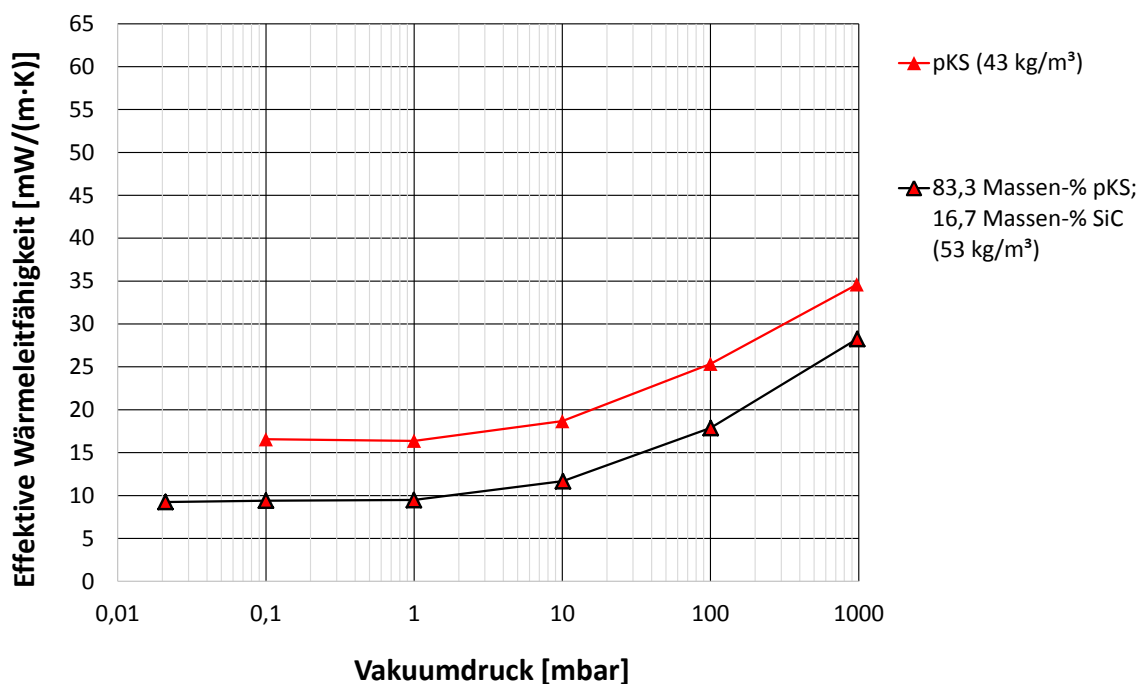


Abbildung 8. Eff. WLF von pKS mit und ohne IR-Strahlungshemmer SiC in Abhängigkeit vom Vakuumdruck, in der ZA gemessen bei einer Probenmitteltemperatur von 48 °C

Die Messergebnisse aus der ZA sind qualitativ plausibel und physikalisch begründbar. In der Literatur sind für einige der untersuchten Wärmedämmstoffe jedoch geringere Werte veröffentlicht. Für den gEP des gleichen Typs mit einer Schüttdichte von 60 kg/m^3 wird in /Dem11/ bei einem Vakuumdruck von 0,01 mbar und 50 °C Probenmitteltemperatur eine eff. WLF von $7 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ angegeben. Für eine Mischung aus pKS und einem IR-Trübungsmittel bei einer Schüttdichte von 56 kg/m^3 wird in /Son13/ für 1 mbar eine eff. WLF von $3,6 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ermittelt. Allerdings liegt bei dieser Untersuchung die Probenmitteltemperatur bei ca. 25 °C und die genaue Zusammensetzung der Mischung ist nicht bekannt. Um die Plausibilität des Messwertes der eff. WLF von pKS bei einem Vakuumdruck $< 1 \text{ mbar}$ abzuschätzen, kann der Anteil der WLF durch Wärmestrahlung an der eff. WLF mit Hilfe der Rosseland Approximation, z. B. beschrieben in /Fri08/, berechnet werden. Der Rosseland Extinktionskoeffizient von pKS wird in /Son13/ mit $23 \text{ m}^2/\text{kg}$ bei 25 °C beschrieben. Getrübte pKS kann bei gleicher Temperatur einen Wert von $90 \text{ m}^2/\text{kg}$ erreichen /Son13/ und für expandierten Perlit wird in /Dem11/ bei 26 °C ein Wert von $43 \text{ m}^2/\text{kg}$ ermittelt. Mit einer Mitteltemperatur von 48 °C, einer Schüttdichte von 43 kg/m^3 und der Annahme, dass der Rosseland Extinktionskoeffizient für pKS von $23 \text{ m}^2/\text{kg}$ auch für eine Mitteltemperatur von 48 °C gilt⁶, kann eine WLF durch Wärmestrahlung von $10,1 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ berechnet werden.

Für die in der ZA gemessenen Werte der eff. WLF resultiert daraus eine WLF der Feststoffmatrix von $6,3 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Dieser Wert ist sehr hoch im Vergleich zu /Son13/. In

⁶ Die Temperaturabhängigkeit des Extinktionskoeffizienten ist schwach ausgeprägt.

dieser Veröffentlichung werden Werte von $< 1 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ für pKS bei einer Schüttdichte von $50 \text{ kg}/\text{m}^3$ angegeben, die mit IR-Strahlungshemmern gemischt ist, welche für gewöhnlich eine höhere Feststoff-WLF besitzen als pKS.

Die Abweichung der Messwerte zu den Literaturwerten ist höher als die in Kapitel 5.2 beschriebenen Messfehler, so dass weitere Messunsicherheiten nicht ausgeschlossen werden können. Diese können durch eine inhomogene Temperaturverteilung auf der Oberfläche des Heizzylinders und der Innenoberfläche der Vakuumkammer resultieren. Zudem treten bei geringen Vakuumdrücken vergleichsweise große Schwankungen der Heizleistung und damit auch der Temperaturen auf. Dadurch erhöhen sich ebenfalls die Messunsicherheiten.

Abbildung 9 zeigt die eff. WLF als Funktion von der Probenmitteltemperatur bei Umgebungsdruck für fEP, gEP und pKS.

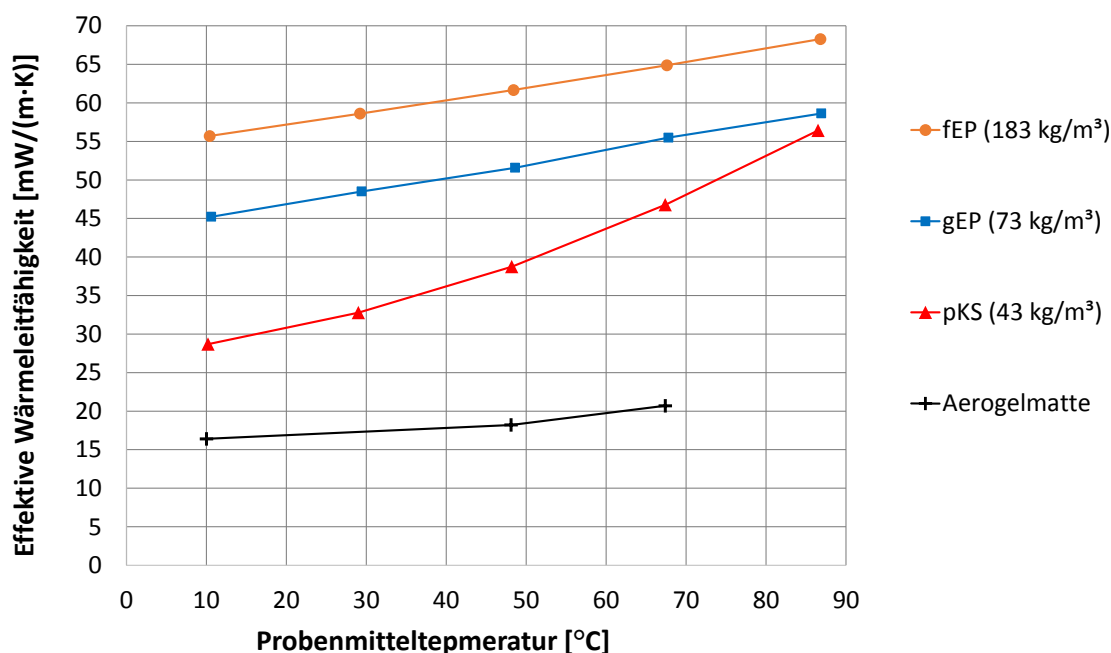


Abbildung 9. Eff. WLF der untersuchten reinen Wärmedämmstoffe bei Umgebungsdruck in Abhängigkeit von der Probenmitteltemperatur, gemessen in der ZPA

Während die Steigung der eff. WLF mit der Temperatur für die Perlite konstant und nahezu gleich ist, ist die Steigung für die pKS im Vergleich größer und steigt mit zunehmender Temperatur überproportional. Das ist durch die oben beschriebene geringere spezifische Extinktion zu erklären. Aufgrund der höheren Schüttdichte des fEP könnte eine geringere Steigung im Vergleich zum gEP erwartet werden. Die Differenz der WLF durch Wärmestrahlung ist jedoch mit maximal $2,6 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ (berechnet nach der Rosseland Approximation bei 86 °C) gering im Vergleich zur eff. WLF und liegt damit im Bereich der Messunsicherheit der ZPA. Die untersuchten Aerogelmatte weisen die geringste eff. WLF auf. Diese liegt im Probenmitteltemperaturbereich von 10 °C bis $67,4 \text{ °C}$ bei $16,4$ bis $20,7 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Die untersuchte Aerogelmatte enthält ein Grafitpulver als IR-

Strahlungshemmer, was die geringe Steigung der eff. WLF mit zunehmender Temperatur erklärt. Allerdings sind die Aerogelmatten mit 3.560 €/m³ vergleichsweise teuer (vgl. Tabelle 1).

Die betrachteten schüttfähigen Wärmedämmstoffe weisen in der Schüttdichte, die nach dem Einfüllen in den Zwischenraum eines doppelwandigen Speichers und Verdichten durch Rüttelplatten entsteht, keine ausreichende Druckfestigkeit auf, um die aus dem Unterdruck resultierende Last auf die Außenhülle des Speichers signifikant zu verringern. Somit kann die Stärke der Außenhülle nicht gegenüber einem Zwischenraum ohne Dämmstoff-Füllung reduziert werden. Die Aerogelmatten besitzen jedoch eine ausreichende Druckfestigkeit und Formstabilität, um in einem Vakuum-Wärmedämmkonzept eines Warmwasserspeichers mit dünner, flexibler Außenhülle eingesetzt zu werden. Dieses Konzept ist in Kapitel 7.6 beschrieben.

4.5 Verspiegelte Innenwände

Ähnlich wie beim Funktionsprinzip eines Dewar-Gefäßes, besteht auch bei Warmwasserspeichern grundsätzlich die Möglichkeit auf den Einsatz von Wärmedämmstoffen zu verzichten und den nicht verfüllten Zwischenraum eines doppelwandigen Warmwasserspeichers zu evakuieren. Abgesehen von den unvermeidbaren Wärmebrücken zur Sicherung der Statik und den Anschlüssen zur hydraulischen Be- und Entladung des Speichers, erfolgt der Wärmetransport in diesen Fall über die Wärmeleitung der Luft und über Wärmestrahlung. Um den Wärmetransport über Wärmestrahlung zu verringern, werden in einem Dewar-Gefäß die Wände im Zwischenraum mit einem hohen Reflexionsgrad und somit einem geringen Emissionsgrad ausgeführt. Um die Luft-Wärmeleitung bei technisch handhabbaren Vakuumdrücken zu reduzieren, sind geringe Zwischenraumweiten notwendig. Nach Information der Fa. Sirch können als geringste technisch umsetzbare Zwischenraumweiten, bei der Kontakte des Innenmantels zum Außenmantel ausgeschlossen werden können, je nach Speichergröße 10 – 50 mm angenommen werden.

Am Beispiel eines Warmwasserspeichers mit einem Außendurchmesser des Innenmantels von 1 m, wurden Wärmedurchgangskoeffizienten in Abhängigkeit vom Vakuumdruck für unterschiedliche Zwischenraumweiten und Emissionsgrade der Oberflächen berechnet (siehe Abbildung 10).

Für den Stahl, den Fa. Sirch für den Speicherbau verwendet, wurde am ITW ein Emissionsgrad von $\varepsilon^* = 0,88$ gemessen. Für verspiegelte Oberflächen wurden Emissionsgrade von $\varepsilon^* = 0,1$ und $\varepsilon^* = 0,05$ angenommen. Die Wärmedurchgangskoeffizienten wurden aus dem um den Emissionsgrad erweiterten Stefan-Boltzmann-Gesetz und Gleichung 4.4 für die Luft-WLF ermittelt. Es wurde eine mittlere Speicherwassertemperatur von 70 °C und eine Umgebungstemperatur von 30 °C angenommen. Für λ_0 wurde die Kontinuums-WLF von Luft bei 1 bar und einer Mitteltemperatur von 50 °C angenommen. Somit gilt: $\lambda_0(50 \text{ °C}) = 0,026 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$.

In Abbildung 10 sind die Ergebnisse der Berechnungen dargestellt. Bei Vakuumdrücken < 10 mbar kann das Auftreten von Konvektion für die untersuchten Spaltweiten vernachlässigt werden. Für einen Zwischenraum ohne Dämmstoff-Füllung kann ein minimaler Vakuumdruck von $0,001 - 0,01$ mbar bei entsprechenden Qualitätsanforderungen an die Oberflächen und Dichtungen als technisch machbar eingeschätzt werden.

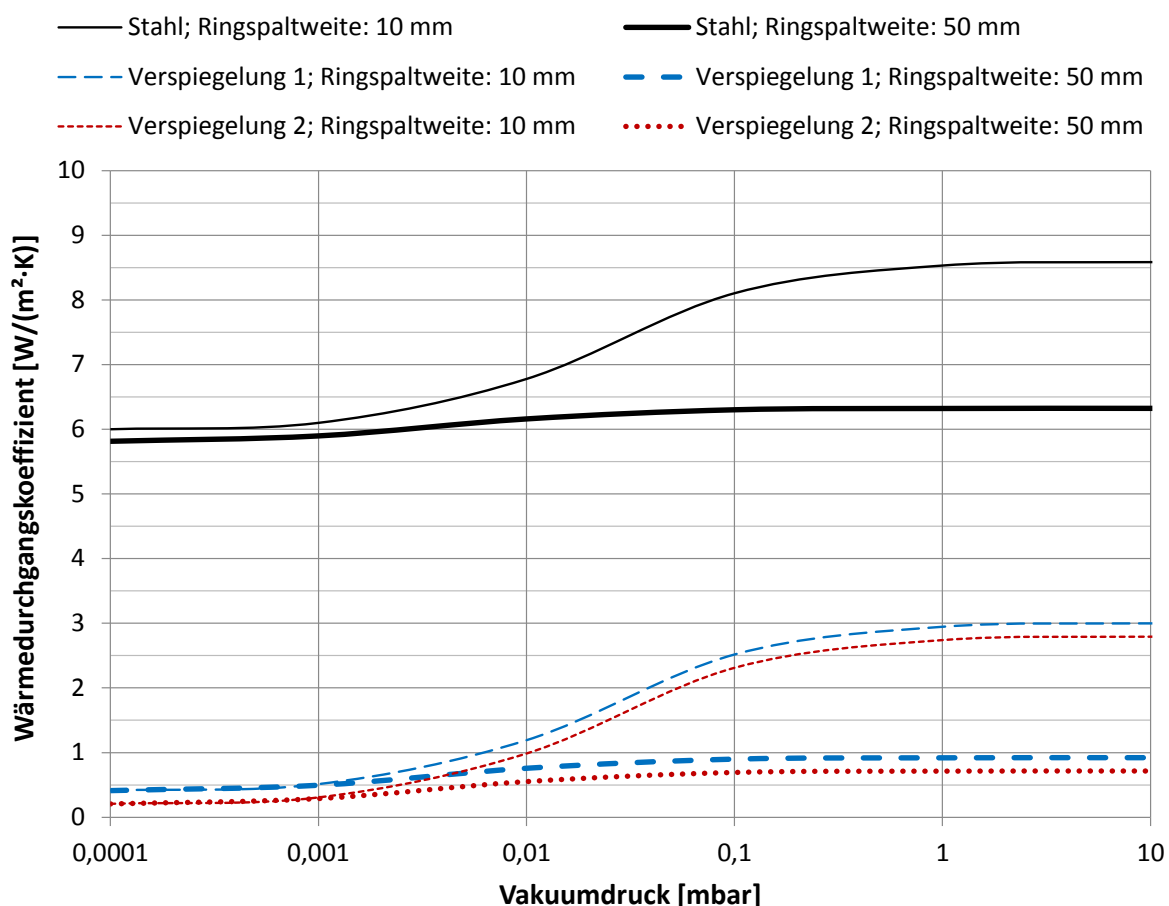


Abbildung 10. Wärmedurchgangskoeffizient in Abhängigkeit des Vakuumdrucks für verschiedene Zwischenraumweiten und Emissionsgrade der Oberflächen. Stahl: $\epsilon^* = 0,88$; Verspiegelung 1: $\epsilon^* = 0,1$; Verspiegelung 2: $\epsilon^* = 0,05$

Es ist zu erkennen, dass eine Verspiegelung der Oberflächen den Wärmedurchgangskoeffizient um bis zu $5,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ reduzieren kann. Für Drücke $> 0,001$ mbar ist der Wärmedurchgangskoeffizient bei verspiegelten Oberflächen für die Spaltweite von 10 mm höher als für 50 mm Spaltweite. In diesem Druckbereich dominiert der Wärmewiderstand der verbliebenen Luftmoleküle im Zwischenraum. Für Drücke $< 0,001$ mbar kann die Luft-WLF bei einer Spaltweite von 10 mm deutlich verringert werden und der Wärmedurchgangskoeffizient gleicht sich für verspiegelte Oberflächen dem bei einer Spaltweite von 50 mm an. In diesem Druckbereich dominiert der Wärmetransport über Wärmestrahlung. Bei einem Vakuumdruck von $0,001$ mbar kann für einen Emissionsgrad von $\epsilon^* = 0,05$ ein Wärmedurchgangskoeffizient von $0,289 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erreicht werden.

Weitere Berechnungen ergeben, dass bei einer Zwischenraumweite von 200 mm, einem Emissionsgrad von $\varepsilon^* = 0,05$ und Luft im Bereich der Kontinuums-WLF ohne Konvektion, ein Wärmedurchgangskoeffizient von $0,327 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erreicht wird. Mit einer Vakuumwärmedämmung mit einer Dämmstoff-Mischung aus 70 Massenprozent gEP und 30 Massenprozent pKS kann bei einem technisch einfach erreichbaren Vakuumdruck von 1 mbar und einer Zwischenraumweite von 200 mm ein Wärmedurchgangskoeffizient von $0,056 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ erreicht werden. Bezüglich der Dämmwirkung ist die Vakuumwärmedämmung mit Wärmedämmstoffen für die betrachteten Temperaturen, Wärmedämmstoffe und Emissionsgrade also um mindestens Faktor 5,2 besser.

4.6 Zusammenfassung

Aufgrund der in Kapitel 4 vorgestellten Ergebnisse werden folgende drei Wärmedämmkonzepte für weitere Untersuchungen in Verbindung mit den Funktionsmuster-Speichern (siehe Kapitel 7) ausgewählt.

- Vakuumwärmedämmung mit einer Dämmstoff-Mischung aus 70 Massenprozent grobkörnigem expandierten Perlit (gEP) und 30 Massenprozent pyrogener Kieselsäure (pKS) in einem doppelwandigen Speicher mit starrer Außenhülle.
- Vakuumwärmedämmung mit dem Dämmstoff feinkörniger expandierter Perlit (fEP) in einem doppelwandigen Speicher mit starrer Außenhülle.
- Vakuumwärmedämmung mit Aerogelmatten in einem Speicher mit flexibler Außenhülle.

Eine Mischung aus pKS und dem IR-Strahlungshemmer Siliziumkarbid (SiC) weist im Druckbereich zwischen 1 und 10 mbar zwar die geringste eff. WLF auf, jedoch konnten diese Werte erst nach Fertigung des Funktionsmusters im Realmaßstab (siehe Kapitel 9) ermittelt werden. Der Grund hierfür waren technische Problemen bei der Messung nach der ursprünglich vorgesehenen Methode in der ZPA, weshalb mit der ZA eine neue Messapparatur aufgebaut wurde. Dadurch kam es zu zeitlichen Verzögerungen. Außerdem sind die Kosten für die Dämmstoff-Mischung aus pKS und SiC mit $210,2 - 364,7 \text{ €/m}^3$ bei einer Schüttdichte von 53 kg/m^3 im Mittel um $25,1 \text{ €/m}^3$ bis $122,75 \text{ €/m}^3$ höher als für die ausgewählte Dämmstoff-Mischung aus gEP und pKS mit $211,4 - 313,3 \text{ €/m}^3$ bei einer Schüttdichte von 97 kg/m^3 oder für das fEP mit $164,7 \text{ €/m}^3$ bei einer Schüttdichte von 183 kg/m^3 .

Bei ersten Messungen der gewählten Dämmstoff-Mischung stellte sich zudem eine deutlich geringere Schüttdichte ein, als die in der Anwendung im Funktionsmuster im Technikumsmaßstab (siehe Kapitel 7) erreichten 97 kg/m^3 . Daher wurde zunächst von einem geringeren Preis für diese Dämmstoff-Mischung ausgegangen. Auch beim Funktionsmuster im Realmaßstab stellte sich mit 62 kg/m^3 eine deutlich geringere Schüttdichte ein, womit sich letztlich Dämmstoffkosten von $135,1 - 200,2 \text{ €/m}^3$ ergeben. Der Wärmedämmstoff fEP weist für Vakuumdrücke $< 1 \text{ mbar}$ die geringste eff. WLF auf. Für die ausgewählte

Dämmstoff-Mischung gilt dies, abgesehen von der Mischung aus pKS und SiC, für Drücke zwischen 1 und 10 mbar.

Das Konzept mit flexibler Außenhülle birgt ein Kosteneinsparpotential, das den Einsatz des derzeit noch vergleichsweise teuren Dämmstoffs Aerogelmatten (3.560 €/m³) für bestimmte Anwendungsfälle wirtschaftlich machen könnte. Zudem ist in dem in Kapitel 7.6 beschriebenen Konzept auch der Einsatz alternativer, kostengünstigerer Dämmstoffmatten möglich, wofür jedoch ggf. leichte Anpassungen des Konzeptes notwendig sind.

5 Technologieentwicklung transparente Wärmedämmung

Transparente Wärmedämmungen (TWD) werden in unterschiedlichen Anwendungen, bevorzugt im Gebäudebereich zur passiven Sonnenenergienutzung, eingesetzt. Die TWD kann dabei hinsichtlich energetischer Belange (z. B. Energieeinsparung) und architektonischer Aspekte (z. B. Tageslichtnutzung) genutzt werden. Stehen energetische Belange bei der Anwendung im Vordergrund, werden TWD i. d. R. in Verbindung mit stark absorbierenden Oberflächen eingesetzt. /Kal13/

Eine TWD soll am Funktionsmuster des außenaufgestellten Warmwasserspeichers (siehe Kapitel 8) zur Erzeugung einer über die Umgebungslufttemperatur erwärmten Warmwasserspeicheraußenoberfläche eingesetzt werden. Die erwärmte Außenoberfläche dient zur Reduzierung des Temperaturgradienten über der Wärmedämmung, in diesem Fall der Vakuumwärmedämmung, und damit zur Verringerung des vom Speicherinneren an die Umgebung abgegebenen Wärmestroms. Die Untersuchung der Eignung von ausgewählten bzw. am Markt verfügbaren TWD-Materialien für diesen Anwendungsfall hinsichtlich der Aspekte Beständigkeit gegen Witterungseinflüsse, Kosten, thermische Leistungsfähigkeit und Adaptierbarkeit an unterschiedliche geometrische Randbedingungen ist Gegenstand dieses Kapitels. Hierzu wurde eine Marktrecherche durchgeführt und fünf TWD-Materialien in einem neu aufgebauten Versuchsstand mit Hilfe mehrerer Versuchsträger experimentell untersucht. Das vielversprechendste TWD-Material wurde identifiziert und hinsichtlich der Anwendung an einem Funktionsmuster im Realmaßstab angepasst und weiter untersucht.

5.1 Stand der Technik und Marktrecherche

Eine mögliche Einteilung transparenter Wärmedämmungen anhand geometrischer Charakteristika (Struktur) in Bezug zu einer Absorberoberfläche zeigt Abbildung 11. Ein Vergleich dieser TWD-Strukturen wird in /Kau03/ und /Won07/ vorgestellt, wobei absorbersenkrechten Strukturen konzeptionelle Vorteile aufgrund geringer Reflexionsverluste bzw. einem effizienten Transport der solaren Strahlung zur hinter der TWD sitzenden Absorberoberfläche zugeschrieben werden.

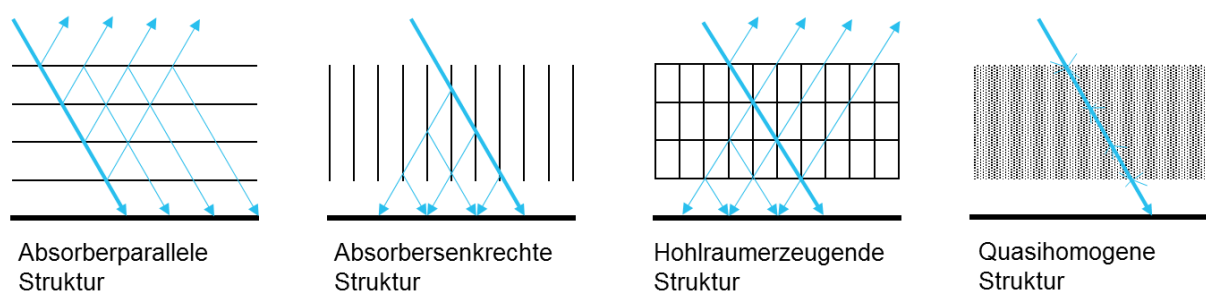


Abbildung 11. Einteilung transparenter Wärmedämmungen anhand ihrer Struktur und schematisch visualisierter Strahlengang der Solarstrahlung innerhalb der TWD (Abbildung in Anlehnung an /Pla88/)

Häufig wird der Einsatz und die Modellierung von transparenten Wärmedämmungen im Bereich von multifunktionalen Fassadenelementen für Gebäudeanwendungen und im Bereich von sog. Kollektor-Speicher Systemen wissenschaftlich untersucht, z. B. in /Ath99/, /Wal06/, /Cha01/ und /Sta14/. Untersuchungen zur direkten Kombination von transparenter Wärmedämmung und Warmwasserspeicher zur Außenaufstellung werden aktuell nur sehr wenige veröffentlicht. Eine ältere Untersuchung zur Modellentwicklung eines außenaufgestellten Warmwasserspeichers mit transparenter Wärmedämmung stellt Taha vor /Tah81/.

Die für das Funktionsmuster eines außenaufgestellten Warmwasserspeichers untersuchten TWD-Strukturen werden in Tabelle 2 mit ihren geometrischen Eigenschaften und in Abbildung 12 visuell vorgestellt. Für die Anwendung der absorbersenkrechten und quasi-homogenen TWD-Strukturen ist eine zusätzliche transparente Abdeckung wie eine Schutzfolie oder Glasscheibe gegen Witterungseinflüsse notwendig. Die untersuchten TWD-Strukturen wurden im Hinblick auf die spätere Anbringung an einem zylindrischen Warmwasserspeicher und die kommerzielle Verfügbarkeit ausgewählt. Bei den selbsttragenden TWD-Strukturen wie der Glasscheibe und der Doppelstegplatte war der Kaltbiegeradius bzw. die Verfügbarkeit einer gebogenen Form ein relevantes Auswahlkriterium. Eine Anpassung der transparenten Wärmedämmungen hinsichtlich ihrer geometrischen Abmessungen (z. B. Luftspaltbreite), wie sie z. B. in /Cap89/ für einen reduzierten Wärmedurchgang einer quasihomogenen Struktur vorgenommen wurde, ist in Kapitel 5.3.2 für die später am Funktionsmuster umgesetzte TWD vorgenommen worden.

Tabelle 2. Geometrische Eigenschaften der untersuchten TWD-Strukturen

Bezeichnung	Beschreibung	TWD Struktur
Glasscheibe	Material: Verbund-Glas (biegbarer Glas-Laminat-Glas-Verbund), Laminatmaterial: Polyvinylbutyral, Einzelscheibendicke: 0,9 mm, Gesamtscheibendicke: 4 mm, Luftspalt zum Absorber: 15-17 mm.	Absorberparallele Struktur
Kapillarplatte	Material: PMMA (Polymethylmethacrylat), Einbaudicke: 40 mm, Kapillarform: annähernd rund, Kapillardurchmesser: ca. 2,5 mm, Abdeckung: Fluorpolymer-Schutzfolie (Dicke: 0,1 mm).	Absorbersenkrechte Struktur
Doppelstegplatte	Material: Makrolon® multi UV2/8, Einbaudicke: 8 mm, Luftspalt zum Absorber: 15-17 mm.	Hohlraum erzeugende Struktur
Glasfasermatte	Material: Glasfaser/Kunstharz, Einbaudicke: 40 mm (komprimiert), Originaldicke: 70 mm, Dichte (unkomprimiert): 4,5 kg/m ³ , Abdeckung: Fluorpolymer-Schutzfolie (Dicke: 0,1 mm).	Quasihomogene Struktur
Wabenlochplatte	Material: Cellulosetriacetat, Einbaudicke: 40 mm, Wabenlochform: annähernd quadratisch, Wabenlochkantenlänge: ca. 9 mm, Abdeckung: Fluorpolymer-Schutzfolie (Dicke: 0,1 mm).	Absorbersenkrechte Struktur

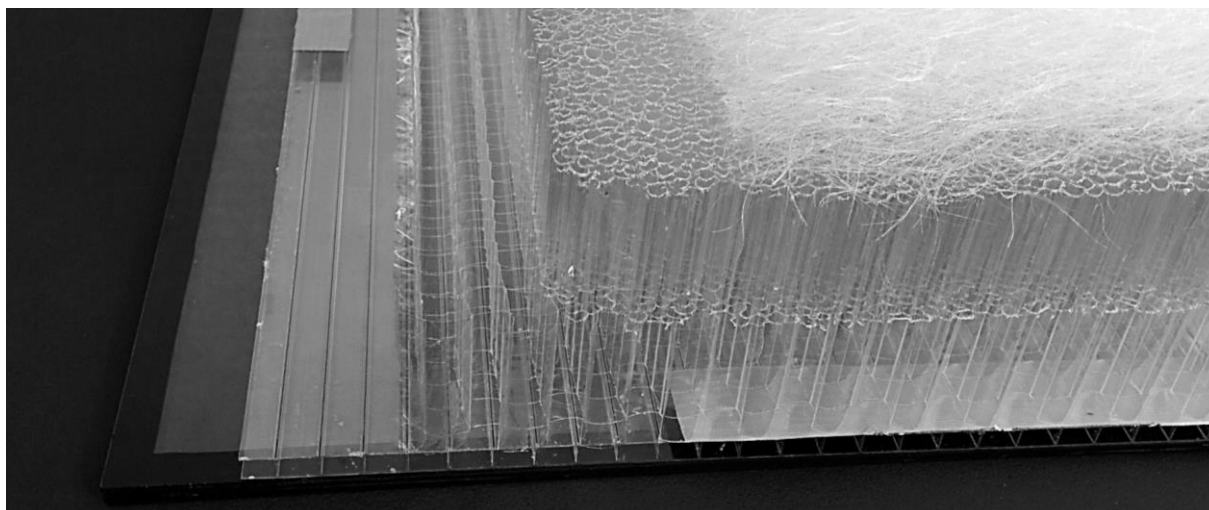


Abbildung 12. Untersuchte TWD: Glasscheibe, Doppelstegplatte, Wabenlochplatte, Kapillarplatte, Glasfasermatte (von links nach rechts)

Ein auf der durchgeführten Marktrecherche basierender Vergleich verschiedener anwendungsrelevanter Eigenschaften der untersuchten TWD-Strukturen zeigt Tabelle 3. Die Bewertung basiert auf aus Datenblättern entnommenen Materialkennwerten, eigens durchgeführten und fremdvergebenen Messungen und auf während der Untersuchung der Materialien erlangten Erfahrungen mit den TWD-Strukturen /Böt14/, /Wil13/. Die Bewertung in Tabelle 3 erfolgt relativ. Für ein Kriterium gibt es eine beste bzw. schlechteste Bewertung („++“ bzw. „--“) und drei Bewertungsstufen dazwischen („+“, „o“ und „-“).

Tabelle 3. Vergleich und Bewertung anwendungsrelevanter Eigenschaften der untersuchten TWD-Strukturen (inkl. ggf. vorhandener Schutzfolie)

Kriterium	Glas- scheibe	Doppelsteg- platte	Wabenloch- platte	Kapillar- platte	Glasfaser- gespinst
Flächengewicht [kg/m ²]	-- (6,50) ¹	+ (1,50)	++ (0,99)	+ (1,55)	++ (0,67)
Transmissionsgrad [%]	++ (91) ²	+ (79) ²	++ (86)	++ (90)	-- (45)
Maximale Arbeitstemperatur [°C]	++ (>180) ³	o (120)	- (100)	-- (80)	- (100)
Kosten (pro Absorber) [€]	++ (44) ⁴	-- (130) ⁴	o (80) ⁴	o (80) ⁴	+ (70) ⁴
Witterungsbeständigkeit	++	o	--	--	o
Verformbarkeit und Befestigung	--	-	+	++	++

¹ Bestimmt mit Literaturwerten /VDI13/

² Materialproben am Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme optisch charakterisiert; Gewichtet mit dem solaren Strahlungsspektrum (AM 1,5)

³ Annahme; ohne Berücksichtigung einer Verbundfolie

⁴ Bestimmt mit Herstellerangeboten

Die Bewertung der TWD-Strukturen erfolgte durch die Eingruppierung ihrer Stoffdaten- bzw. Kenngrößen, die als in Klammern angegebene Zahlenwerte in Tabelle 3 aufgeführt sind, in fünf gleich große Stoffdaten- bzw. Kenngrößenbereiche, denen jeweils eine Bewertungsstufe zugeordnet ist. Die Bewertung der Kriterien Witterungsbeständigkeit, Verformbarkeit und Befestigung erfolgte anhand der während der Untersuchung der TWD-Strukturen erlangten Erfahrungen. Bei diesem Vergleich ist zu beachten, dass die Angaben für die Abmessungen der TWD-Materialien der Versuchsträger (Kapitel 5.2) ermittelt wurden. Durch andere Abmessungen der TWD-Materialien bedingte Veränderungen sind nicht berücksichtigt. Bei den TWD-Materialien Wabenlochplatte, Kapillarplatte und Glasfasergespinst wurde eine zusätzliche Anwendung einer temperaturbeständigen Folie berücksichtigt.

In Tabelle 3 sind Flächengewicht, Transmissionsgrad und maximale Arbeitstemperatur der TWD-Strukturen bewertet. Bei Glas fällt im Vergleich der TWD-Strukturen das deutlich höhere Flächengewicht und die deutlich höhere maximale Arbeitstemperatur auf. Der im Vergleich niedrige Preis der TWD Glasscheibe begründet sich dadurch, dass hier von einer im kalten Zustand biegbaren Glasscheibe ausgegangen wurde und bei den weiteren TWD-Materialien die Kosten für den Zuschnitt bzw. die zusätzliche Schutzfolie hinzukommen. Die dauerhafte Witterungsbeständigkeit wird bei Glas deutlich besser bewertet als bei den restlichen Materialien. Diese Bewertung resultiert aus der erfahrungsgemäß höheren Unempfindlichkeit von Glas im Vergleich zu Kunststoff gegenüber Umwelteinflüssen, wie z. B. UV-Strahlung. Bei den für die Montage relevanten Kriterien Verformbarkeit und Befestigung erhalten die TWD-Strukturen Glasscheibe und Doppelstegplatte eine schlechtere Bewertung. Dies begründet sich aus deren erhöhter Materialsteifigkeit, der z.T. notwendigen Vorort-Bearbeitung zur Montage und ggf. dem Bedarf an Fixierungselementen. Die restlichen TWD-Strukturen werden hinsichtlich dieser Kriterien besser bewertet, da sie grundsätzlich flexibel sind und sich an die gekrümmte Speicheroberfläche anpassen können. Dies obwohl bei den biegsamen TWD-Strukturen eine zusätzliche Vorrichtung zur dauerhaften Fixierung der Schutzfolie (inkl. Nachspanneinrichtung) erforderlich ist. Eine Bewertung der thermischen Leistungsfähigkeit der TWD-Strukturen erfolgt nachfolgend anhand von experimentellen Messungen.

5.2 Experimenteller Aufbau

Zur experimentellen Untersuchung der TWD-Strukturen (siehe Tabelle 2) wurden fünf baugleiche Versuchsträger (A bis E) aufgebaut. Einen dieser Versuchsträger in senkrechter Aufständerung und dessen geometrische Abmessungen zeigt Abbildung 49.

Die Versuchsträger sind aus einer wasserabweisend versiegelten Holzeinhausung, verschiedenen Wärmedämmmaterialien und einer matt-schwarz lackierten Metallplatte (im Folgenden als Absorberblech bezeichnet) mit einer Dicke von 2 mm aufgebaut. In der Holzeinhausung sind die Wärmedämmmaterialien vom Boden zum Absorberblech in folgender Reihe angeordnet: Armaflex® RailSD, Vakuumdämm-Paneel, HT/Armaflex®, Polyurethan-Hartschaum und HT/Armaflex®. Die Anordnung der Wärmedämmmaterialien ist

der erwarteten Temperaturverteilung hinsichtlich der Beständigkeit der Wärmedämmmaterialien angepasst und dient der einfachen Positionierung der Temperatursensoren. Der Versuchsträgeraufbau mit einer im Vergleich zur Vorderseite sehr guten rückseitigen Wärmedämmung wurde in dieser Form gewählt, da es dem Wandaufbau des außenaufgestellten Warmwasserspeicher hinsichtlich seines thermischen Verhaltens ähnelt. Die Versuchsträger besaßen eine senkrechte Aufstellung mit Süd-Orientierung und wurden im Außenlabor des Forschungs- und Testzentrums für Solaranlagen des Instituts für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart exponiert. Ein Pyranometer war unmittelbar neben den Versuchsträgern mit derselben Ausrichtung wie die Versuchsträger installiert. Alle Zeitangaben im Rahmen dieses Kapitels sind als Mitteleuropäische Zeit (MEZ) angegeben.

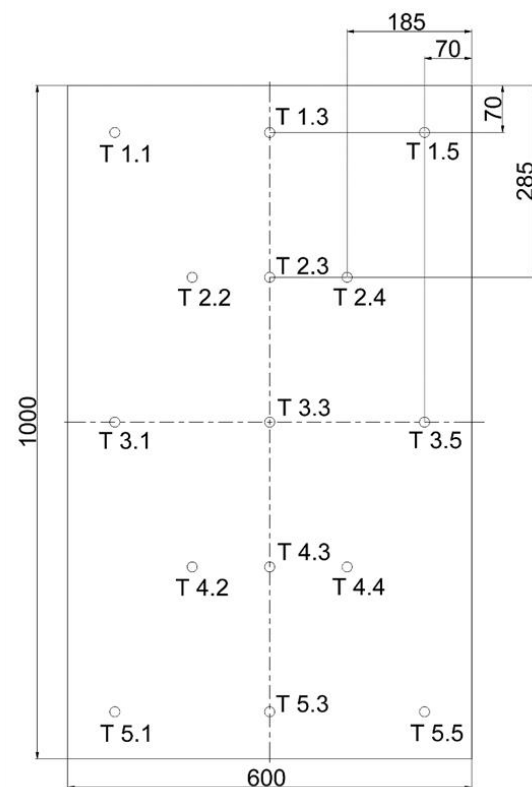


Abbildung 13. Versuchsträger ohne TWD-Strukturen (links) und Anordnung der Temperatursensoren auf der Rückseite des Absorberblechs eines Versuchsträgers bzw. geometrische Abmessungen des Absorberblechs in der Einheit mm (rechts)

Zur Bestimmung der Oberflächentemperatur sind sogenannte Mikrochip-Temperatursensoren des Typs DS18B20 der Firma Maxim Integrated auf der Rückseite des Absorberblechs angebracht. Durch einen Vergleich der Temperatursensoren mit einem Referenztemperatursensor konnte deren maximale Abweichung für den Messbereich von -20 °C bis 120 °C von $\pm 0,5\text{ K}$ nach Herstellerangaben auf $\pm 0,1\text{ K}$ verbessert werden. Die Position der Temperatursensoren (T1.1 bis T5.5) auf der Rückseite des Absorberblechs zeigt Abbildung 13. Die Temperaturmesswerte der Mikrochip-Temperatursensoren werden mit einem Mikrocontroller erfasst. Die mit einem Pyranometer gemessene

Solarstrahlungsleistung in der TWD-Ebene bzw. die Umgebungslufttemperatur werden mit einem Digitalmultimeter mit Messstellungumschaltung erfasst. Eine Übersicht der bei der Exposition verwendeten Messsensoren gibt Tabelle 4.

Tabelle 4. Erläuterung relevanter Messsensoren bei der Außenexposition bzw. an den Versuchsträgern

Art des Messung	Anzahl	max. Abweichung	Ort
Mikrochip-Temperatursensoren	15	$\Delta\vartheta = \pm 0,1 \text{ K}$	Angeklebt auf der Rückseite des Absorberblechs
Messung der Umgebungslufttemperatur (Pt100)	1	$\Delta\vartheta = \pm 0,4 \text{ K}$	Strahlungsgeschützte Umgebungslufttemperaturmessung bei der Exposition
Pyranometer	1	$\Delta\dot{G}/\dot{G} = \pm 1,5 \% ^1$	Ausrichtung und Neigung entsprechend der Versuchsträger

¹ gilt für Strahlungsleistungen bei 500 W/m²

5.3 Messergebnisse unterschiedlicher TWD-Strukturen

Im Folgenden werden Messdaten einzelner Tagesverläufe vorgestellt, die repräsentativ für die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens erzeugte große Anzahl an Messergebnissen sind. Die TWD-Strukturen nach Tabelle 2 wurden mit den in Kapitel 5.2 beschriebenen Versuchsträgern experimentell untersucht. Neben dem direkten Vergleich der Oberflächentemperaturen der Absorber bei Verwendung unterschiedlicher TWD-Strukturen werden auch der Einfluss von Randeffekten auf die Oberflächentemperaturverteilung, die Beständigkeit der Materialien und exemplarisch der Luftspalteinfluss bei einer absorberparallelen Struktur betrachtet. Zunächst werden die durchgeführten Referenzmessungen erläutert.

5.3.1 Referenzmessung

Die Temperaturmessung aller fünf Versuchsträger wurden zum Ausschluss von relevanten baulichen Unterschieden zunächst ohne TWD-Strukturen verglichen. In Abbildung 14 sind die Oberflächentemperaturen der Versuchsträger, repräsentiert durch den mittleren Sensor T3.3, die hemisphärische Gesamtstrahlung in der Versuchsträgerebene und die Umgebungslufttemperatur über der Uhrzeit im Tagesverlauf dargestellt. Es lässt sich erkennen, dass die Oberflächentemperatur aller Versuchsträger bzw. das thermische Verhalten der Versuchsträger auch bei unterschiedlicher solarer Einstrahlung im Rahmen der Messgenauigkeit eine gute Übereinstimmung aufweist. Dies gilt jedoch nicht für den Zeitraum ab 15.30 Uhr, da hier bei einzelnen Versuchsträgern gebäudebedingte Teilverschattungen auftreten. Wird dieser Bereich von 15.30 Uhr bis 17.30 Uhr vernachlässigt, beträgt die Temperaturdifferenz der Sensoren T3.3 aller Versuchsträger über den gesamten verbleibenden Tagesverlauf maximal 3,5 K. Diese lässt sich auf bauliche Unterschiede in den Versuchsträgern und lokal unterschiedliche Umgebungsbedingungen, z. B. der Windgeschwindigkeit, zurückführen. Die Abweichung der Temperaturmessung der Versuchsträger untereinander wird als vernachlässigbar angesehen.

Abbildung 14 zeigt ebenfalls ansatzweise, dass die gemessenen Oberflächentemperaturen der Versuchsträger in Zeiten ohne solare Einstrahlung z. T. niedriger als die Umgebungslufttemperatur sind. Ab ca. 18.30 Uhr fallen die Temperaturen der Sensoren T3.3 der Versuchsträger unter die Umgebungslufttemperatur, was jedoch in Abbildung 14 nicht dargestellt ist. Für den Bereich von 00.00 Uhr bis 07.00 Uhr liegt eine Abweichung der über die Zeit und über alle Versuchsträger gemittelte Temperatur T3.3 zur Umgebungslufttemperatur von 2,6 K vor.

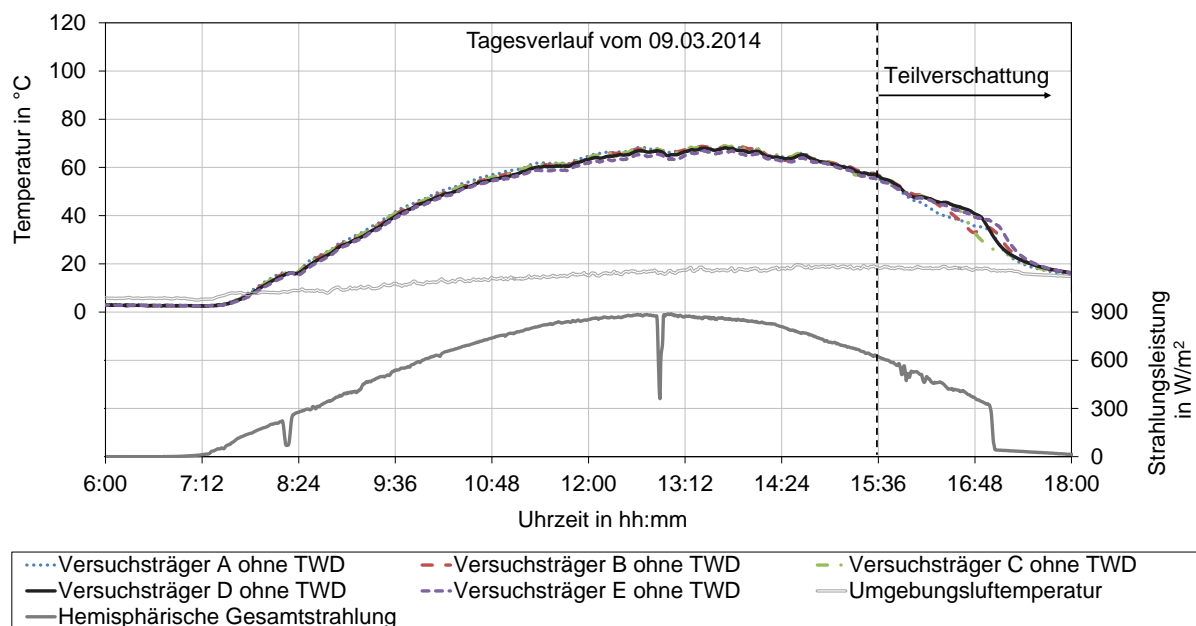


Abbildung 14. Referenzmessung an den Versuchsträgern ohne TWD

Die Beobachtung, dass die Absorber-Oberflächentemperatur in Zeiten fehlender solarer Einstrahlung unter die Umgebungslufttemperatur fällt, lässt sich auf den Strahlungsaustausch der nicht abgedeckten Absorberoberfläche mit dem kalten Himmel zurückführen. Es ist zu erwarten, dass sowohl konvektive Luftströmungen an den Versuchsträgern als auch die Anwendung der TWD diese Temperaturdifferenz reduzieren.

5.3.2 Vergleichsmessung unterschiedlicher TWD-Strukturen

Um einen Vergleich der in Tabelle 2 vorgestellten TWD-Strukturen hinsichtlich der erreichbaren Oberflächentemperaturen des Absorberblechs zu ermöglichen, wurden diese in zwei getrennten Versuchsreihen untersucht. Die Absorberblech-Temperatur (Sensor T3.3), die hemisphärische Gesamtstrahlung und die Umgebungslufttemperatur dieser Vergleichsmessungen sind für einen exemplarischen Tagesverlauf in Abbildung 15 und Abbildung 16 dargestellt. Ein direkter Vergleich der beiden Versuchsreihen ist für den Versuchsträger A ohne TWD bzw. die in beiden Versuchsreihen untersuchte Glasscheibe möglich. Im direkten Vergleich aller transparenten Wärmedämmungen zeigen die Wabenlochplatte und die Kapillarplatte mit ähnlich hohen Absorberblech-Temperaturen die besten Ergebnisse, gefolgt von Glasscheibe und Doppelstegplatte mit ebenfalls ähnlichen

Absorberblech-Temperaturen. Im Vergleich zur Glasscheibe zeigt die Glasfasermatte niedrigere Absorberblech-Temperaturen. Bei der Bewertung der maximal erreichten Absorberblech-Temperaturen ist zu beachten, dass die Versuchsträger senkrecht aufgestellt sind und daher nicht der maximal möglichen Strahlungsleistung ausgesetzt sind. Bei höheren solaren Strahlungsleistungen, die sich z. B. bei anderen Einstrahlwinkeln ergeben würden, sind auch höhere Absorbertemperaturen zu erwarten.

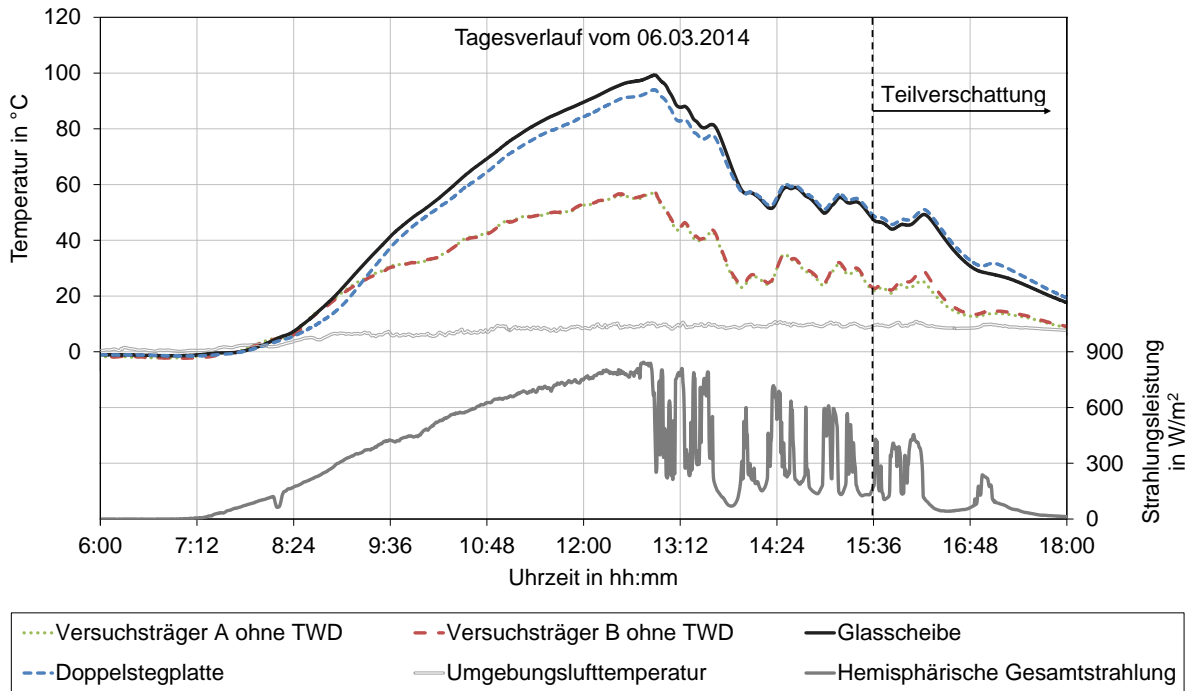


Abbildung 15. Vergleichsmessung verschiedener TWD-Strukturen (Teil 1)

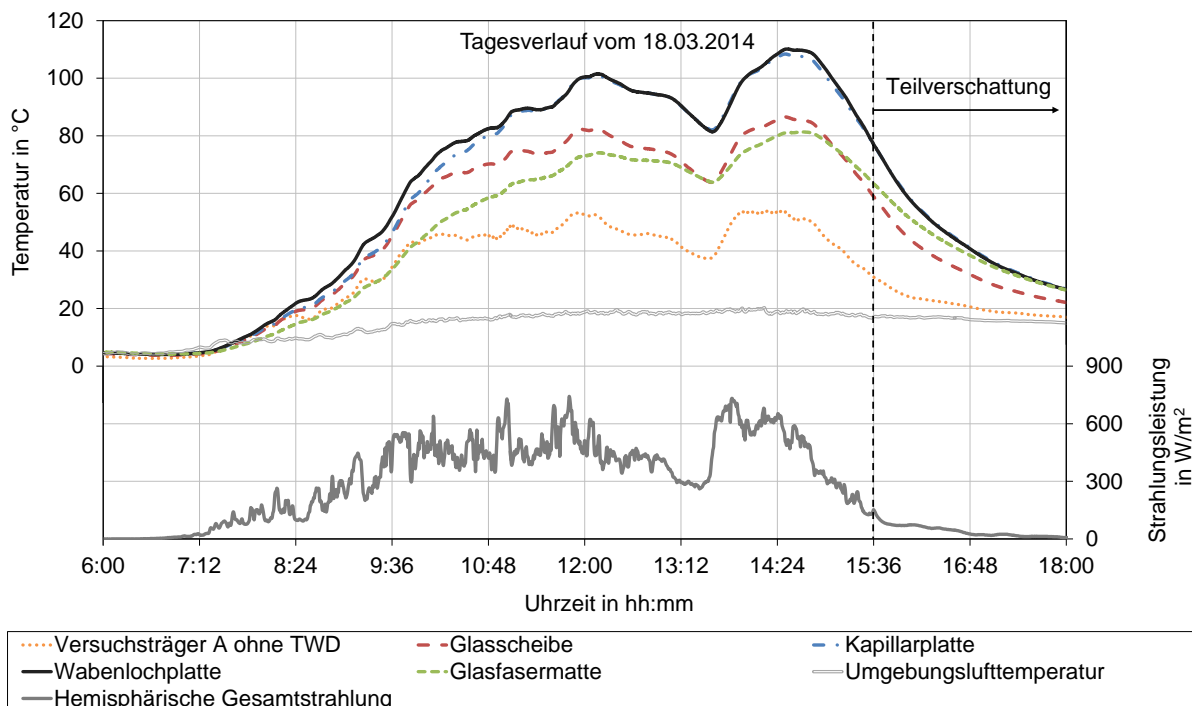


Abbildung 16. Vergleichsmessung verschiedener TWD-Strukturen (Teil 2)

Aus Abbildung 15 und Abbildung 16 wird ebenfalls deutlich, dass die Absorberblech-Temperatur im Wesentlichen von der solaren Einstrahlung abhängt. Ein Einfluss der Umgebungslufttemperatur auf die Wärmeverluste des Versuchsträgers und damit indirekt auf die Temperatur des Absorberblechs kann aufgrund einer fehlenden Umgebungslufttemperaturvariation bei vergleichbaren Einstrahlungsbedingungen nicht identifiziert werden. Es ist jedoch offensichtlich, dass mit abnehmender Umgebungslufttemperatur bzw. zunehmender Temperaturdifferenz zwischen Absorberblech und Umgebungsluft, die Wärmeverluste über die TWD zunehmen und deshalb die Temperatur des Absorberblechs sinkt.

Wie bereits erläutert, wurden die hier untersuchten TWD-Strukturen im Hinblick auf die späteren Einbaubedingungen (gekrümmte Speicher Oberfläche) und ihre kommerzielle Verfügbarkeit ausgewählt. Es ist daher anzunehmen, dass die optimalen geometrischen Abmessungen (z. B. die Dicke der TWD oder die Luftspaltbreite) für den Anwendungsfall eines außenaufgestellten Warmwasserspeichers noch nicht vorliegen. Es ist z. B. bekannt, dass die Luftspaltbreite bei absorberparallelen TWD-Strukturen einen entscheidenden Einfluss auf den Wärmedurchgangskoeffizienten bzw. die Wärmeverluste und damit auch auf die erreichbare Absorbertemperatur haben kann. /Duf06/

Um diese Vermutung exemplarisch für eine absorberparallele TWD-Struktur zu untersuchen, wurde die TWD Glasscheibe mit drei unterschiedlichen Luftspaltbreiten mit Hilfe der Versuchsträger verglichen. Die hier betrachteten Glasscheiben sind identisch und besitzen die gleichen Eigenschaften wie die in Tabelle 2 beschriebene Glasscheibe, mit der Ausnahme der Scheibendicke. Diese beträgt 1,3 mm für die TWD-Struktur in dieser Untersuchung. In Abbildung 17 wird daher der Namenszusatz (1.3) für die Glasscheibe verwendet.

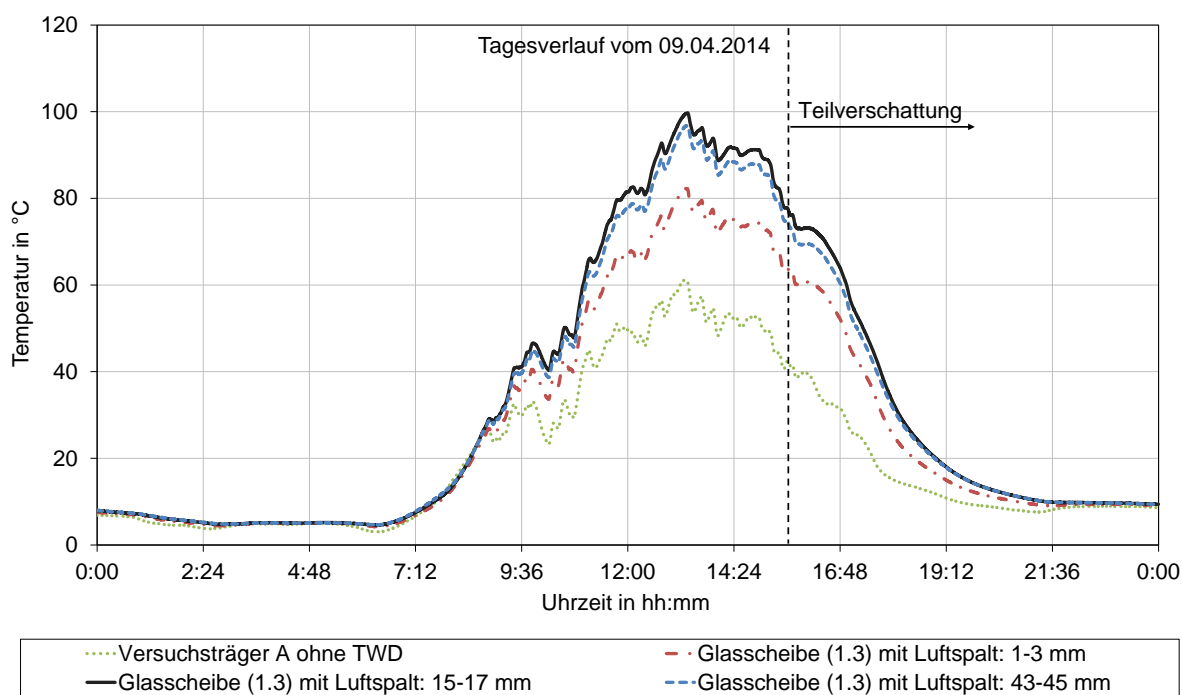


Abbildung 17. Untersuchung des Einflusses der Breite des Luftspalts zwischen dem Absorberblech des Versuchsträgers und der Glasscheibe (1.3) als TWD-Struktur

Die unterschiedlichen Luftspaltbreiten zwischen Absorberblech und Glasscheibe wurden durch mehrere übereinander angebrachte Holzrahmen eingestellt. Die Befestigung der Glasscheibe erfolgte durch eine Verklebung, wodurch ein Austausch der aufgeheizten Luft zwischen Absorber und Glasscheibe mit der Umgebungsluft weitestgehend unterbunden werden konnte. In Abbildung 17 sind die Absorberrtemperaturen (Sensor T3.3) der Versuchsträger bei unterschiedlichen Luftspaltbreiten zwischen Glasscheibe und Absorberblech für einen Tagesverlauf dargestellt. Beim Vergleich der untersuchten Luftspaltbreiten wird deutlich, dass bei einem Luftspalt von 15 – 17 mm die höchsten Absorberblech-Temperaturen erreicht werden. Eine mögliche Erklärung für diesen Sachverhalt erläutert /Duf06/. Beginnend bei sehr kleinen Luftspaltbreiten führt eine Vergrößerung des Luftspalts zunächst zu einer verbesserten Wärmedämmwirkung der stehenden Luftschicht und damit zu höheren Temperaturen am Absorberblech. Wird eine kritische Luftspaltbreite erreicht, tritt neben der Wärmeleitung der Luft im Zwischenraum und dem Strahlungsaustausch zwischen Absorberblech-Oberfläche und Glasscheibe ein relevanter konvektiver Wärmetransport auf, welcher zu erhöhten Wärmeverlusten und damit zu einer Abnahme der Absorberrtemperatur führt. Durch eine weitere Vergrößerung des Luftspalts nimmt die wärmedämmende Wirkung der Luftschicht wieder zu und es tritt eine erneute Verringerung der Wärmeverluste auf. Dieser Sachverhalt erklärt die höchste gemessene Absorberrtemperatur bei der Spaltbreite von 15 – 17 mm im Vergleich zu den anderen untersuchten Spaltbreiten.

5.3.3 Messung zur Oberflächentemperaturverteilung des Absorberblechs

In den vorangegangenen Abschnitten wurden ausschließlich Messwerte des in der Mitte des Versuchsträgers platzierten Temperatursensors T3.3 dargestellt, obwohl aufgrund der endlichen geometrischen Ausdehnung der Versuchsträger Randeffekte durch Wärmeverluste zu erwarten sind. Neben den Randeffekten wird besonders bei Versuchsträgern mit absorberparallelen TWD-Strukturen ein Einfluss durch eine vertikale Temperaturverteilung bzw. Temperaturschichtung im Luftspalt aufgrund der senkrechten Exposition erwartet. Es wird angenommen, dass dieses Phänomen bei einem Versuchsträger ohne TWD durch die ungehinderte freie Konvektion nicht oder nur abgeschwächt auftritt.

Um einen möglichen Temperaturgradienten im Randbereich der Versuchsträger bewerten zu können, sind in Abbildung 18 für einen Versuchsträger ohne TWD und einen Versuchsträger mit TWD Glasscheibe die Absorberblech-Temperaturen der Sensoren T1.3, T2.3, T3.3, T4.3 und T5.3 für einen Aufheizvorgang im Tagesverlauf dargestellt.

Vergleicht man die maximalen Temperaturdifferenzen der Oberflächentemperaturen des Versuchsträgers mit der TWD Glasscheibe und des Versuchsträgers ohne TWD, zeigt sich eine kleinere Differenz beim Versuchsträger ohne TWD als mit TWD. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass die Temperaturen des Versuchsträgers ohne TWD insgesamt deutlich geringer sind. Ursächlich für die große Inhomogenität der Oberflächentemperaturen beim Versuchsträger mit TWD ist der Sachverhalt, dass mit Hilfe der TWD höhere Absorberrtemperaturen erreicht werden, wodurch die Wärmeverluste über die Seitenflächen

der Versuchsträger und damit der vorliegende Temperaturgradient am Absorber vergrößert wird. Beim Versuchsträger ohne TWD stellt sich im Zentrum des Absorberblechs die höchste Temperatur ein, da hier die Wärmeverluste über die Seitenflächen den geringsten Einfluss ausüben. Beim Versuchsträger mit der Glasscheibe als TWD zeigt der Sensor T2.3 die größte Temperatur, wobei die Temperaturdifferenz zum Sensor T3.3 gering ist. Dieser Sachverhalt kann auf die sich einstellende Temperaturschichtung im Luftspalt zwischen Glasscheibe und Absorber und den damit einhergehenden Einfluss auf die Temperaturverteilung des Absorbers im Vergleich zum Versuchsträger ohne TWD zurückgeführt werden.

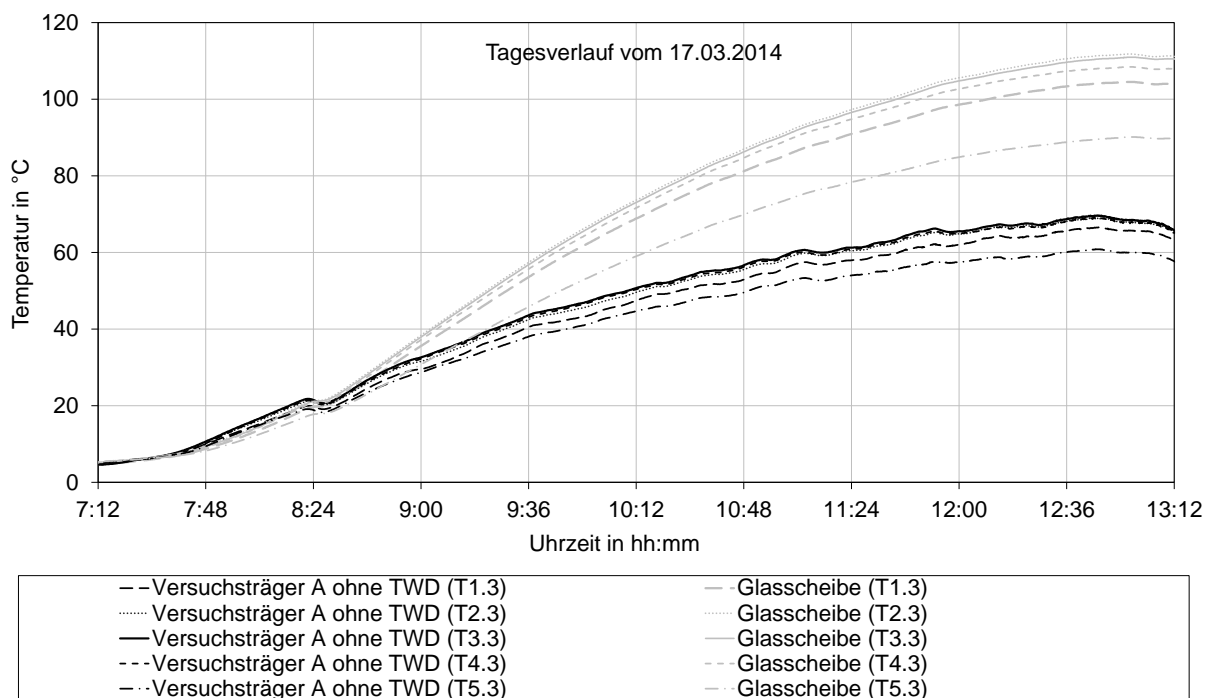


Abbildung 18. Oberflächentemperaturverteilung (Temperatursensoren T1.3, T2.3, T3.3, T4.3 und T5.3) an einem Versuchsträger ohne TWD-Struktur und einem Versuchsträger mit der TWD-Struktur Glasscheibe (inkl. Luftspalt)

Betrachtet man ausschließlich die Sensoren nahe der Mitte (T2.3, T3.3 und T4.3), so tritt in vertikaler Richtung nur eine geringe und für die hier vorgestellten Betrachtungen zu vernachlässigende Temperaturdifferenz bei den Versuchsträgern auf.

5.3.4 Beständigkeit der TWD-Materialien

Nach der Exposition der transparenten Wärmedämmungen über mehrere Tage wurden diese auf irreversible Material- und Formveränderungen untersucht. Die Kapillarplatte zeigt eine dauerhafte wellenförmige Verformung. Die maximale Amplitude der Auslenkung aus der ebenen Grundstruktur beträgt bis zu ca. 12 mm. Auf der dem Absorberblech zugewandten Seite wurde die Kapillarplatte aufgrund von Schmelzvorgängen zerstört. Die Wabenlochplatte zeigt eine lokale, dauerhafte Verformung innerhalb der Wabenlochstruktur, wobei die ebene Grundgeometrie erhalten blieb. Auf der vom

Absorberblech abgewandten Seite trat eine lokale Trübung des Materials auf. Die dauerhaften Veränderungen beider TWD-Strukturen lassen sich darauf zurückführen, dass bei den TWD-Strukturen während der Exposition die maximal zulässigen Arbeitstemperaturen (s. Tabelle 3) deutlich überschritten wurden. An den weiteren untersuchten TWD-Strukturen konnten keine dauerhaften Veränderungen festgestellt werden.

Während der Exposition konnte bei hoher Strahlungsleistung an der Doppelstegplatte eine reversible Verformung beobachtet werden. Die im Einbauzustand ebene Platte bildete eine konkave Verformung, wobei der Luftspalt zum Absorberblech hin verringert wurde. Die Fluorpolymer-Schutzfolie zeigte bei ausreichender solarer Strahlungsleistung ebenfalls eine reversible thermische Ausdehnung in Form einer Wellenbildung. Nach der Abkühlung stellte sich jedoch bei beiden Materialien wieder der Ausgangszustand ein.

5.4 Zusammenfassung

Werden die erreichten Absorberblech-Temperaturen der untersuchten transparenten Wärmedämmungen im Vergleich zu den Versuchsträgern ohne TWD betrachtet, kann bereits ab solaren Strahlungsleistungen von 300 W/m^2 bis 400 W/m^2 in der Absorberblech-Ebene eine deutliche Erhöhung der Oberflächentemperatur gegenüber der Umgebungslufttemperatur unabhängig von der TWD-Struktur beobachtet werden. Im Hinblick auf die maximal erreichbare Absorberblech-Temperatur in Abhängigkeit von der solaren Einstrahlung zeigen Kapillar- und Wabenlochplatten die besten Ergebnisse, wobei jedoch Beständigkeitsprobleme der Materialien identifiziert wurden.

Für die TWD-Struktur Glas wurde hinsichtlich der Luftspaltbreite eine anwendungsspezifische Untersuchung durchgeführt. Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse wird jedoch vermutet, dass eine weitere Detailuntersuchung der Luftspaltbreite keinen entscheidenden Einfluss auf die letztlich erreichbaren maximalen Absorberrtemperaturen hat. Es konnte gezeigt werden, dass die vermuteten Randeffekte am Versuchsträger durch Wärmeverluste bzw. die Temperaturschichtung im Luftspalt bei der TWD Glasscheibe auf den für die Absorberblech-Temperatur repräsentativen Sensor T3.3 keinen relevanten Einfluss ausübt. Wird die TWD in einer späteren Anwendung über größere Höhen angebracht, kann der Einfluss der Temperaturschichtung im Luftspalt jedoch verstärkt auftreten. Für die spätere Anbringung der TWD an einen zylindrischen Warmwasserspeicher lassen flexible Strukturen wie das Glasfasergespinnst, die Kapillarplatte und die Wabenlochplatte Konstruktions- und Montagevorteile erwarten, jedoch sind zur Anwendung dieser Strukturen Schutzfolien notwendig, die im Betrieb aufgrund möglicher thermischer Längenänderungen ggf. eine Nachspanneinrichtung notwendig machen. Selbsttragende TWD-Strukturen wie Doppelstegplatten und Glasscheiben erfordern eine vergleichsweise aufwendige Montagevorrichtung und reversible Verformungen müssen im Hinblick auf die Einbaubedingungen beachtet werden. Unter Berücksichtigung der Erkenntnisse zur thermischen Leistungsfähigkeit der TWD-Materialien und unter Beachtung der Marktrecherche im Besonderen hinsichtlich von Beständigkeits- und Montageaspekten wird für das Funktionsmuster zur Außenaufstellung Glas als die TWD-Struktur gewählt.

6 Technologieentwicklung Schichtbe- und Entladeeinrichtung

Schichtbe- und Entladeeinrichtungen (SBE) in Warmwasserspeichern (WWS) werden besonders im Bereich solarthermischer Anwendungen mit dem Ziel der Erzeugung und dem Erhalt einer thermischen Schichtung eingesetzt. Dort bieten sie Vorteile hinsichtlich der Effizienz der Gesamtanlage /Göp09/. Für die direkte Beladung eines WWS können aktive und passive Schichtbe- und Entladeeinrichtungen mit fester und variabler Eintrittshöhe in den WWS unterschieden werden.

Bei **aktiven SBE** wird die Temperaturverteilung im Speicherfluid des WWS messtechnisch erfasst und die bezüglich der Vorlauftemperatur geregelt bzw. aktive SBE entscheidet, über welche Eintrittsöffnung das Beladefluid dem WWS zugeführt wird.

Bei **passiven SBE** erfolgt die Auswahl der Eintrittsöffnung durch die SBE ohne messtechnische Erfassung der Temperaturschichtung im Warmwasserspeicher. Einen umfangreichen Überblick über die im Bereich solarthermischer Anwendungen eingesetzten SBE gibt /Göp09/.

Eine geeignete Schichtbe- und Entladeeinrichtung soll am Funktionsmuster des außenaufgestellten WWS (siehe Kapitel 9.3) zur Erzeugung und zum Erhalt einer thermischen Schichtung bei der Beladung bzw. zur geschichteten Entladung eingesetzt werden. Die Untersuchung der Eignung von ausgewählten bzw. am Markt verfügbaren SBE für den thermisch geschichteten Betrieb eines WWS hinsichtlich der Fähigkeit zur thermisch geschichteten Be- und Entladung und Adaptierbarkeit an unterschiedliche Betriebsbedingungen wie z.B. Beladetemperatur und Volumenstrom ist Gegenstand des folgenden Kapitels. Hierzu wurde eine Marktrecherche durchgeführt und mehrere SBE in einem transparenten WWS im Labormaßstab experimentell untersucht. Die vielversprechendste SBE wurde identifiziert und für ein Funktionsmuster im Realmaßstab adaptiert.

6.1 Stand der Technik und Marktrecherche

Eine Recherche hat ergeben, dass nur wenige kommerziell verfügbare und modular an verschiedene Betriebsbedingungen adaptierbare SBE für Warmwasserspeicher am Markt angeboten werden. Häufig sind die bei den Hersteller von Warmwasserspeichern eingesetzten SBE Eigenentwicklungen und daher nur bedingt für einen kommerziellen Vertrieb ohne zugehörigen WWS vorgesehen. Eine Auswahl identifizierter Schichtbe- und Entladeeinrichtungen, welche die Voraussetzung einer einfachen Erweiterbarkeit erfüllen und in erster Annahme keine Einschränkungen bezüglich der WWS-Geometrie besitzen, ist in Tabelle 5 aufgelistet. Weiterhin werden in Tabelle 5 die SBE nach den Kategorien Typ, Auslasshöhe, Vorhandensein beweglicher Komponenten und Möglichkeit zur geschichteten Entladung charakterisiert. In der Regel sind passive SBE für großvolumige WWS Einzelanfertigungen, die für bestimmte Betriebsbedingungen des WWS ausgelegt sind und

Planungsleistungen zur Auslegung erfordern. Dieser Aspekt erschwert die einfache Adaption solcher SBE an andere Betriebsbedingungen.

Ebenfalls wurde bei der Marktrecherche festgestellt, dass bei SBE für WWS mit großen Höhen z. T. keine Überprüfung der Funktionsfähigkeit vorliegt bzw. nicht öffentlich zugänglich ist. Ausnahmen hiervon bilden in den letzten Jahren angestoßenen Entwicklungen von SBE einiger Forschungseinrichtungen, die z. T. in Kooperation mit WWS-Herstellern durchgeführt wurden, wie z.B. /Bei13/, /Göp09/ und /May13/.

Tabelle 5. Kommerziell erhältliche Schichtbe- und Entladeeinrichtungen

Hersteller	Typ	Auslasshöhe	Komponenten	Entladung	Quelle
EyeCular Technologies	passiv	variabel	fest	nicht geschichtet	/Eye16/
Nitsch-Regelungstechnik	aktiv	fest	fest	z. T. geschichtet	/Nit16/
Pink GmbH	aktiv	variabel	z. T. beweglich	geschichtet	/Pin16/

Eine Skalierung von SBE auf kleinere Abmessungen vereinfacht i. d. R. die Untersuchung solcher Einrichtungen bzw. ist für den Test von SBE für große WWS meist unumgänglich. Es wird eine auf physikalischen Ähnlichkeits-Kennzahlen basierende Skalierung der Prüfergebnisse notwendig, wenn das ermittelte Beladeverhalten auf andere Abmessungen der SBE übertragen werden soll. Die dabei benötigten Skalierungsvorschriften orientieren sich an den gewünschten Ähnlichkeiten zwischen verkleinertem und realem Maßstab, z. B. der Unterdrückung von Ansaugeffekten in der SBE. Die Anwendung von Skalierungsvorschriften für die Entwicklung einer passiven SBE eines Warmwasserspeichers wird beispielsweise in /Bei13/ gezeigt. Zum Teil können nicht alle Ähnlichkeitsbeziehungen beim Skalieren der Geometrie einer SBE eingehalten werden, weshalb die Annahme eines ähnlichen Belade- und Entladeverhalten einer SBE zwischen Modell- und Realmaßstab ggf. nur eingeschränkt möglich ist. /Göp09/, /Bei13/

Unter Berücksichtigung der vorab erläuterten Erkenntnisse bzw. den Anforderungen einer geschichteten Be- und Entladung und einer einfachen Adaptierbarkeit an veränderte Betriebsbedingungen wurde im Rahmen des Forschungsprojektes beschlossen, eine neue SBE zu entwickeln. Es soll bei dieser Entwicklung eine kommerziell verfügbare, aktive SBE und eine neu entwickelte, passiven SBE kombiniert werden. Die passive SBE dient dazu, das Beladefluid auch zwischen den diskreten Eintrittshöhen der aktiven SBE entsprechend der vorliegenden Temperaturverteilung einer thermischen Schichtung des Speicherfluids einbringen zu können.

Die Wahl für eine aktive SBE fiel auf das Produkt „Exergie-Manager“ der Fa. Nitsch-Regelungstechnik /Nit16/, da diese grundsätzlich eine geschichtete Entladung ermöglicht und keine bewegten Bauteile innerhalb des WWS notwendig sind. Ein Funktionstest dieser SBE erfolgte an einem WWS mit einem Wasservolumen von 1,5 m³ (siehe Kapitel 6).

Um über eine für diesen Anwendungsfall geeignete passive SBE zu verfügen, wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eine neue passive SBE entwickelt und diese vergleichend zu bekannten SBE experimentell untersucht (siehe Kapitel 6.3). Die Entscheidung zur Entwicklung einer neuen passiven SBE war der Tatsache geschuldet, dass kaum am Markt verfügbare passive SBE identifiziert werden konnten, die einfach skalierbar bzw. modular erweiterbar waren. Die dabei angewandte Untersuchungsmethodik zur Bewertung der neu entwickelten passiven SBE wird in Kapitel 6.2 erläutert. In Kapitel 6.4 wird das Gesamtkonzept der Kombination einer aktiven und passiven SBE vorgestellt. Die in Kapitel 6.3 untersuchten Einströmvorrichtungen mit fester Auslasshöhe sind die Beladelanze (BL) und der Plattenbelader (PB), siehe Abbildung 19.

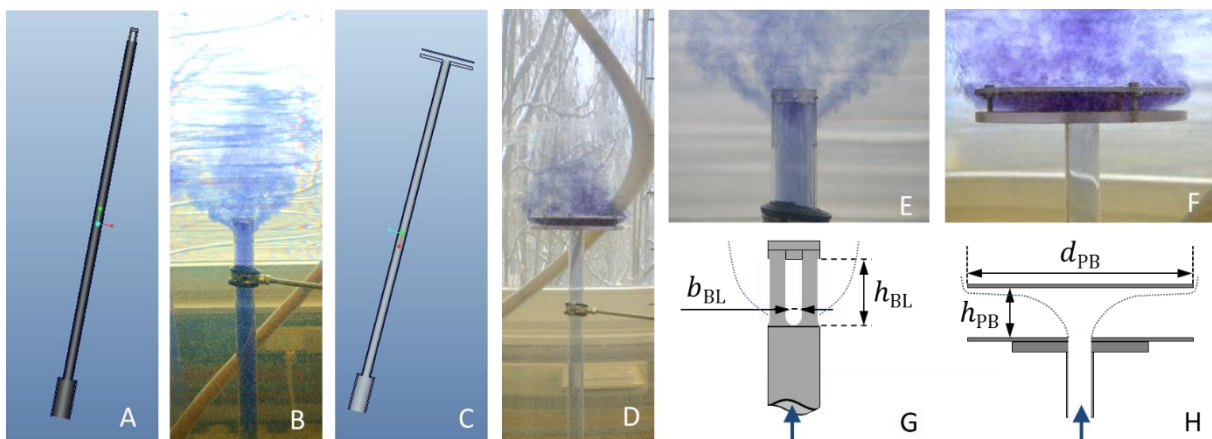


Abbildung 19. Untersuchte Einströmvorrichtungen mit fester Auslasshöhe; CAD-Zeichnung Beladelanze (A), Fotos der Beladelanze (B+E), CAD-Zeichnung Plattenbelader (C), Fotos des Plattenbelader (D+F), schematisch dargestellte Beladelanze (G), schematisch dargestellter Plattenbelader (H).

Die neu entwickelte passive Schichtbe- und Entladeeinrichtung wird Lamellenlader (LL) genannt und ist in Abbildung 20 dargestellt. Das Funktionsprinzip des Lamellenladers beruht, wie bei allen passiven SBE, auf der temperaturabhängigen Dichte des Belade- und Speicherfluids. Das Beladefluid tritt über das Eintrittsrohr in den untersten Rückstauraum und füllt diesen, bis die untere Kante des Lamellenpakets erreicht wird. Besitzt das Beladefluid dort eine Temperatur höher als die des umgebenden Speicherfluids, strömt das Beladefluid durch die vorherrschenden Auftriebskräfte (bedingt durch das Schwerfeld der Erde) zwischen den Lamellen in den darüber liegenden Rückstauraum. Dieser Vorgang wiederholt sich für die weiteren Lamellenpakete, solange die Beladefluidtemperatur am Lamellenpaketeintritt oberhalb der Temperatur des umgebenden Speicherfluids liegt, siehe Abbildung 20 (Teil C). Erreicht das Beladefluid ein Lamellenpaket bei dem die Temperatur

des umgebende Speicherfluids höher als die Beladefluidtemperatur ist, kann das Beladefluid über die offene Seitenwand in den Speicher einströmen. Je nach Volumenstrom wird ein oder werden mehrere Zwischenräume der Lamellenpakete durchströmt. Es werden im Folgenden zwei Varianten des Lamellenladers (Typ 1 und Typ 2) untersucht. Beide Typen besitzen die identische Höhe h_{LL} von 1800 mm, unterscheiden sich jedoch durch unterschiedliche Lamellenabstände $a_{Lamellen}$.

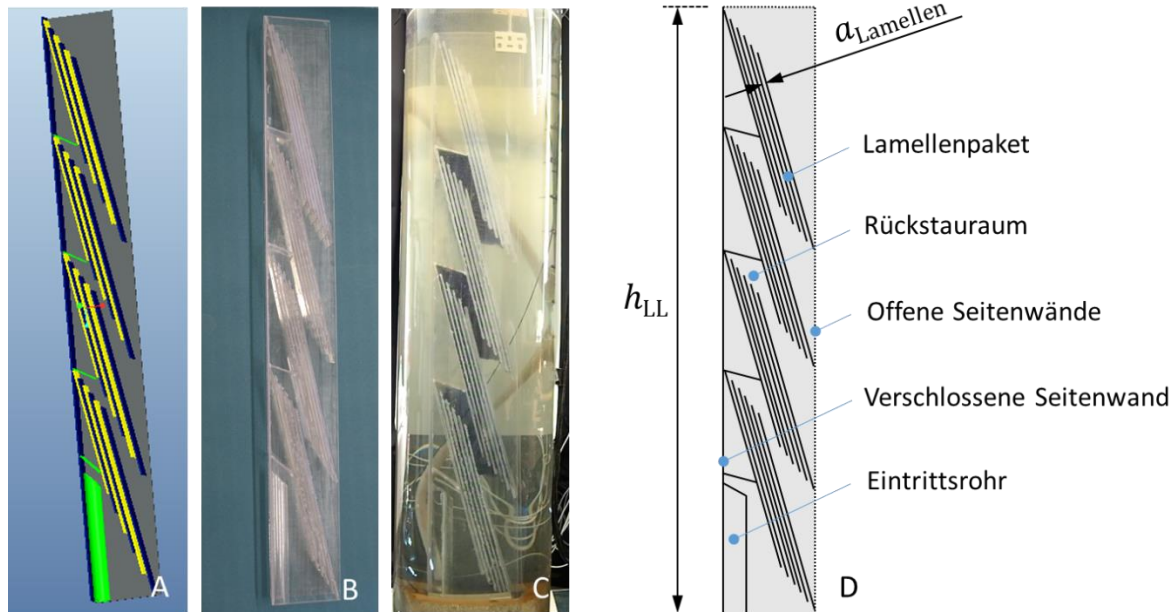


Abbildung 20. Untersuchte passive Schichtbe- und Entladeeinrichtung; CAD-Zeichnung Lamellenlader (A), Fotos der des Lamellenladers (B+C), schematisch dargestellter Lamellenlader (D)

6.2 Experimenteller Aufbau

Es ist bekannt, dass die Überprüfung der Funktion einer SBE anhand geeigneter Kenngrößen erfolgen kann, die während definierter Prüfsequenzen ermittelt werden /Bei13/, /Hal15/, /EN 12977-3:2012/, /EN 12977-4:2012/. Einen umfangreichen Überblick über vorhandene Bewertungskenngrößen dieser Art gibt /Hal09/. Weiterführende und an dieser Stelle nicht dargestellte Untersuchungen zeigen jedoch, dass die Bewertung von unterschiedlichen passiven SBE ausschließlich mit Hilfe von Kennzahlen nur bedingt Rückschlüsse auf lokale Fehlströmungen erlaubt /Bre15/, /Beß15/.

Eine weitere Untersuchungsmethode für SBE ist die Strömungsmarkierung bzw. Schlierenoptik. Dabei können besonders lokale Fehlströmungen innerhalb und im Nahbereich der SBE identifiziert werden. Auf die im Rahmen dieses Vorhaben angewandten Prüfsequenzen, welche an die Bedürfnisse der optischen Untersuchung und nicht an die einer möglichen parameterbasierten Kenngrößenbestimmung angepasst sind, wird im Folgenden näher eingegangen.

Der zu Beginn der Versuche auf eine nahe der Umgebungslufttemperatur konditionierte Versuchsspeicher wird in der sog. Beladesequenz mit Beladefluid, welches wärmer als die ursprüngliche Temperatur des Versuchsspeichers ist, beladen. Im Anschluss daran folgt die sog. Einschichtsequenz, bei welcher der teilbeladene Versuchsspeicher mit Beladefluid, welches in etwa auf eine Mitteltemperatur zwischen der ursprünglichen Temperatur des Versuchsspeichers und der maximalen Beladefluidtemperatur der Beladesequenz temperiert ist, beladen. Während der Sequenzen kann das Beladefluid mit Lebensmittelfarbe markiert werden.

Um die Untersuchungsmethode der Strömungsmarkierung bzw. Schlierenoptik für die im Kapitel 6.1 vorgestellten passiven SBE anwenden zu können, wurde sowohl ein neuer WWS-Versuchsstand mit transparentem Versuchsspeicher (siehe Abbildung 21) aufgebaut, als auch alle untersuchten passiven SBE in einem transparenten Material gefertigt. Die verwendeten Messsensoren am Versuchsstand sind in Tabelle 6 zusammengefasst. Alle Messsensoren werden mit einem Digitalmultimeter mit Messstellungumschaltung erfasst.

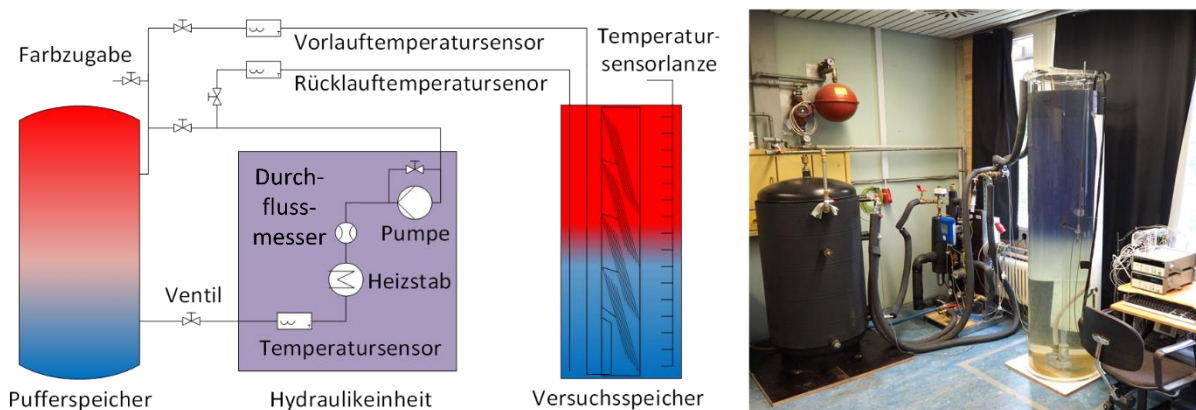


Abbildung 21. Schematisch dargestellter Versuchsstand zur Visualisierung von Strömungen innerhalb und außerhalb einer SBE mit Hilfe der Methode der Strömungsmarkierung mittels Farbe (links); Foto des Versuchsstandes (rechts)

Auf die Anwendung des optischen Verfahrens Particle Image Velocimetry (PIV) zur Strömungsvisualisierung wurde verzichtet, da die Zielstellung der Identifikation und Bewertung von lokalen Strömungsphänomenen in und um die passiven SBE vollumfänglich mit der Methode der farblichen Strömungsmarkierung bzw. Schlierenoptik erreicht werden konnte. Darüber hinaus ermöglichte der reduzierte Sicherheitstechnik- und Messtechnikbedarf, dass deutlich mehr Messungen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen, wie z. B. unterschiedliche Volumenströme und Vorlauftemperaturen, durchgeführt werden konnten.

Tabelle 6. Erläuterung relevanter Messsensoren am transparenten Versuchsspeicher

Art des Messung	Anzahl	max. Abweichung	Ort
Lanze mit 15 Temperatursensoren im Versuchsspeicher (Pt100)	15	$\Delta\vartheta = \pm 0,35 \text{ K}$	Äquidistant verteilt über der Speicherhöhe (Abstand: 115 mm; Beginnend 200 mm über dem Speicherboden)
Temperaturmessung im Vor- und Rücklauf (Pt100)	je 1	$\Delta\vartheta = \pm 0,15 \text{ K}$	Außerhalb des Versuchsspeichers
Messung der Umgebungslufttemperatur (Pt1000)	1	$\Delta\vartheta = \pm 0,5$	Raumlufttemperaturmessung (strahlungsgeschützt)
Volumenstrom im hydraulischen Kreis (MID)	1	$\Delta\dot{V}/\dot{V} = \pm 5 \%$	Hydraulikeinheit im Rücklauf des Versuchsspeichers

6.3 Messergebnisse unterschiedlicher Schichtbe- und Entladeeinrichtungen

Die passive Schichtbe- und Entladeeinrichtungen Lamellenlader bzw. die Einströmvorrichtungen Beladelanze und Plattenbelader sind z. T. in mehreren baulichen Konfigurationen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen untersucht worden. Einen Überblick über die durchgeführten Versuchsreihen gibt Tabelle 7. Neben diesen Untersuchungen wurden für den Lamellenlader das Entladeverhalten, das instationäre Anlaufverhalten und das Auftreten von Ansaugeffekten mit Hilfe der Methode der farblichen Strömungsmarkierung näher betrachtet.

Im Folgenden werden nur ausgewählte Versuchsergebnisse dargestellt, welche jedoch die grundsätzlichen Ergebnisse und Erkenntnisse repräsentativ für alle durchgeführten Untersuchungen wiedergeben.

Tabelle 7. Überblick über die durchgeführten Versuchsreihen bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen der passiven Schichtbe- und Entladeeinrichtung Lamellenlader bzw. der Einströmvorrichtung Beladelanze und Plattenbelader

SBE bzw. Einströmvorrichtung	Sequenz	Betriebsbedingungen
Lamellenlader (Typ 1) ($a_{\text{Lamellen}} = 2 / 5 / 5 / 5 / 10 \text{ mm}$) ¹	Belade- und Einschichtsequenz	$\dot{V}_B = 75 \dots 200 \text{ l/h}$ (Schrittweite: 25 l/h); $\vartheta_B = 40 \text{ °C}$
Lamellenlader (Typ 2) ($a_{\text{Lamellen}} = 5 \text{ mm} = \text{konst.}$)	Belade- und Einschichtsequenz	$\dot{V}_B = 75 \dots 175 \text{ l/h}$ (Schrittweite: 25 l/h); $\vartheta_B = 40 / 50 \text{ °C}$
Plattenbelader ($d_{\text{PB}} = 150 / 250 \text{ mm}$, $h_{\text{PB}} = 15 / 25 / 40 \text{ mm}$)	Beladesequenz	$\dot{V}_B = 50 \dots 160 \text{ l/h}$ (Schrittweite: 10 l/h); $\vartheta_B = 40 / 50 / 60 \text{ °C}$
Beladelanze ($b_{\text{BL}} = 10 \text{ mm}$, $h_{\text{BL}} = 30 \text{ mm}$)	Beladesequenz	$\dot{V}_B = 50 \dots 200 \text{ l/h}$ (Schrittweite: 25 l/h); $\vartheta_B = 40 / 50 / 60 \text{ °C}$

¹ Lamellenabstände entsprechend Abbildung 20 von links nach rechts

6.3.1 Einströmvorrichtung mit fester Austrittshöhe

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse einer Beladesequenz für die Beladelanze exemplarisch dargestellt. Wie für diese Art von Einströmvorrichtung zu erwarten, findet oberhalb der

Einströmöffnung eine homogene Durchmischung des Speicherfluids mit dem wärmeren Beladefluid statt. Dieses Verhalten zeigt sich durch die über die Höhe annähernd konstante Temperatur des Fluides im Speicher, die sich mit zunehmendem Beladefluidvolumen der Vorlauf- bzw. Eintrittstemperatur des Beladefluids annähert. Der Rücklauf befindet sich am Boden des Versuchsspeichers, weshalb die durch die Beladung erzeugte Temperaturschichtung mit zunehmendem Beladefluidvolumen nach unten verschoben wird. Es ist zu erwarten, dass nach einer ausreichend langen Beladedauer, die in Abbildung 22 durch das dem Speicher zugeführte Beladevolumen repräsentiert wird, die obere Hälfte des Versuchsspeicher auf die Vorlauftemperatur erwärmt werden kann.

Ein ähnliches Beladeverhalten wie bei der Beladelanze wurde auch beim Plattenbelader festgestellt. Auf die Durchführung einer Einschichtsequenz mit der Beladelanze wurde verzichtet.

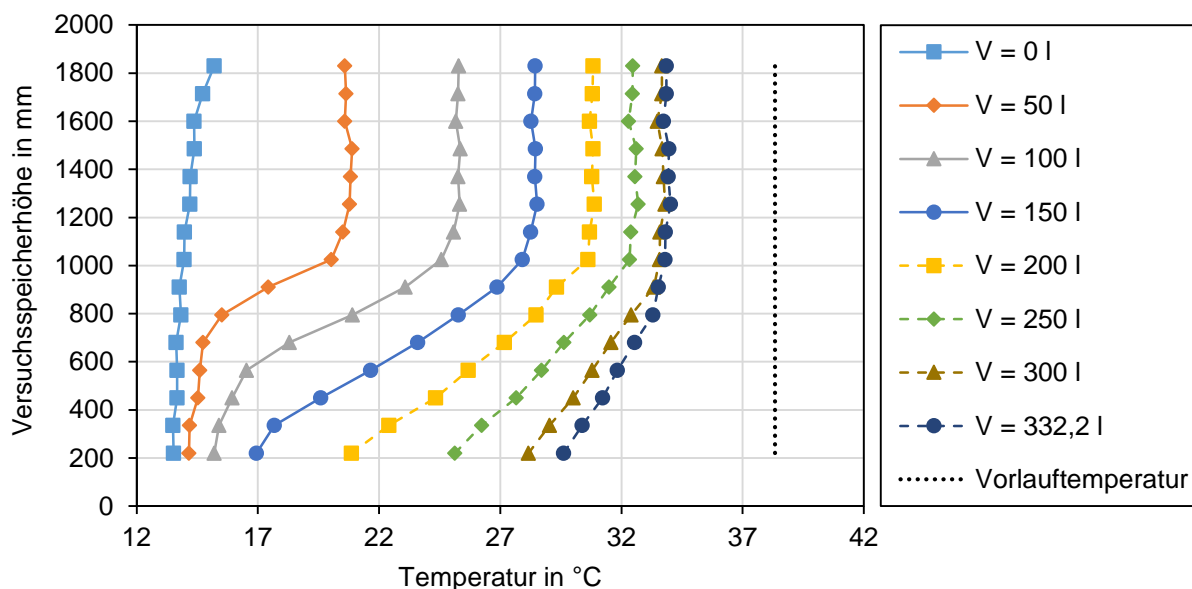


Abbildung 22. Beladesequenz mit der Beladelanze bei einem Volumenstrom von 150 l/h, einer Beladefluidtemperatur von 38 °C und einer mittleren ursprünglichen Speicherfluidtemperatur von 14 °C; dargestellt ist die auf der jeweiligen Höhe des Versuchsspeichers gemessene Temperatur bzw. die Vorlauftemperatur in Abhängigkeit des Beladefluidvolumens; Austrittsöffnungshöhe der Beladelanze im Versuchsspeicher 1000 mm

Mit Hilfe solcher Einströmvorrichtungen kann z.B. bei Vorhandensein einer Matched-Flow-Regelung⁷ einer thermischen Solaranlage und einer damit einhergehenden konstanten Vorlauftemperatur eine geschichtete Speicherbeladung zwischen der Höhe der Einströmöffnung und der Höhe des Rücklaufs ermöglicht werden. Bei einer nicht konstanten Vorlauftemperatur des Beladefluids kann jedoch keine Einschichtung entsprechend einer vorhandenen thermischen Schichtung des Speicherfluids vorgenommen werden.

⁷ Regelung des Durchflusses des Wärmeträgermediums im Solarkreislauf, z. B. durch Variation der Pumpendrehzahl

Eine Visualisierung der Einströmung mit Hilfe der Methode der Strömungsmarkierung bzw. Schlierenoptik für die Beladelanze und den Plattenbelader ($d_{PB} = 150 \text{ mm}$) zeigt Abbildung 81 in Anhang C. Eine optische Auswertung des Einströmverhaltens des Plattenbeladers und der Beladelanze für unterschiedliche Betriebsparameter (siehe Tabelle 7) ergab, dass beim Plattenbelader im Vergleich zur Beladelanze ein kleineres Vermischungsgebiet (in radialer Richtung) oberhalb der Einströmhöhe vorliegt. Dies bedingt durch die annähernd homogene Vermischung oberhalb der Eintrittshöhe während einer Beladesequenz keine Verbesserung beim Aufbau oder beim Erhalt einer thermischen Schichtung. Jedoch können u. U. bei einer wandnahen Positionierung der Einströmvorrichtung makroskopische Strömungsvorgänge durch eine Strömungsumlenkung an der Speicherwand reduziert werden.

Weiterhin konnte durch die Strömungsvisualisierung festgestellt werden, dass in Abhängigkeit des Plattenabstands h_{PB} (siehe Abbildung 19) bzw. des Beladevolumenstroms unterschiedlich stark ausgeprägte Rezirkulations- bzw. Totwassergebiete innerhalb der Plattenbeladers auftreten. Diese Gebiete können zu Mischungsvorgängen von Beladefluid und Speicherfluid noch innerhalb der Einströmvorrichtung führen, was zu einer Reduktion der effektiven Beladefluidtemperatur führen kann. Es ist zu erwarten, dass bei einer geeigneten Auslegung des Plattenabstands h_{PB} in Abhängigkeit des Beladevolumenstroms eine Reduktion der Rezirkulations- bzw. Totwassergebiete möglich ist. Ein Vergleich der Strömung am Austritt des Plattenbeladers bei identischen Betriebsbedingungen, jedoch drei unterschiedlichen Plattenabständen h_{PB} , zeigt Abbildung 82 in Anhang C.

6.3.2 Schichtbe- und Entladeeinrichtung mit variabler Austrittshöhe

In Abbildung 23 sind die Messergebnisse einer Beladesequenz für die SBE Lamellenlader (Typ 2, konstante Lamellenabstände) dargestellt. Es zeigt sich ein anderes Beladeverhalten als bei den Einströmgeometrien Plattenbelader und Beladelanze. Ausgehend von einer anfänglich homogenen Speichertemperatur beginnt die Beladung im Bereich des Deckels des Versuchsspeichers. Bereits nach einem Beladevolumen von 60 l ist eine ausgeprägte Temperaturschichtung vorhanden, die mit fortschreitender Beladung nach unten verschoben wird.

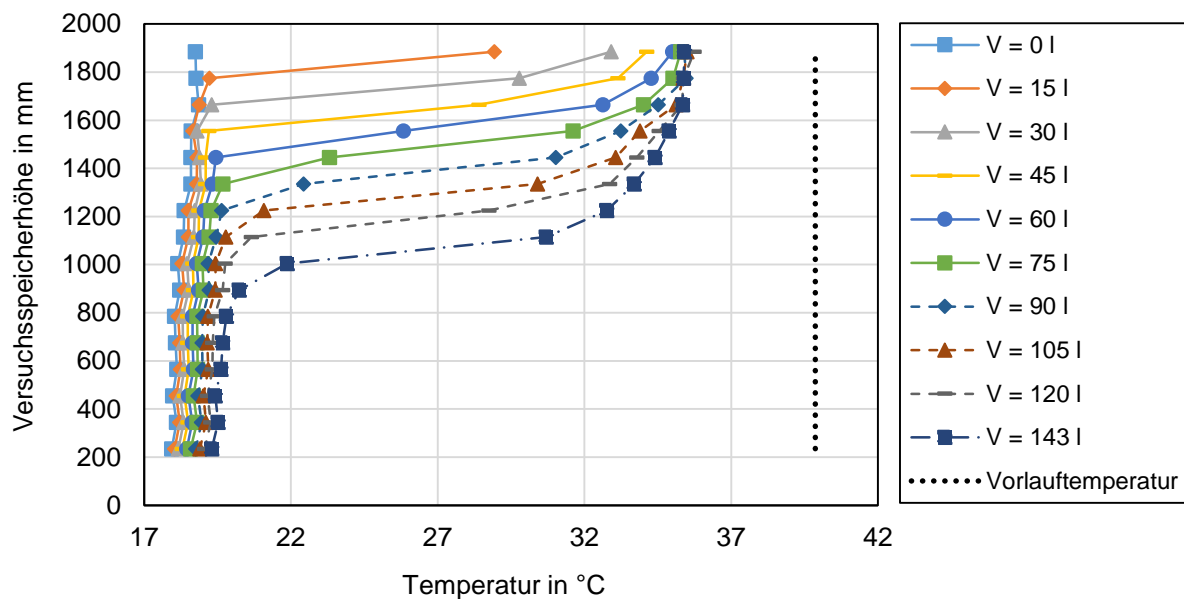


Abbildung 23. Beladesequenz mit dem Lamellenlader (Typ 2) bei einem Volumenstrom von 150 l/h, einer Beladefluidtemperatur von 39 °C und einer mittleren anfänglichen Speichertemperatur von 18 °C; dargestellt ist die auf der jeweiligen Höhe des Versuchsspeichers gemessene Temperatur bzw. die Vorlauftemperatur in Abhängigkeit des Beladefluidvolumens

Weiterhin fällt auf, dass die Temperatur des Speicherfluids im oberen Speicherbereich bei einem Beladevolumen von 143 l zur Beladefluidtemperatur eine Temperaturdifferenz von 4 K aufweist. Dies kann mit einer Abkühlung des Beladefluids vor dem Eintritt in den Lamellenlader am Eintrittsrohr durch die nicht wärmegeämmte Verrohrung des Vorlaufs innerhalb des Versuchsspeichers und durch Wärmeverluste bzw. eine Wärmeabgabe des Beladefluids beim Durchströmen des Lamellenladers an das Speicherfluid erklärt werden. Ebenfalls können lokale Fehlströmungen, wie z.B. ein Ansaugen von Speicherfluid in den Lamellenlader, dieses Verhalten erklären. Mit Hilfe eines im Einströmrohr platzierten zusätzlichen Temperatursensors konnte die Differenz der gemessenen Vorlauftemperatur zur tatsächlichen Eintrittstemperatur des Beladefluids zu 1,2 K bestimmt werden.

Ein ähnlich gutes Schichtbeladeverhalten wie beim LL Typ 2 konnte auch beim LL Typ 1 mit gestuften Lamellenabständen festgestellt werden. Ein Unterschied im Beladeverhalten beim LL Typ 1 und LL Typ 2 durch die unterschiedlichen Lamellenabstände konnte nicht festgestellt werden.

In Abbildung 24 sind die Messergebnisse einer Einschichtsequenz für die SBE Lamellenlader (Typ 2, konstante Lamellenabstände) dargestellt.

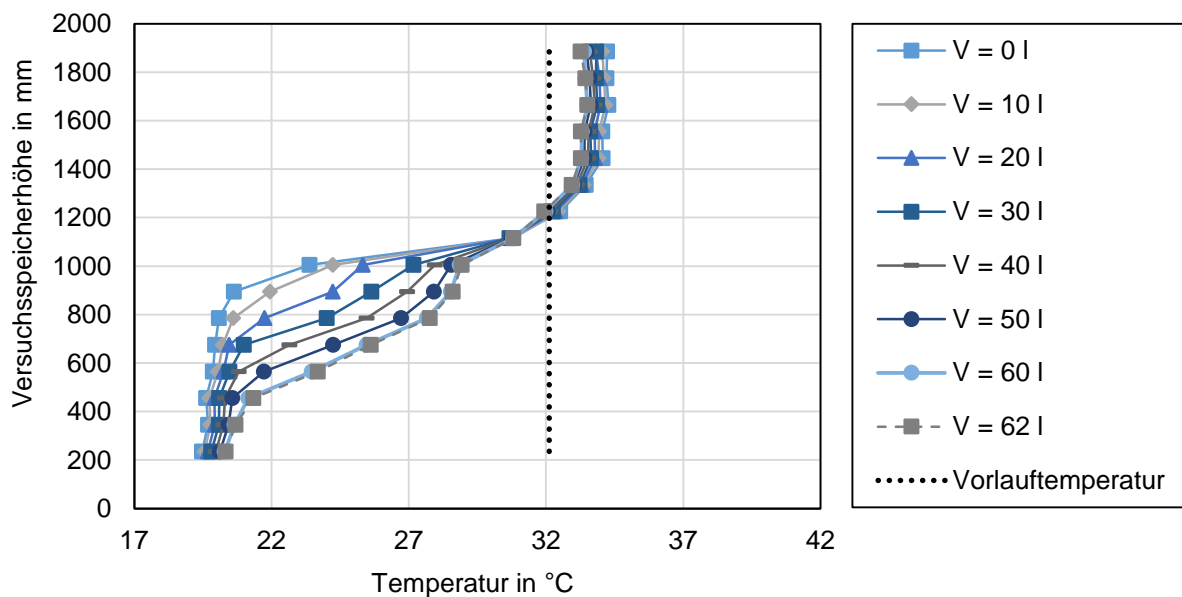


Abbildung 24. Einschichtsequenz mit dem Lamellenlader (Typ 2) mit einem Volumenstrom von 149 l/h, einer Beladefluidtemperatur von 32 °C und einer anfänglichen Speichertemperaturverteilung gemäß der Beladesequenz aus Abbildung 23; dargestellt ist die auf der jeweiligen Höhe gemessene Temperatur bzw. die Vorlauftemperatur in Abhängigkeit des Beladefluidvolumens

Nach dem Einschichten eines Beladevolumens von 62 l konnte ein deutlich abgegrenzter, zweiter Temperatursprung mit einer Temperatur von 29 °C erzeugt werden. Ähnlich dem Temperatursprung bei der Beladesequenz weist der Temperatursprung der Einschichtsequenz eine Temperaturdifferenz zur Vorlauftemperatur von 3 K auf. Weiterhin fällt auf, dass die Höhe der erzeugten Temperaturschicht 100 mm bis 200 mm unterhalb der gemäß der Speicherfluid- und Vorlauftemperatur erwarteten Austrittshöhe liegt. Dies lässt sich auf die reduzierte tatsächliche Beladefluidtemperatur gegenüber der gemessenen Vorlauftemperatur und mögliche Vermischungsvorgänge des Beladefluids mit dem Speicherfluid beim Ausströmen aus dem Lamellenlader zurückführen. Dieses Verhalten bei der Einschichtung konnte auch beim LL (Typ 1) mit gestuften Lamellenabständen festgestellt werden. Ein exemplarischer Belade- und Einschichtvorgang mit Strömungsmarkierung in Form einer Bilderfolge zeigen die Abbildung 83 und Abbildung 84 in Anhang C.

Werden die Ergebnisse der Belade- und Einschichtsequenz im Vergleich zu den Ergebnissen der SBE mit fester Auslasshöhe betrachtet, so kann festgehalten werden, dass der Lamellenlader zur geschichteten Beladung bzw. zur Einschichtung in eine bestehende thermisch Schichtung geeignet ist. Im untersuchten Volumenstrombereich von 75 l/h bis 200 l/h zeigten beide Lamellenlader-Typen ein ähnliches Belade- und Einschichtverhalten. Eine direkte Volumenstromabhängigkeit konnte bei der Differenz zwischen Beladefluidtemperatur und der maximal im Speicher erreichten Fluidtemperatur nach der Beladung festgestellt werden. Mit zunehmendem Volumenstrom nimmt diese Differenz ab. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass Wärmeverluste vom Beladefluid in den Versuchsspeicher vorliegen, welche bei einer längeren Verweilzeit im Versuchsspeicher die effektive Beladefluidtemperatur reduzieren.

Neben dem Belade- und Einschichtverhalten wurde das Entladeverhalten, das Anlaufverhalten und das Auftreten von Ansaugeffekte am LL näher untersucht.

Durch eine lokale Einfärbung des Speicherfluids im Bereich zwischen den Lamellenpaketen wurde der Strömungsweg während einer Entladung untersucht. Im Gegensatz zur Darstellung in Abbildung 20 war bei dieser Versuchsreihe beim Lamellenlader Typ 2 die unten offene Seitenwand verschlossen. Es konnte gezeigt werden, dass beim Entladen über den LL Speicherfluid über den untersten Rückstauraum angesaugt wird und nicht über den darüber positionierten Rückstauraum, siehe Abbildung 25. Die Ergebnisse dieser Untersuchung lassen den Schluss zu, dass bei Entladen über einen Lamellenlader Speicherfluid auf der Höhe des Einströmrohrs oder tiefer angesaugt wird. Bei einer Anwendung des Lamellenladers ohne verschlossene untere Seitenwand ist daher bevorzugtes Ansaugen über diesen Strömungsweg zu erwarten.

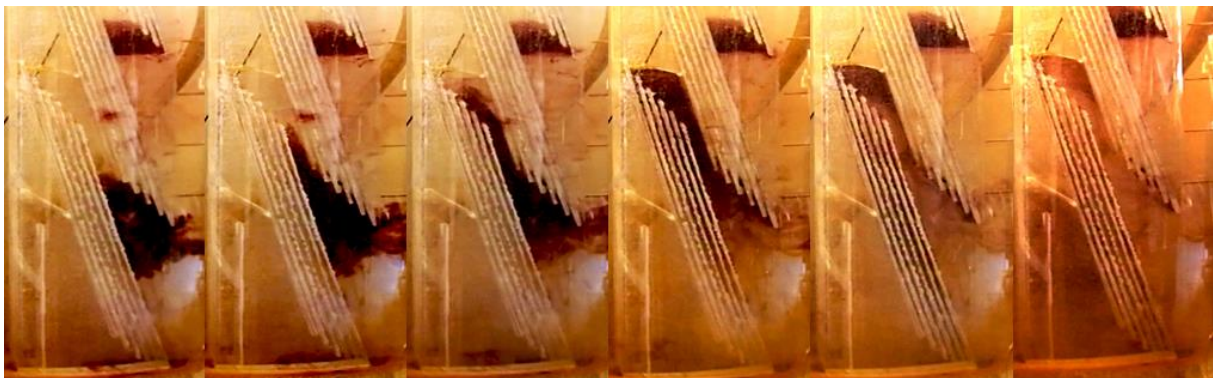


Abbildung 25. Bilderfolge einer Entladung über Lamellenlader Typ 2 mit einem Volumenstrom von 440 l/h und zwischen den Lamellenpaketen lokal eingefärbten Speicherfluid; Zeitdifferenz zwischen den Bildern (v. l. n. r.): 5 s, 5 s, 5 s, 5 s, 20 s

Beim Anlaufverhalten des Lamellenladers konnte durch eine Strömungsmarkierung des Beladefluids ein Unterströmen der Lamellenpakete (siehe Bild A in Abbildung 26) bzw. ein Austritt von Beladefluid in den Speicher unterhalb der Lamellenpakete nachgewiesen werden. Dieses Verhalten tritt jedoch nur kurzzeitig auf bzw. ist nach der Ausbildung einer Scherschicht zwischen zwei Lamellenpaketen, die das Beladefluid vom Speicherfluid trennt, nicht mehr vorhanden (siehe Bild B in Abbildung 26). Verursacht wird dieses Phänomen durch Mischungsvorgänge von Beladefluid und im LL befindlichem kühleren Speicherfluid zu Beginn der Beladung. Weiterführende Versuche zum Anlaufverhalten bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen zeigen, dass mit höherer Temperaturdifferenz zwischen Belade- und Speicherfluid bzw. höherem Beladevolumenstrom die Zeitdauer des Anlaufverhaltens verkürzt wird /Beß15/.

Es konnten während der Durchführung der Versuchsreihen zur Beladung und Einschichtung am Lamellenlader (Typ 1 und Typ 2) zwei Ansaugeffekte beobachtet werden. Diese werden im Folgenden näher erläutert. Ansaugeffekte führen dazu, dass Speicherfluid in eine SBE gesogen und dadurch die Temperatur des Beladefluids beeinflusst wird. Ein ungewolltes

Ausströmen von Beladefluid aus dem LL während des stationären Betriebs der Belade- bzw. Einschichtsequenzen konnte dagegen nicht festgestellt werden.

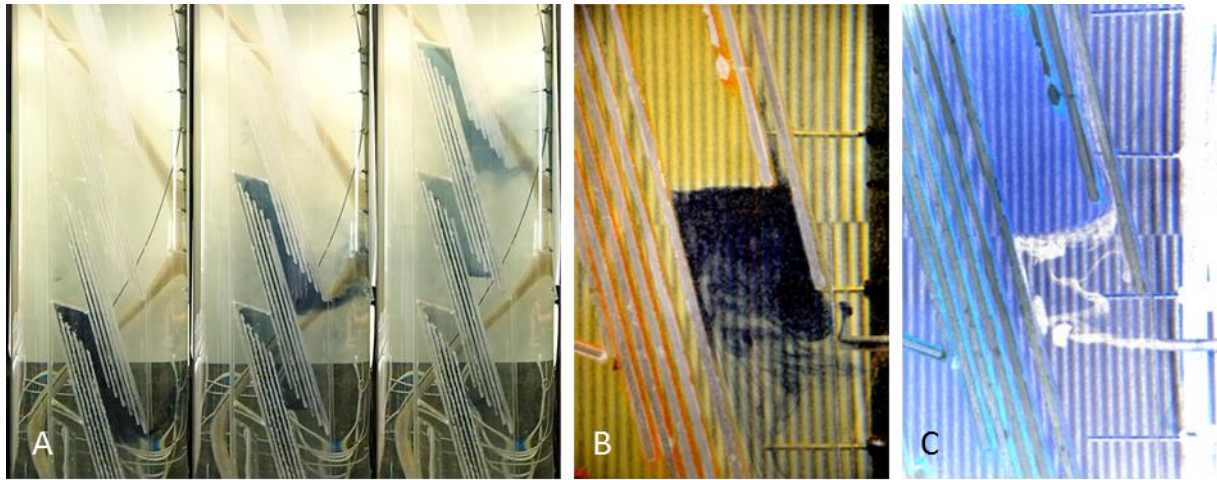


Abbildung 26. Bilderfolge des initialen Anlaufverhalten jeweils im Moment des Unterströmens eines Lamellenpakets während einer Beladesequenz des Lamellenladers Typ 1 mit einem Volumenstrom von 100 l/h, einer Beladefluidtemperatur von 50 °C und einer anfänglichen Speicherfluidtemperatur von 22 °C (Bild A); Nahaufnahmen einer ausgebildeten Scherschicht zwischen zwei Lamellenpaketen des Lamellenladers Typ 2 mit eingefärbtem Speicherfluid (Bild B) bzw. zusätzlicher Bildbearbeitung (Bild C) bei einer Beladesequenz mit einem Volumenstrom von 176 l/h bzw. 227 l/h, einer Beladefluidtemperatur von 40 °C und einer anfänglichen Speicherfluidtemperatur von 18 °C

In Bild B und Bild C (Farbspektrum verändert) der Abbildung 26 ist durch lokales Einfärben von Speicherfluid unterhalb eines Lamellenpakets eine während einer Durchströmung des LL sich ausbildende und für diese SBE typische Scherschicht zwischen Speicherfluid und Beladefluid visualisiert. In beiden Bildern ist ersichtlich, dass das in den untersten durchströmten Lamellenzwischenraum strömende Beladefluid markiertes Speicherfluid unterhalb der Scherschicht ansaugt. Dies führt durch Mischungsvorgänge des Beladefluids mit dem Speicherfluid zu einer Abnahme der effektiven Beladefluidtemperatur. Dieser Ansaugeneffekt konnte bei beiden Typen des Lamellenladers beobachtet werden.

Ein weiterer Ansaugeneffekt tritt bevorzugt im ersten nicht von Beladefluid durchströmten Lamellenpaketzwischenraum auf. Durch Wärmeleitung im Lamellenmaterial erwärmt sich die dort stehende Fluidschicht und erfährt dadurch ebenfalls eine Auftriebskraft bzw. es tritt ein Ansaugen von im Vergleich zum Beladefluid kühlerem Speicherfluid aus einem Bereich unterhalb der Scherschicht auf.

6.4 Zusammenfassung

Aufgrund der begrenzten Anzahl am Markt verfügbarer SBE, die eine einfache Adaption an andere Speichergößen, eine einfache Skalierbarkeit für andere Betriebsbedingungen und eine direkte Schichtbe- und Entladung ermöglichen, wird eine Neuentwicklung einer Kombination einer aktiven und passiven Schichtbe- und Entladeeinrichtung als eine

vielversprechende Möglichkeit zur Umsetzung der oben genannten Forderungen weiterverfolgt. Als aktive SBE wird dabei das Produkt „Exergie-Manager“ der Fa. Nitsch-Regelungstechnik und als passive SBE wird der Lamellenlader verwendet. Ein Funktionsprüfung der aktiven SBE ist in Kapitel 7.4 beschrieben. Die aktive SBE soll am Funktionsmuster im Realmaßstab (siehe Kapitel 9) die Temperaturverteilung über der Speicherhöhe erfassen und mit Hilfe einer Regelung den Speichervorlauf gemäß seiner Temperatur über eine von vier Anschlussleitungen, deren Enden im Funktionsmuster auf vier Höhen positioniert sind, beladen bzw. einschichten. An den Enden der Anschlussleitungen befindet sich jeweils eine passive SBE in Form eines Lamellenladers. Das Ziel der passiven SBE ist es, auch zwischen den Enden der Anschlussleitungen eine geschichtete Beladung zu ermöglichen. Der Lamellenlader wird im Vergleich zu den in Kapitel 6.3.2 beschriebenen Untersuchungen hinsichtlich seiner geometrischen Abmessungen modifiziert. Es werden weniger Lamellenpakete verwendet und die Tiefe des Lamellenladers wird auf die größeren Volumenströme angepasst. Da sich durch die lineare Skalierung der Tiefe des Lamellenladers mit dem Volumenstrom die geometrischen Längenverhältnisse innerhalb des Lamellenladers bzw. innerhalb der Lamellenpakete nicht ändert, wird in erster Näherung davon ausgegangen, dass dieser geometrisch modifizierte Lamellenlader ein ähnliches Belade- und Einschichtverhalten zeigt, wie der im Labormaßstab untersuchte Lamellenlader.

7 Untersuchung mehrerer Funktionsmuster im Technikumsmaßstab

Um ein geeignetes Wärmedämmkonzept für das zu fertigende Funktionsmuster im Realmaßstab zu identifizieren, wurden drei unterschiedliche Wärmedämmstoffe bzw. Wärmedämmkonzepte untersucht. Dafür wurden von der Fa. Sirch drei Funktionsmuster-Speicher im Technikumsmaßstab, d.h. mit einem Volumen von $1,5 \text{ m}^3$ zur Verfügung gestellt. In diesem Zusammenhang wurden u. a. technische Fragestellungen, wie die Anbringung und die Evakuierung der Wärmedämmung, sowie die Durchführung von Sensorkabeln, untersucht. Zudem wurden eine Schichtbe- und Entladeeinrichtung auf Funktionsfähigkeit überprüft, die Wärmeverluste der Speicher anhand von Auskühlversuchen aufgenommen, sowie Untersuchungen zu den Wärmebrücken der Funktionsmuster durchgeführt.

7.1 Experimentelle Aufbauten

Es wurden drei Speicher mit einem Warmwasservolumen von $1,5 \text{ m}^3$ von Fa. Sirch gefertigt und am ITW experimentell untersucht. Alle drei Speicher verfügen jeweils über sechs hydraulische Anschlussleitungen, zwei Durchgangsstutzen für Sensoren und über ein Mannloch. Sämtliche Durchgänge befinden sich am Boden des Speichers. Zwei der drei Funktionsmuster sind als doppelwandige Speicher ausgeführt. D. h. sie besitzen einen Außenmantel im Abstand von ca. 15 cm um den Wasser beinhaltenden Innenmantel. Der Außenmantel schließt ein evakuierbares Volumen von $1,3 \text{ m}^3$ für die Wärmedämmung ein und verfügt über einen Stutzen zur Befüllung mit dem Wärmedämmstoff und einen Stutzen zur Evakuierung. Um die Evakuierung des Dämmvolumens ohne ein Absaugen des Dämmstoffes zu gewährleisten, ist ein Filter am Vakuumstutzen innerhalb des Dämmvolumens angebracht. In Abbildung 27 ist ein Funktionsmuster-Speicher während des Aufheizvorgangs vor der Messung der Wärmeverluste zu sehen.

Für die Messung der Wärmeverluste sind fünf Pt100-Temperatursensoren im Inneren der Speicher gleichmäßig über die Höhe verteilt angebracht. Zudem wurde die Außenlufttemperatur mittels drei gleichmäßig über die Speicherhöhe verteilten Pt100-Temperatursensoren und die Oberflächentemperatur der Speicheraußenhülle mittels zwei Pt100-Temperatursensoren gemessen. Während der Messung der Wärmeverluste wurde der in Abbildung 27 gezeigte Thermostat entfernt und der Speicher von relevanten Strahlungsquellen und Luftströmen aus der Umgebung abgeschirmt.



Abbildung 27. Funktionsmuster-Speicher; Versuchsaufbau für die Messung der Wärmeverluste

7.2 Wärmedämmstoffmischung und Befüllung

Wie in Kapitel 4.6 bereits beschrieben, wurden zur Befüllung des Dämmvolumens der Funktionsmuster-Speicher der Wärmedämmstoff feinkörniger expandierter Perlit (fEP) und eine Mischung aus 70 Massenprozent grobkörnigem expandiertem Perlit (gEP) und 30 Massenprozent pyrogener Kieselsäure (pKS) ausgewählt. Der Wärmedämmstoff fEP wurde über den oben am Speicher angebrachten Befüllungsstutzen mittels eines Behälters mit aufgesetztem Trichter eingefüllt. Die oben beschriebene Dämmstoff-Mischung wurde chargenweise mit einem modifizierten Betonmischer hergestellt und zunächst mit Hilfe eines Industrie-Staubsaugers und eines Zyklonabscheiders in den Speicher gefüllt. Diese Füllmethode mittels Zyklonabscheider zeigte insbesondere in Vorversuchen im Labormaßstab vielversprechende Ergebnisse. Beim Funktionsmuster-Speicher jedoch war der Transport der Dämmstoff-Mischung in den Zwischenraum nicht in einem zufriedenstellenden Maß gewährleistet. Daher wurden ca. 30 % der Dämmstoffmischung analog zum Verfahren, das für den fEP im anderen Funktionsmuster-Speicher angewendet wurde (s. o.), eingefüllt. Während und nach der Befüllung des Dämmvolumens wurde eine Rüttelplatte außen an den Speicher angebracht und betrieben, so dass eine gleichmäßige Befüllung und Setzung des Wärmedämmstoffs gewährleistet werden konnte. Wie in Vorversuchen im Labormaßstab gezeigt werden konnte, ist keine Entmischung der Mischung aus gEP und pKS nach dem Rütteln zu erwarten. Für fEP konnte nach der Befüllung keine weitere Setzung beobachtet werden und es stellte sich eine Schüttdichte von 183 kg/m^3 ein. Für die Dämmstoff-Mischung konnten weitere Setzungen festgestellt werden, so dass eine weitere Befüllung notwendig wurde, wonach eine Schüttdichte von 97 kg/m^3 resultierte.

7.3 Untersuchung des Evakuierungsverhaltens

Vor der Befüllung mit dem Wärmedämmstoff wurde das Dämmvolumen beider doppelwandiger Funktionsmuster-Speicher auf Vakuumdichtheit überprüft. Beide Dämmvolumina wiesen mit Leckraten zwischen $2,67 \cdot 10^{-5}$ und $2,89 \cdot 10^{-4}$ mbar·l/s eine für die Untersuchungen hinreichende Vakuumdichtheit auf. Für das Dämmvolumen von $1,3 \text{ m}^3$ entsprechen diese Leckraten einem Druckanstieg zwischen $8 \cdot 10^{-4}$ und $7,41 \cdot 10^{-5}$ mbar/h.

Das Dämmvolumen ohne Wärmedämmstoff konnte innerhalb von 30 Minuten auf einen Vakuumdruck $< 0,05$ mbar evakuiert werden. Im mit fEP gefüllten Dämmvolumen konnte nach 80 h Evakuierungsdauer ein Vakuumdruck von 0,284 mbar bei einer Mitteltemperatur des Wärmedämmstoffs von $23,5 \text{ °C}$ erreicht werden. Dieser ließ sich auch nach 32 h zusätzlicher Evakuierung nicht weiter absenken. Wesentliche Gründe für die vergleichsweise lange Evakuierungsdauer und das Erreichen eines höheren Vakuumdrucks als im Dämmvolumen ohne Wärmedämmstoff sind zum einen der durch den Wärmedämmstoff deutlich erhöhte Strömungswiderstand im Dämmvolumen und zum anderen am Wärmedämmstoff gebundene Restfeuchte. Letzteres macht sich auch durch eine starke Temperaturabhängigkeit des Vakuumdrucks bemerkbar. Diese Abhängigkeit ist deutlich stärker ausgeprägt, als es die Temperaturabhängigkeit der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase erwarten lässt.

Um den Anteil der Restfeuchte im Wärmedämmstoff zu verringern und somit den Vakuumdruck abzusenken, wurde das mit fEP gefüllte Dämmvolumen mit trockenem Stickstoff geflutet und anschließend erneut evakuiert. Der Vakuumdruck ließ sich dadurch jedoch nur um 0,007 mbar verringern, gemessen bei der Ausgangstemperatur von $23,5 \text{ °C}$. Ein weiterer Ansatz zur Trocknung des Dämmstoffs und zur Verringerung des Vakuumdrucks war die Evakuierung bei gleichzeitiger Beheizung des Dämmvolumens. Durch einen Halogenstrahler im Speicherinneren und eine Warmluft-Umströmung der Speicheraußenhülle mittels Heißluftgebläsen, bei Umhüllung des Speichers mit wärmedämmenden Folien, wurden über 19 Tage eine zeitlich und über das Dämmvolumen gemittelte Temperatur von $40,1 \text{ °C}$ aufgeprägt. Über das Dämmvolumen gemittelt wurden Temperaturen bis zu 58 °C erreicht. Daraufhin konnte der Vakuumdruck nach Abkühlung auf $23,5 \text{ °C}$ um weitere 0,065 mbar auf 0,212 mbar verringert werden.

Unter den Messbedingungen für die Wärmeverlustrate (siehe Kapitel 7.5) konnte ein zeitlich gemittelter Vakuumdruck von 1 mbar im mit fEP gefüllten Dämmvolumen erreicht werden. In dem mit der Mischung aus gEP und pKS gefüllten Dämmvolumen herrschte während der Messung der Wärmeverlustrate ein Vakuumdruck von 2,5 mbar. Die Evakuierung gestaltete sich in diesem Fall aufwendiger und weniger erfolgreich als für das mit fEP gefüllte Dämmvolumen. Das kann mit einem höheren Feuchtegehalt der vergleichsweise hydrophilen pKS und mit der kleineren Porengröße, die einen größeren Strömungswiderstand zur Folge hat, begründet werden. Zusätzlich zu mehreren Stickstoffspülungen und der Evakuierung bei gleichzeitiger Beheizung, wurde für das mit der Dämmstoff-Mischung gefüllte Dämmvolumen eine Evakuierung mittels einer sogenannten

Zeolithfalle untersucht. Zeolithe sind Substanzen, die in Form hochporöser Kugeln, hier mit 1,6 – 2,5 mm Kugeldurchmesser, eine sehr hohe spezifische (auf das Volumen bezogene) Oberfläche aufweisen und die insbesondere Gase wie Wasserdampf stark adsorbieren können. Es wird angenommen, dass das im Dämmvolumen vorhandene Restgas zum größten Teil aus Wasserdampf besteht und daher zu einem gewissen Teil von einer Zeolithfalle aufgenommen werden kann.

Es wurde ein Behälter mit 0,3 dm³ desorbiertem Zeolith an das geschlossene Ventil am Vakuumstutzen des Speichers angebracht. Das Gasvolumen im mit Wärmedämmstoff gefüllten Dämmvolumen wird auf 1.170 dm³ abgeschätzt. Daraufhin wurde die Zeolithfalle über einen zweiten Vakuum-Anschluss evakuiert. Dieser zweite Anschluss wurde anschließend geschlossen und das Ventil zwischen Zeolithfalle und Dämmvolumen geöffnet. Dadurch konnte ein Stoffaustausch zwischen Zeolithfalle und Dämmvolumen stattfinden. Innerhalb von 12 Tagen konnte somit der Vakuumdruck bei einer Temperatur von 27,7 °C. von 1,552 mbar auf 1,172 mbar um 0,38 mbar abgesenkt werden. Die Evakuierung mittels Zeolithfalle stellt im hier vorherrschenden Vakuumdruckbereich demnach eine vielversprechende Option dar. Es können damit Kosten und Zeit im Vergleich zur alleinigen Evakuierung mittels Vakuumpumpe und im Vergleich zu einer Beheizung des Dämmvolumens eingespart werden.

7.4 Voruntersuchungen zum Funktionsmuster im Realmaßstab

Zusätzlich zu den vorangegangenen Untersuchungen wurden an einem der zwei Funktionsmuster, ohne schüttfähiges Füllmaterial innerhalb der Vakuumwärmedämmung, ein Konzept zur Sensorhülse durchführung durch den Speicherboden getestet. Weiterhin wurde die Funktion der aktiven SBE in Kombination mit den Beladelanzten, die in Kapitel 6.3.1 beschrieben wurden, überprüft. Die Untersuchung fand in einem Speicherprüfstand statt, der zur Prüfung nach /EN 12977-3:2012/ geeignet ist. Abbildung 28 zeigt die Aufstellung des Funktionsmusters mit Messdatenerfassung und Vakuumpumpe am Speicherprüfstand, die Durchführung der Sensorhülsen der Messsensoren durch den Boden des Funktionsmusters mit einem Dichtungseinsatz der Fa. Doyma und die Beladelanzten der aktiven SBE im Inneren des Funktionsmusters

Die durchgeführten Funktionstests an der aktiven SBE sollten nachweisen, dass die aktive SBE auf Basis der im Inneren des Funktionsmusters erfassten Temperaturverteilung über der Höhe und der erfassten Vorlauftemperatur eine thermisch geschichtete Beladung ermöglicht. Der Dichtungseinsatz für die Durchführung der Sensorhülsen der Messsensoren wurde auf Dichtigkeit bei einer Temperatur- und Druckbeaufschlagung untersucht. Sowohl die aktive SBE, als auch die Durchführung der Sensorhülsen erfüllten die vorab festgelegten Erwartungshaltungen.



Abbildung 28. Funktionsmuster (Wasservolumen: 1,5 m³) mit aktiver Schichtbe- und Entladeeinrichtung, Messdatenerfassung und Vakuumpumpe am Speicherprüfstand (links); Durchführung der Sensorhülsen der Messsensoren am Boden des Funktionsmusters mit einer Doyma-Dichtung (mittig); Beladelanzen und Entlüftungrohr im Inneren des Funktionsmusters (rechts)

Als ergänzende Untersuchung wurde eine Temperaturmesslanze mit Hüllrohr im direkten Vergleich zu einer Temperaturmesslanze mit Einsteck-Widerstandstemperatursensoren betrachtet. Bei der Temperaturmesslanze mit Hüllrohr werden die Sensoren in einem luftgefüllten Rohr auf definierten Höhen mit Hilfe von Fixierungselementen positioniert. Beide Arten von Temperaturmesslanzen kommen am Funktionsmuster im Realmaßstab (siehe Kapitel 7) zum Einsatz. Durch den direkten Vergleich der von beiden Messlanzen ermittelten Temperaturen konnte festgestellt werden, dass bei dynamischen Temperaturänderungen keine relevante Temperaturabweichung durch einen ggf. verschlechterten Wärmedurchgang am Hüllrohr auftritt.

Im Zuge einer weiteren Untersuchung der Fußringkonstruktion wurden umfangreiche zweidimensionale, rotationssymmetrische CFD-Simulationen⁸ durchgeführt, um das Potential der Verbesserung der Wärmedämmung des Fußrings durch zusätzliche Dämmmaterialien bzw. konstruktive Änderungen am Fußring quantitativ vergleichen und bewerten zu können. Zur Bestimmung der für die Simulationen notwendigen Modellparameter, wie z. B. des Wärmeübergangskoeffizienten an der Speicheraußenoberfläche, wurden Oberflächentemperaturprofile am Funktionsmuster bzw. die Wärmeverluste während stationärer Betriebszustände des Funktionsmusters messtechnisch erfasst und mit den Simulationsergebnissen verglichen. Das Oberflächentemperaturprofil wurde mit sechs Einsteck-Widerstandssensoren (Messunsicherheit: $\pm 0,1$ K) bzw. mit Infrarot-Aufnahmen⁹ (siehe Abbildung 29) erfasst /Zha15/. Die Modellvalidierung erfolgte durch einen Vergleich der aus den Simulationen

⁸ Simulationssoftware: Comsol Multiphysics, Version 4.4

⁹ Infrarot-Kamera: VarioCAM hr (Fa. Infratec); Randbedingungen der Messung: $\varepsilon_{\text{ges}}^* = 0,9$; $\tau_{\text{Pfad}}^* = 1$;
 $\vartheta_{\text{Pfad}} = \vartheta_{\text{Halbraum}} = 20$ °C

ermittelten Wärmeverlustrate und der nach dem Prüfverfahren /EN 12977-3:2012/ ermittelten Wärmeverlustrate des Funktionsmusters. Die prozentuale Abweichung ist, bezogen auf die durch Simulationen ermittelte Wärmeverlustrate, kleiner als 15 %.

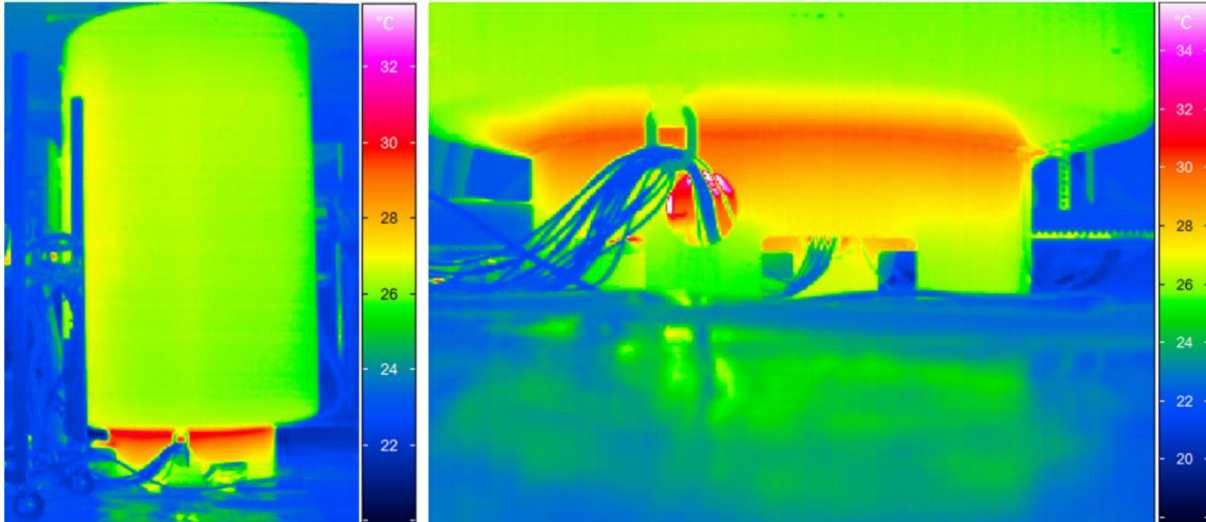


Abbildung 29. Infrarot-Kamera-Aufnahme des Funktionsmusters (links) und des vergrößerten Fußrings des Funktionsmusters (rechts); eine Lichtbildaufnahme des Funktionsmusters im Prüfstand ist in Abbildung 28 (links) gezeigt

Mit Hilfe des Simulationsmodells¹⁰ wurden u. a. die Fußringhöhe, das Fußringmaterial und eine zusätzliche Anbringung von konventionellem Dämmmaterial untersucht. Es wurde festgestellt, dass die Anbringung einer zusätzlichen konventionellen Wärmedämmung die vielversprechendste Option zur Reduzierung der Wärmeverluste im Fußringbereich darstellt. Dies betrifft insbesondere die Bereiche des nicht vakuumgedämmten Unterbodens und der Innenseite des Fußrings. Die Simulationsergebnisse zeigen eine Reduktion der Wärmeverlustrate des Funktionsmusters von 29 % bei einer Anbringung einer konventionellen Wärmedämmung¹¹ mit einer Dämmstärke von 150 mm (siehe Abbildung 30) am Unterboden. Die im Vergleich zu den vorangegangenen Messungen (siehe Kapitel 7.5) höhere Wärmeverlustrate resultiert zum einen aus den unterschiedlichen Randbedingungen zwischen Simulation und Messung. Bei der Messung nimmt der Verlustwärmestrom über den Unterboden durch die Auskühlung der untersten Schicht des Speichermediums und der damit einhergehenden Reduktion der treibenden Temperaturdifferenz im Verlauf der Messung ab. Bei der Simulation liegt eine konstante Speichermediumstemperatur vor. Zum anderen tritt bei der Messung im Gegensatz zur Simulation eine Erhöhung der Fußringlufttemperatur auf, was zu einer Reduzierung des Wärmeverluststroms über den Speicherboden führt.

¹⁰ Unter Annahme einer effektiven Wärmeleitfähigkeit im zylindrischen Ringspalt des Funktionsmusters von $\lambda_{\text{eff}} = 10 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$

¹¹ Unter Annahme einer effektiven Wärmeleitfähigkeit von $\lambda_{\text{eff}} = 45 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$

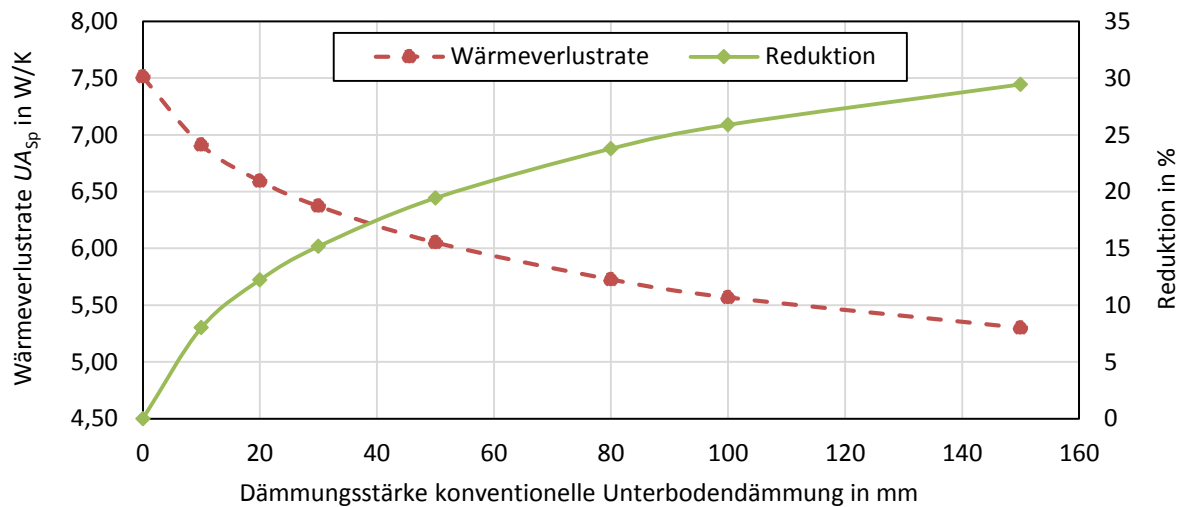


Abbildung 30. Simulationsergebnisse zur Wärmeverlustrate bzw. deren Reduktion durch Anbringung einer konventionellen Wärmedämmung mit unterschiedlicher Dämmstärke am Unterboden /Zha15/

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen wird das Potential zur Reduzierung des Wärmeverluststroms über den Speicherboden mit Hilfe einer konventionellen Wärmedämmung des Fußrings an einem Funktionsmuster experimentell untersucht (siehe Kapitel 7.5).

7.5 Untersuchung der Wärmedämmung

Von beiden doppelwandigen Funktionsmuster-Speichern wurden Auskühlraten aufgenommen und aufbauend auf diesen die Wärmeverlustrate bestimmt. Dazu wurde das Speicherwasser homogen jeweils auf 50 K über Umgebungslufttemperatur aufgeheizt und anschließend durch Wärmeverluste der Speicher im Mittel um 10 K abkühlen lassen. Während der Abkühlphase wird das Speicherwasser nicht umgewälzt. Aus der Auskühlkurve lässt sich eine Wärmeverlustrate berechnen.

Die doppelwandigen Funktionsmuster-Speicher sind im Bodenbereich, der vom tragenden Fußring umschlossen wird, nicht wärmegeklämt. Außerdem stellt der Fußring eine Wärmebrücke dar. Daher wurden auch Messungen durchgeführt, bei welchen der Bodenbereich, sowie der Fußring mit Steinwolle wärmegeklämt wurden. Die Dicke der Steinwollewärmedämmung betrug zwischen Speicherboden und Aufstellungsfläche ca. 240 mm und um den Fußring außen ca. 50 mm.

Tabelle 8 zeigt die berechneten Ergebnisse der Messungen der Auskühlversuche. Der Funktionsmuster-Speicher 1 ist mit einer Mischung aus 70 Massenprozent gEP und 30 Massenprozent pKS bei einem Vakuumdruck von 2,5 mbar wärmegeklämt. Bei diesem Vakuumdruck beträgt die eff. WLF der Wärmedämmung nach Labormessungen (siehe Kapitel 4) 14 mW/(m·K). Der Funktionsmuster-Speicher 2 ist mit fEP bei einem Vakuumdruck von 1 mbar wärmegeklämt. Die eff. WLF dieser Wärmedämmung beträgt nach

Labormessungen bei diesem Vakuumdruck 11,7 mW/(m·K). Die Unterschiede der Wärmeverlusten lassen sich durch die Unterschiede der eff. WLF der Wärmedämmungen begründen. Die Wärmedämmung des Unterbodens und des Fußrings verringern die Wärmeverluste der Funktionsmuster-Speicher um 15 % bis 17 %.

Nach /EN 12977-3:2012/ kann eine äquivalente Wärmeverluste UA_{Sp} [W/K] für Warmwasserspeicher unterschiedlicher Größe mit Hilfe eines Faktors a [-] gemäß der Zahlenwert-Gleichung 3.1 bestimmt werden (vgl. Kapitel 3.1). Der maximal zulässige Wert für den Faktor a nach /EN 12977-3:2012/ beträgt 0,16.

Die EU-Verordnung 811/2013 /EU13/ schreibt vor, dass seit September 2015 Warmwasserspeicher mit einem Energy-Label zu versehen sind. In dieser Verordnung ist die Berechnung von Energieeffizienzklassen von A+ bis G anhand des sogenannten Warmhalteverlustes beschrieben. Sowohl die im Kapitel 3.1 beschriebene Ermittlung des Faktors a nach Gleichung 3.1, als auch die Bestimmung der Energieeffizienzklassen beziehen sich u. a. auf eine Prüfung der Warmwasserspeicher gemäß /EN 12977-3:2012/. Obwohl die Prüfung der Funktionsmuster-Speicher nicht gemäß dieser Norm durchgeführt wurde und die Berechnung gemäß EU-Verordnung 811/2013 einen Gültigkeitsbereich für Speicher bis maximal 0,5 m³ besitzt, werden zur Einordnung der gemessenen Wärmeverlusten sowohl der Faktor a nach Gleichung 3.1 als auch die Energieeffizienzklassen für die Funktionsmuster-Speicher berechnet und in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8. Charakterisierung der Wärmeverluste der Funktionsmuster-Speicher im Technikumsmaßstab mit und ohne Wärmedämmung des Unterbodens

	Funktionsmuster-Speicher 1		Funktionsmuster-Speicher 2	
	ungedämmter Unterboden	gedämmter Unterboden	ungedämmter Unterboden	gedämmter Unterboden
Wärmeverluste UA_{Sp} [W/K]	1,83	1,55	1,70	1,41
Verringerung von UA_{Sp} durch Wärmedämmung des Unterbodens	15 %		17 %	
Faktor a gemäß EN 12977	0,048	0,041	0,045	0,037
Energieeffizienzklasse gemäß EU-Verordnung 811/2013	A	A	A	A+

Die Wärmeverluste der Funktionsmuster-Speicher sind nach dieser Betrachtung um den Faktor 3,3 bis 4,3 geringer als der maximal zulässige Wert gemäß /EN 12977-3:2012/. Die Speicher erreichen damit eine Energieeffizienzklasse zwischen A und A+.

Es ist zu erwarten, dass mit verbesserten Evakuierungsmethoden, wie der Evakuierung an mehreren Stellen des Volumens der Wärmedämmung und einer erweiterten Anwendung einer Zeolith-Falle, geringere Vakuumdrücke erreichbar sind. Dies führt zu einer weiteren Verbesserung der Wärmedämmung. Auch die Wärmebrücke des Fußrings kann durch eine geänderte Konstruktion und Materialauswahl verringert werden.

7.6 Alternatives Wärmedämmkonzept

Für die Entwicklung eines alternativen Wärmedämmkonzepts wurde von der Fa. Sirch ein Funktionsmuster-Speicher ohne zusätzliche Außenhülle gefertigt. An diesem sollte ein Wärmedämmkonzept erprobt werden, bei welchem die Wärmedämmung von einer flexiblen Außenhülle eingeschlossen wird. Das Dämmvolumen kann damit sowohl evakuiert, als auch mit einem Gas mit geringerer Kontinuums-WLF als Luft gefüllt werden. Im Falle der Evakuierung sind druckfeste, offenporige und formstabile Wärmedämmstoffe zu wählen, die bereits bei Vakuumdrücken zwischen 10 und 100 mbar eine geringe effektive Wärmeleitfähigkeit aufweisen. Dies gilt z. B. für die untersuchten Aerogelmatten /BIN01/. Zur Erprobung der Umsetzbarkeit des Konzepts wurden diese Aerogelmatten am Funktionsmuster-Speicher angebracht (siehe Abbildung 31, links). Danach wurde das Dämmvolumen mit einer Aluminium-Verbundfolie ummantelt, die mittels einer Silikonschicht zwischen Folie und Speicherwand und einer Schelle um die Folie an dieser Stelle luftdicht am Speichermantel befestigt wurde. Diese Folie wurde aufgrund ihres im Vergleich zu reinen Kunststoff-Folien sehr hohen Diffusionswiderstands ausgewählt. Eine Schlauchverbindung, die durch die Silikonschicht verlegt wurde, dient zum Anschluss einer Vakuumpumpe. Der Funktionsmuster-Speicher mit Folienumhüllung und evakuiertem Dämmvolumen ist in Abbildung 31, rechts zu sehen.



Abbildung 31. Funktionsmuster-Speicher mit Aerogelmatten-Umhüllung (links) und mit zusätzlicher Folienumhüllung und evakuierter Wärmedämmung (rechts)

Die Dichtheit dieses Funktionsmusters war für eine Vakuumwärmedämmung noch nicht ausreichend. Es wird jedoch erwartet, dass mit folgenden Verbesserungsmaßnahmen ein umsetzbares innovatives Wärmedämmkonzept mit evakuierbarer Folienumhüllung möglich ist:

Der Fußring sollte den gleichen Außendurchmesser wie die Wärmedämmung um den Speicheraußenmantel aufweisen. Damit könnte die Folie am Fußring angebracht werden, ohne dass es zu Knickbildung kommt. Die Evakuierung kann dann über einen Vakuumflansch am Fußring innen erfolgen. Dadurch ist keine Durchführung eines Schlauches durch die Silikonschicht notwendig. Zudem führen folgende Punkte zu einer Verbesserung und Dauerbeständigkeit der Dichtigkeit:

- Verbesserung der Dichtigkeit der Foliennähte durch geeignetere Schweißverfahren
- Vermeidung des Kontaktes der Folie mit scharfen Kanten
- Anbringung einer Schutzhülle außen um die Folie

Alternativ zu einer Vakuumwärmedämmung kann das Dämmvolumen aus vergleichsweise kostengünstigen Mineralwolle-Matten und einem Füllgas mit geringerer Kontinuums-WLF als Luft bestehen (z. B. Argon), das unter leichten Überdruck zur Umgebung eingebracht wird. Damit kann vergleichsweise kostengünstig eine guten Wärmedämmwirkung erreicht werden bei vergleichsweise geringen Ansprüchen an die Dichtigkeit der Hülle.

7.7 Zusammenfassung

Basierend auf den Erkenntnissen aus Kapitel 4 und 7, wird für das Funktionsmuster im Realmaßstab das Wärmedämmkonzept eines doppelwandigen Speichers mit Vakuumwärmedämmung ausgewählt. Als Wärmedämmstoff wird eine Mischung aus 70 Massenprozent gEP und 30 Massenprozent pKS eingesetzt. Diese Dämmstoffmischung wird gegenüber dem Wärmedämmstoff fEP bevorzugt, da die Mischung bei Drücken oberhalb 1 mbar niedrigere eff. WLF erreicht als fEP. Dies ist im Anwendungsfall vorteilhaft, da aufgrund der Erfahrungen zur Evakuierung ein Vakuumdruck unterhalb von 1 mbar nicht dauerhaft gewährleistet werden kann. Die Entscheidung gegen das Wärmedämmkonzept einer folienumhüllten Wärmedämmung wird im Wesentlichen damit begründet, dass an einem folienumhüllten Speicher eine transparente Wärmedämmung, die im Projekt untersucht werden soll, nicht geeignet angewendet werden kann.

8 Konzeptentwicklung, Planung und Fertigung des Funktionsmusters

In diesem Kapitel werden vorwiegend die Arbeitsinhalte zur Konzeption und Konstruktion sowie zur Fertigung des Funktionsmuster mit dem Wasservolumen von 12 m³ beschrieben. Bei der ebenfalls in diesem Zusammenhang erfolgten Konzeption der Speicherbaureihe wurde vor allem auf die Skalierungsfähigkeit des Funktionsmusters auf Standardmaße bei zukünftigen Serienspeichern geachtet.

8.1 Konzeption und Konstruktion des Funktionsmusters im Realmaßstab

Nach dem Bau der kleineren Funktionsmuster während des ersten Projektabschnitts (siehe Kapitel 7) für die Wärmeverlustmessungen und Füllversuche, konnten die gewonnen Erkenntnisse in den Bau des 12.000 Liter fassenden Speichers einfließen.

In diesem Teil des Projektes lag eine intensive Zusammenarbeit der Projektpartner vor. Die vom ITW aufgrund der Vorversuche gestellten Anforderungen bzw. Wünsche, vor allem für den Bereich der transparenten Wärmedämmung, bzgl. des Einbaus der Messtechnik sowie zu den Inneneinbauten wurden von Fa. Sirch umgesetzt. Zusätzlich ergab sich der Wunsch bzw. die Notwendigkeit aufgrund der Platzbedingungen im Fußring des Speichers die Last nur über die äußere Standzarge und nicht mehr über zusätzliche Füße zum Fundament zu übertragen. Insgesamt war der generelle Auslegungsprozess bezüglich der Festigkeit, der Standsicherheit und der sinnvollen Aufteilung der Fertigungsschritte ein sehr aufwendiger Arbeitsvorgang.

Grundsätzlich besteht der Vakuumspeicher (siehe Abbildung 32 und Abbildung 33) aus zwei ineinander liegenden Stahlspeichern mit ringförmigem Zwischenraum. Die einzige dauerhaft geschweißte

Verbindung zwischen den beiden Speichern ist der innere Fußring. Der Zwischenraum ist mit schüttfähigen Wärmedämmmaterial gefüllt und alle Anschlüsse werden im Inneren nach unten geführt.

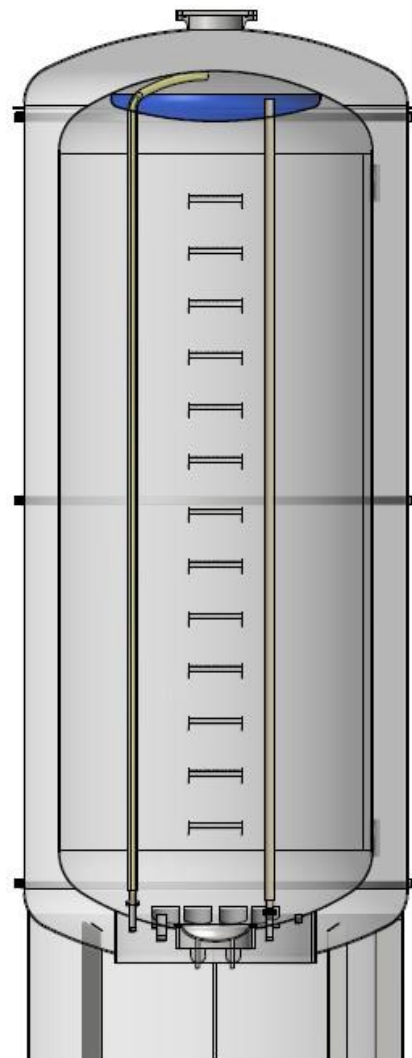


Abbildung 32. CAD-Zeichnung gesamter Vakuumspeicher

8.1.1 Innenspeicher

Die Auslegung des Innenspeichers ist unkritisch und entspricht im Wesentlichen der eines normalen Speichers, zuzüglich der Belastung von einem bar Druck durch den evakuierten Ringspalt. Die Auslegung der Böden und des Mantels folgt nach den Regeln der entsprechenden AD Merkblätter.

Die angewandten Berechnungsgrundlagen hierzu sind:

- Prüfdruck nach AD-2000 B0
- Zylinderschale nach AD-2000 B1
- Böden nach AD-2000 B3

Die Besonderheit beim Innenspeicher ist die Lagerung auf einem möglichst kleinen inneren Fußring, entgegen der Empfehlung der AD Merkblätter (Standzarge oder FüÙe). Eine genauere Beschreibung hierzu erfolgt im Kapitel Fußkonstruktion bzw. Bodengruppe.

8.1.2 Außenspeicher

Die statische Auslegung des Außenspeichers entspricht nicht der des Innenspeichers, da die Belastung nicht wie im normalen Fall von innen kommt, sondern von außen. Diese Belastung kann von Speichern, die bzgl. des Innendrucks berechnet sind, nicht aufgenommen werden.

Auftretende Unterdrücke führen bei Überdruckauslegung zum „Zusammenfallen“ des Speichers. Im Falle des Vakuumspeichers muss dieser Druck von außen (normaler Betriebsfall) durch den Außenspeicher (Speichermantel und Böden) aufgenommen werden und dies im Idealfall ohne Abstützung von innen.

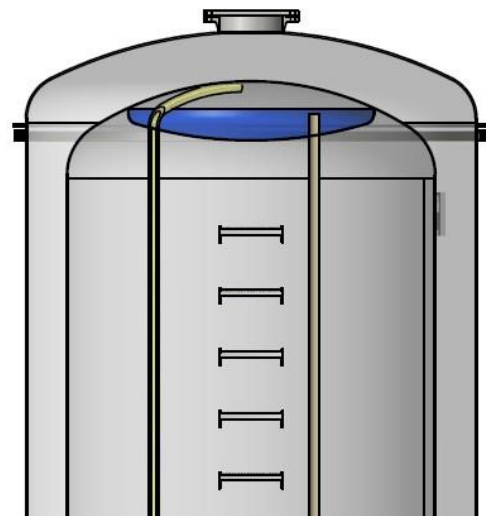


Abbildung 33. CAD-Zeichnung Vakuumspeicher
(Detail: oberer Speicherbereich)

Die angewandten Berechnungsgrundlagen sind:

- Prüfdruck nach AD-2000 B0
- Zylinderschale unter äußerem Überdruck nach AD-2000 B6
- Verstärkung des Mantels mit Versteifungsringen zur Reduzierung der Blechstärke.
Der Nachweis ist nach AD Blättern nicht möglich und wurde extra angefertigt.
- Böden nach AD-2000 B3
- Kran Ösen nach EN1607
- Windlast nach DIN 1055-4
- Biegemoment zur Aufstellung nach EN1614

8.1.3 Fußkonstruktion bzw. Bodengruppe

Die statische Auslegung der Bodengruppe (siehe Abbildung 34) ist wesentlich aufwendiger als die bisher durchgeführten Berechnungen und kann nur sehr eingeschränkt nach klassischen Regelwerken erfolgen. Manche Komponenten, z.B. der innere Fußring, können damit nicht berechnet werden. Die Bodengruppe besteht aus den Hauptbestandteilen Standzarge (äußerer Fußring), Böden (innen und außen) und innerem Fußring, der die beiden Böden miteinander verbindet. Der innere Fußring ist die Grenze der Vakuumdämmung und innerhalb dieses Ringes werden alle Anschlüsse nach außen bzw. unten geführt. Zusätzlich befindet sich dort das Mannloch.

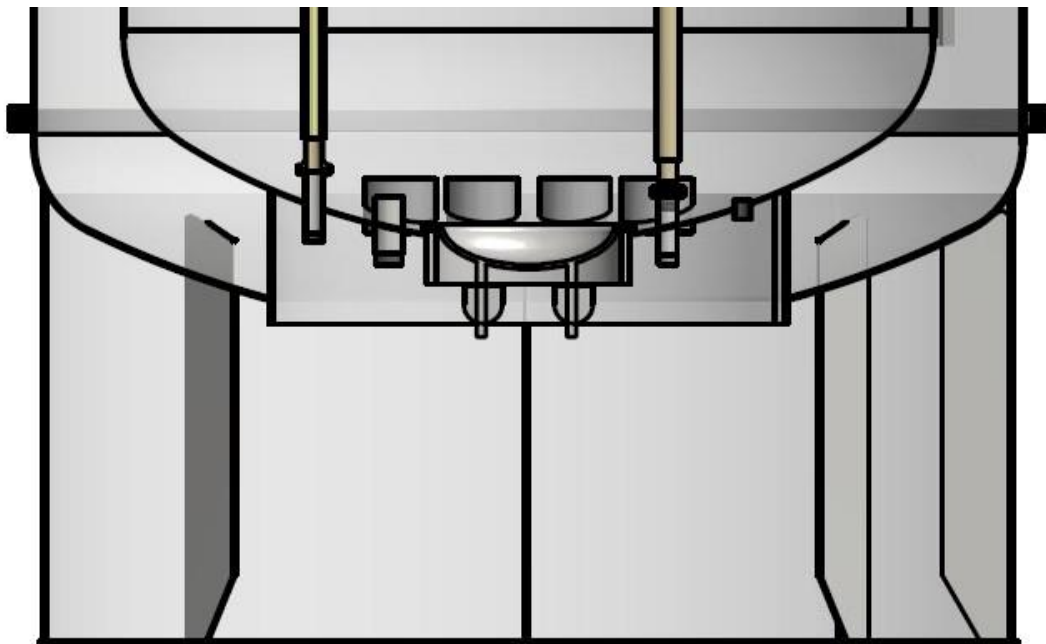


Abbildung 34. CAD-Zeichnung Vakuumspeicher (Detail: Bodengruppe)

8.1.3.1 Standzarge

Das komplette Gewicht des Speichers inkl. der Wasserfüllung wird über den äußeren Fußring bzw. die Standzarge aufgenommen und mit einem Flacheisen als Auflagefläche auf das Fundament übertragen. Beim Funktionsmuster für den Außenspeicherprüfstand ist der Bereich des inneren Fußrings konventionell wärmegeklämt, die Standzarge selbst ist nach außen nicht wärmegeklämt. Die Messergebnisse haben jedoch gezeigt, dass in diesem Bereich deutliche Wärmeverluste auftreten. Bei zukünftigen Vakuumspeichern werden daher nicht nur der Bereich des Mannloches, sondern zusätzlich die komplette Standzarge nach außen wärmegeklämt, so dass im Inneren der Standzarge (Begehungsbereich) nicht mehr die Umgebungslufttemperatur vorherrscht und dadurch die Temperaturdifferenz im Bereich des Mannloches und damit auch die Wärmeverluste, reduziert werden.

Die angewandten Berechnungsgrundlagen sind:

- Anschluss Standzarge nach AD-2000 S3/1
- Stabilitätsnachweis mit Ausschnitt nach DIN 18800

8.1.3.2 Böden innen und außen

Die oberen Böden werden nach den oben genannten Regelwerken für den Innen- und Außenspeicher berechnet. Die unteren Böden müssen zusätzlich zum inneren bzw. äußeren Druck die Gewichtskraft der Wasserfüllung aufnehmen und geben zusammen mit dem inneren Fußring die stabile Basis für die Konstruktion. Durch diese Anforderungen sind die unteren Böden deutlich stärker ausgeführt als die oberen. Die Verbindung zwischen den Böden wird durch den sog. inneren Fußring ausgeführt.

8.1.3.3 Innerer Fußring

Die einzige Verbindung zwischen Innen- und Außenspeicher ist der innere Fußring. Zur Reduzierung der Wärmeverluste bzw. Wärmebrücken wird dieser aus Edelstahl ausgeführt. Auch wenn die Ausführung bzgl. der Schweißtechnik eine größere Herausforderung darstellt, lohnt sich der Aufwand durch reduzierte Wärmeverluste. Wenn es die Geometrie zulässt, wird die Höhe des Fußrings zur Reduzierung von Wärmeverlusten vergrößert.

Bei der Auslegung des inneren Fußrings sind die Anforderungen an die Statik und an die Reduktion der Wärmeverluste gegenläufig. Von Seiten der Statik wäre ein sehr großer Durchmesser von Vorteil, aus der Sicht der Wärmedämmung bzw. zur Minimierung der Wärmeverluste sollte er so klein wie möglich sein, gerade so groß, dass alle Anschlüsse und die dauerhafte Begehung (siehe unten) vorgesehen werden können. Der rechnerische Nachweis der Statik erfolgte durch ein Finite-Elemente-Methoden-Modell (FEM-Modell) der kompletten Bodengruppe. Insgesamt umfasst die Typenstatik des Vakuumspeichers ca. 40 Seiten.

8.1.3.4 Dauerhafte Begehung bzw. Base Connection

Ein sehr wichtiger Bestandteil der Bodengruppe und des gesamten Vakuumspeichers ist die dauerhafte Begehungsmöglichkeit in Form eines Mannloches. Die Standzarge besitzt eine Klappe von außen und innerhalb einen freien Bodenabstand von 750 mm. Energiespeicher in dieser Größenordnung sollten nicht nur für die typische Lebensdauer eines Heizungssystems ausgelegt sein. Wenn z.B. nach 20 Jahren das Heizsystem bzw. die Systemtechnik geändert wird, kann durch die Begehung auch die nötige Schichtbeladetechnik erweitert oder ausgetauscht werden. Hierfür ist im Inneren des Speichers eine Leiter integriert, die über das Mannloch im Speicherboden zugänglich ist (siehe Abbildung 35). Alle Anschlüsse sind zum Boden geführt, damit der Vakuumraum der Wärmedämmung frei von Durchdringungen bzw. Wärmebrücken ist.

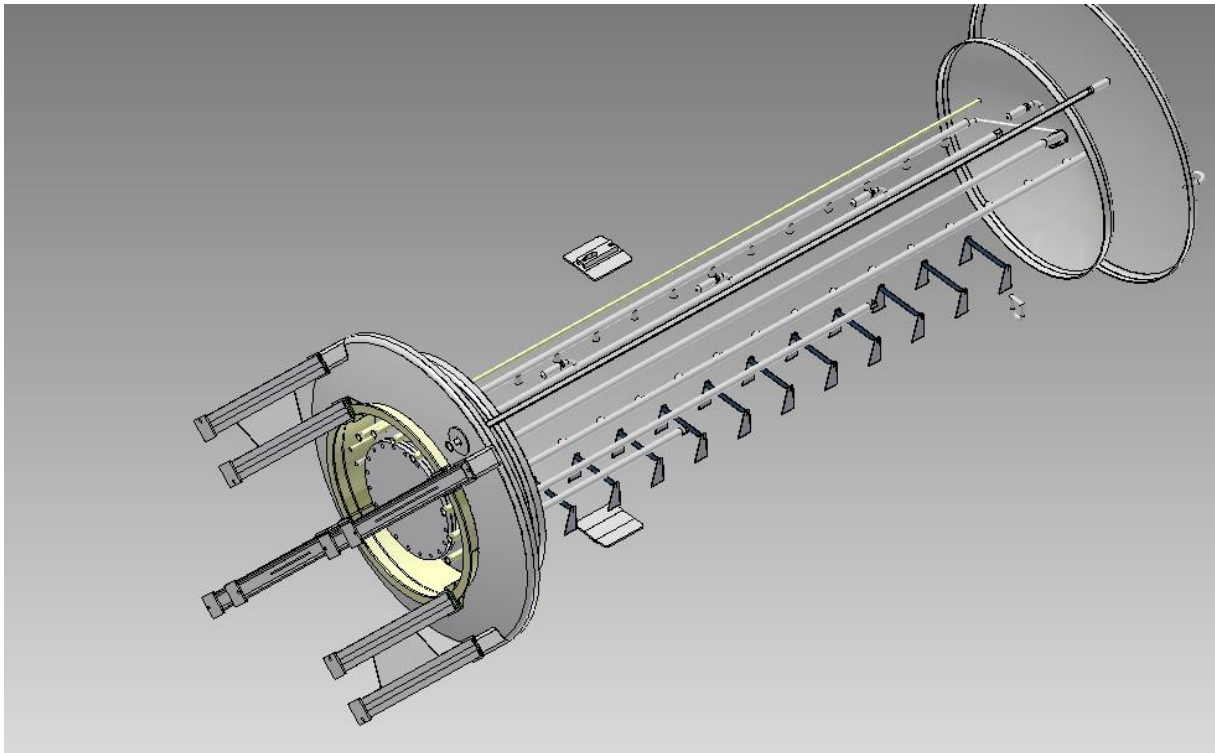


Abbildung 35. CAD Zeichnung der Wartungsmöglichkeit über die sog. Base Connection

8.1.4 Füllen des Vakuumraumes mit der Materialmischung

Die Ergebnisse der Voruntersuchungen zeigen die Notwendigkeit den Ringspalt der Wärmedämmung des Funktionsmusters mit einer Mischung aus Perlit und Kieselsäure zu füllen. Perlit ist ein gut schüttfähiges Material, während Kieselsäure zur Klumpenbildung neigt. Zur gleichmäßigen Materialmischung müssen diese Klumpen zerstört werden.



Abbildung 36. Perlit und Kieselsäure ohne Behandlung (links) und Perlit und Kieselsäure nach mechanischer Mischung (rechts)

Versuche im kleinen Maßstab haben gezeigt, dass eine rein mechanische Mischung durch Erschütterungen nicht ausreicht um die Klumpenbildung aufzulösen. Ein Vergleich der Klumpenbildung bei der Mischung Perlit und Kieselsäure mit und ohne mechanische

Mischung ist in Abbildung 36 dargestellt. Abgesehen davon, wäre dies bei einem Speicher mit 2,2 m Durchmesser, einer Höhe von ca. 6 m und mehreren Tonnen Gewicht nur mit unverhältnismäßig großem Aufwand möglich.

Zur Entwicklung und Erprobung anderer Verfahren der Mischung wurde ein Schnittmodell, das in Abbildung 37 links dargestellt ist, mit ähnlichem Durchmesser und ähnlichem Ringspalt (im Vergleich zum Funktionsmuster) bzw. transparenter Abdeckung gebaut.



Abbildung 37. Schnittmodell (links) und Schnittmodell mit unbehandelter Mischung (rechts)

Ein Bestandteil der Füllversuche war das Einblasen des Materials in das Schnittmodell bzw. Speichersegment. Diese Methode zeigte bezüglich der Befüllung und der Klumpenzerstörung gute Ergebnisse. Der Verlauf eines exemplarischen Füllversuchs ist in Abbildung 38 und Abbildung 39 in Form einer Bilderreihe dargestellt. Das Ergebnis der Vorversuche war die Identifikation eines geeigneten Verfahrens zur gleichmäßigen Mischung und Füllung des Speichers mit der Materialmischung.

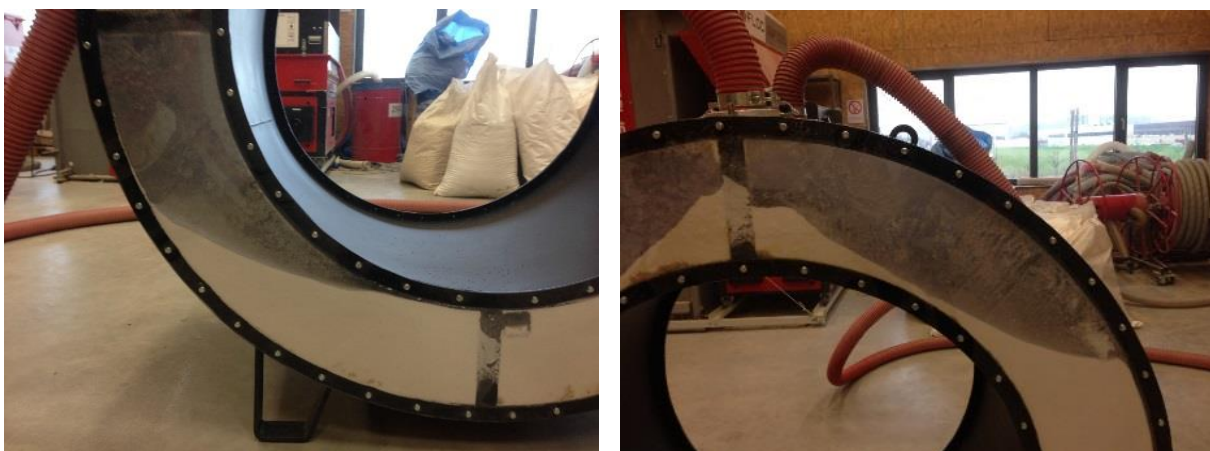


Abbildung 38. Schnittmodell; beginnender Füllversuch (links) und weiterer Verlauf des Füllversuchs (rechts)



Abbildung 39. Schnittmodell, endender Füllversuch (links) und vollständig gefülltes Schnittmodell (rechts)

8.1.5 Befestigungen Transparente Wärmedämmung

In Abstimmung mit dem Glashersteller wurde die transparente Wärmedämmung auf U-Profilen am Speichermantel befestigt. Auf die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten wurde mit entsprechenden Ausgleichslängen innerhalb der Profile Rücksicht genommen.

8.2 Fertigung Funktionsmuster

Auf Basis der Konzeption und durchgeführter Berechnungen wurden nun die einzelnen Komponenten des Vakuumspeichers gefertigt und zum Funktionsmuster zusammengebaut.

8.2.1 Fertigung Fußkonstruktion bzw. Bodengruppe

Die Fertigung wurde mit der sehr aufwendigen und zeitintensiven Herstellung der Bodengruppe (siehe Abbildung 40 und Abbildung 41) begonnen. Die Böden werden ausgerichtet, Hilfsösen montiert, die nötigen Durchbrüche angezeichnet und ausgebrannt.



Abbildung 40. Fertigungsverfahren, Ausrichten der Böden (links) und ausbrennen der Durchbrüche (rechts)



Abbildung 41. Fertigungsvorgang, Herstellung der Anschlussmuffen (links) und fertige Bodengruppe (rechts)

8.2.2 Fertigung Innenspeicher

Die Anlieferung des Bleches für den Innenspeicher erfolgt als plane Tafel mit ausgesuchter Stärke und Güte. Im Falle des Funktionsmusters bzw. Prototypen wurde S235JR (früher ST37) mit 8 mm Stärke für den inneren und 10mm Stärke für den äußeren Speichermantel verwendet. Die Blechtafeln werden auf das benötigte Maß geschnitten und anschließend auf den gewünschten Durchmesser gerundet. Der Rundungsvorgang ist in Abbildung 42 dargestellt.



Abbildung 42. Rundungsvorgang des Mantels (links) und Walze mit gerundetem Mantel (rechts)

Ausgewählte Inneneinbauten, wie z. B. die Trittstufen für die Begehungsmöglichkeit, wurden in diesem frühen Fertigungsstadium ebenfalls bereits eingebaut. Der obere Boden wird anschließend auf den oberen Mantelschuss verschweißt und der untere Boden wird mit der Bodengruppe, wie oben beschrieben, zusammengeführt. Danach erfolgt die Verbindung zwischen der im ersten Schritt gefertigten Bodengruppe und den Einzelteilen des Innenspeichers zum fertigen Innenspeicher mit Bodengruppe (siehe Abbildung 43 und Abbildung 44).

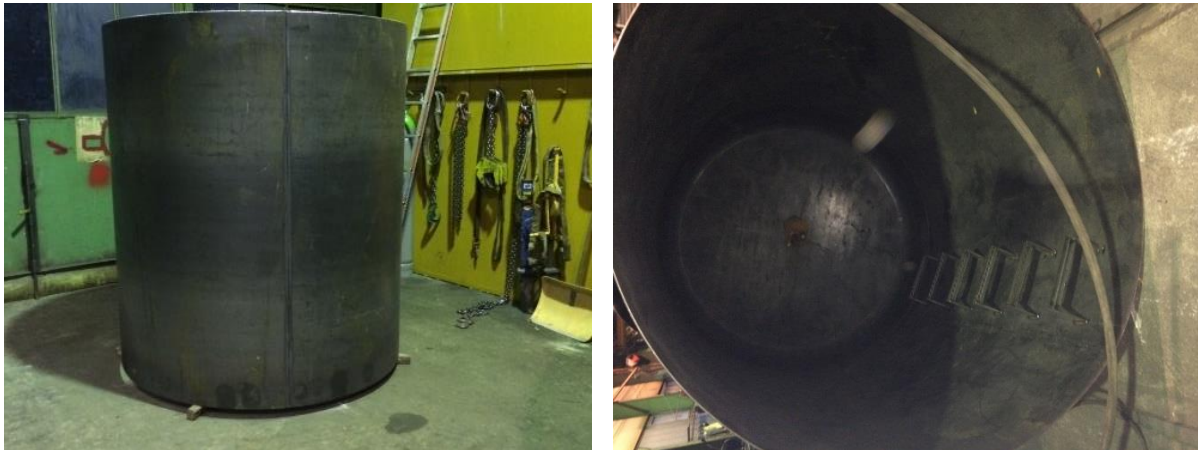


Abbildung 43. Geschweißter Mantelschuss (links) und Innenspeicher mit Leiterstufen (rechts)



Abbildung 44. Bodengruppe auf Mantelschuss (links) und Bodengruppe mit Innenspeicher (rechts)

8.2.3 Fertigung Außenspeicher

Die Fertigung des Außenspeichers erfolgt, wie oben beschrieben, wie die beim Innenspeicher. Alle Mantelschüsse und der obere Boden werden innen und außen verschweißt. Je nach Durchmesser und aus der Berechnung ermittelten Blechstärke werden am Außenspeicher U-Profile zur Verstärkung gegen die Beulwirkung aufgeschweißt.

8.2.4 Zusammenführen

Mittels Kränen wird im Anschluss an die oben beschriebenen Arbeitsschritte der Innenspeicher mitsamt der Bodengruppe in den Außenspeicher geschoben und die letzte Schweißnaht ausgeführt. Das Einschieben des Innenspeichers ist in Abbildung 45 dargestellt. Alle Inneneinbauten, die nicht im Vorfeld montiert werden konnten, wie z. B. Rohrleitungen mit Anschluss nach außen, werden nun ausgeführt.



Abbildung 45. Einschieben des Innenspeichers

8.2.5 Füllen

Nach den Ergebnissen der Vorversuche zum Füllen wurde eine Maschine zum Mischen der beiden Komponenten des Füllmaterials konstruiert und gebaut (siehe Abbildung 46). In dieser Maschine werden die Klumpen der Kieselsäure aufgelöst und die beiden Komponenten gleichmäßig miteinander vermischt. Der Aufwand für das Füllen des Speichers ist durch die zu erstellende Mischung im Vergleich zu einem Reinstoff höher.

Der Speicher wird im Anschluss an das Herstellen der Mischung mit dieser von oben gefüllt. Das Hauptproblem hierbei ist die hohe Staubentwicklung durch das Perlit und vor allem durch die Kieselsäure. Alle zuvor verwendeten Filter waren nicht in der Lage die Kieselsäure zurückzuhalten. Mit neuen Filtermaterialien ist dies jedoch gelungen.

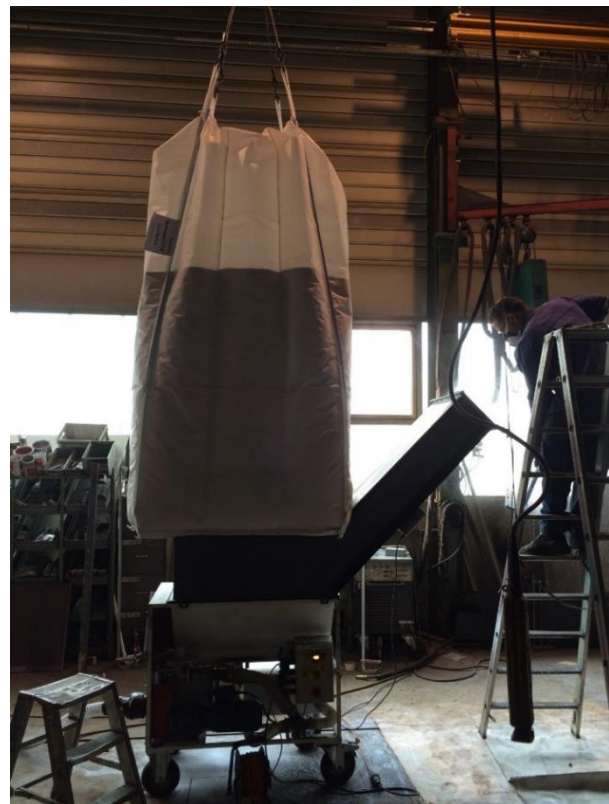


Abbildung 46. Maschine zur Erstellung der Mischung

8.2.6 Vorbereitung TWD

Wie oben beschrieben, werden die Klemmhalterungen auf einem umlaufenden U-Profil befestigt und mit Dichtungslippen versehen. Zwischen den Glasscheiben werden H-Dichtungen aus Kunststoff zur Abdichtung verwendet. Ein gerundetes Flacheisen oben

dient als Tropfkante bei Regen. Diese Konstruktion verhindert das Eindringen von Wasser zwischen Glasscheibe und Speicheraußenmantel. Die Position der Tropfkante am Deckel des Speichers ist in Abbildung 47 gezeigt.



Abbildung 47. Tropfkante (markiert mit weißem Pfeil) mit darunter positioniertem U-Ring

8.2.7 Lackierung

Im Unterschied zu Speichern mit konventioneller Wärmedämmung bzw. ohne transparente Wärmedämmung muss der Lack bei diesem Funktionsmuster gegen vergleichsweise hohe Temperaturen beständig sein. Der ausgewählte Lack ist beständig für dauerhafte Temperaturen von 180 °C. Der komplette Speicher wurde sandgestrahlt und im Anschluss mit diesem Speziallack beschichtet (siehe Abbildung 48).



Abbildung 48. Funktionsmuster mit Speziallack beschichtet

Nach dem ersten Winter im Betrieb am Außenspeicherprüfstand des ITW/TZS mit dieser neuen Konstruktion hat sich gezeigt, dass die Konzeption und Konstruktion der transparenten Wärmedämmung erfolgreich war. Diese ist innen trocken, die Glasscheiben sind nicht oder nur geringfügig verschmutzt und der Lack ohne sichtbare Beschädigungen.

9 Untersuchung der Basisvariante des Funktionsmusters

Die Basisvariante des Funktionsmusters, deren Fertigung im vorangegangenen Kapitel 8 beschrieben ist, hat ein Wasservolumen von 12 m^3 . Sie wurde über den Zeitraum eines Jahres an dem innerhalb dieses Vorhabens ebenfalls neu aufgebauten Außenspeicherprüfstand des Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS) am ITW untersucht. Es standen der Transfer von Untersuchungserkenntnissen aus dem Labor- und Technikumsmaßstab zum Realmaßstab und die Quantifizierung des positiven Einflusses der Wärmedämmtechnologien transparente Wärmedämmung und Vakuumwärmedämmung bzw. der Kombination einer aktiven und mehrerer passiven SBE im Vordergrund. Darüber hinaus fand eine Identifikation, Umsetzung und Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen an der Basisvariante des Funktionsmusters statt. Weiterhin wurden die erfassten Messdaten als Basis für die mathematische Modellierung des Funktionsmusters in Kapitel 10 und die Entwicklung eines Abnahmeverfahrens in Kapitel 11 verwendet.

9.1 Prüfstand für außenaufgestellte Warmwasserspeicher

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde speziell für die Untersuchung von großen außenaufgestellten Warmwasserspeichern ein innovativer Außenprüfstand errichtet. Abbildung 49 zeigt das Funktionsmuster aus Kapitel 8 am neu aufgebauten Außenspeicherprüfstand. Dieser besteht aus einem betonierten Fundament mit einer Grundfläche von 36 m^2 , einem erdvergrabenen Schacht zum hydraulischen Anschluss des Funktionsmusters und mehreren Übergabestationen zum Anschluss der Messsensoren. Am Außenspeicherprüfstand stehen zwei getrennte hydraulische Kreise zum direkten Be- und Entladen von Warmwasserspeichern zur Verfügung. In einer nahegelegenen Heizzentrale erfolgt die Temperierung und Druckhaltung der hydraulischen Kreise und die Messdatenerfassung. Die hydraulische und messtechnische Anbindung des Prüfstands an die Heizzentrale erfolgt durch erdvergrabene Fernwärmeleitungen und Datenleitungen. Einen Überblick über die im folgenden relevanten Messsensoren inkl. der max. Abweichung gibt Tabelle 10. Weitere Informationen zu den Temperatursensoren auf der Außenoberfläche des Funktionsmusters sind in Anhang D zusammengefasst. Die Werte aller Messsensoren werden mit Digitalmultimetern mit Messstellenumschaltung erfasst.

Die Anlieferung und die Aufstellung des Funktionsmusters am Prüfstand zeigt eine Bilderfolge im Anhang B. Je nach Speicherabmessungen sind ein oder zwei Kräne zur Aufstellung erforderlich. Durch die bereits ab Werk fertiggestellte Vakuumwärmedämmung (inkl. Qualitätskontrolle) sind nach der Speicheraanlieferung, Speicheraufstellung und Speicherbodenverankerung bzw. dem hydraulischen und elektrischem Anschluss des Speichers keine weiteren Arbeitsschritte vor Ort notwendig. Eine Ausnahme hiervon bildet die nachträgliche Anbringung der transparenten Wärmedämmung. Im Vergleich zu einer konventionellen Wärmedämmung reduziert sich durch die nicht notwendige Montage der Wärmedämmung vor Ort die Gefahr von Montagefehlern.

In Abbildung 50 werden die im Folgenden relevanten technologischen Eigenschaften des Funktionsmusters und des Außenprüfstandes erläutert. Die Tabelle 9 fasst die wichtigsten geometrischen Eigenschaften des Funktionsmusters zusammen. Eine detaillierte Erläuterung der einzelnen Technologien befindet sich in den Kapiteln 9.2 bis 9.4.



Abbildung 49. Lichtbildaufnahme des Funktionsmusters am neu aufgebauten Außenspeicherprüfstand des Forschungs- und Testzentrums für Solaranlagen (TZS) am Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik (ITW) der Universität Stuttgart

Tabelle 9. Geometrische und technologische Kenngrößen des Funktionsmusters

Kenngröße	Bedeutung
$V_{Sp} = 12,0 \text{ m}^3$	Wasservolumen des Speichers
$d_{i,Sp} = 1,8 \text{ m}$	Innendurchmesser des inneren Speicherbehälters (ohne Berücksichtigung der Mantelblechdicke und unter Vernachlässigung der Klöpperböden)
$m_{Sp} = 3500 \text{ kg}$	ca. Gewicht des Speichers (nicht befüllt)
$h_{i,Sp} = 5,0 \text{ m}$	Höhe des inneren Speicherbehälters (ohne Berücksichtigung der Mantelblechdicke)
$h_{FR} = 1,0 \text{ m}$	Höhe des Fußrings
$s_{VWD} = 0,2 \text{ m}$	Dämmstärke der Vakuumdämmung (ohne Berücksichtigung der Mantelblechdicke)
$h_{a,Sp} = 6,1 \text{ m}$	Gesamtaußenhöhe des Speichers

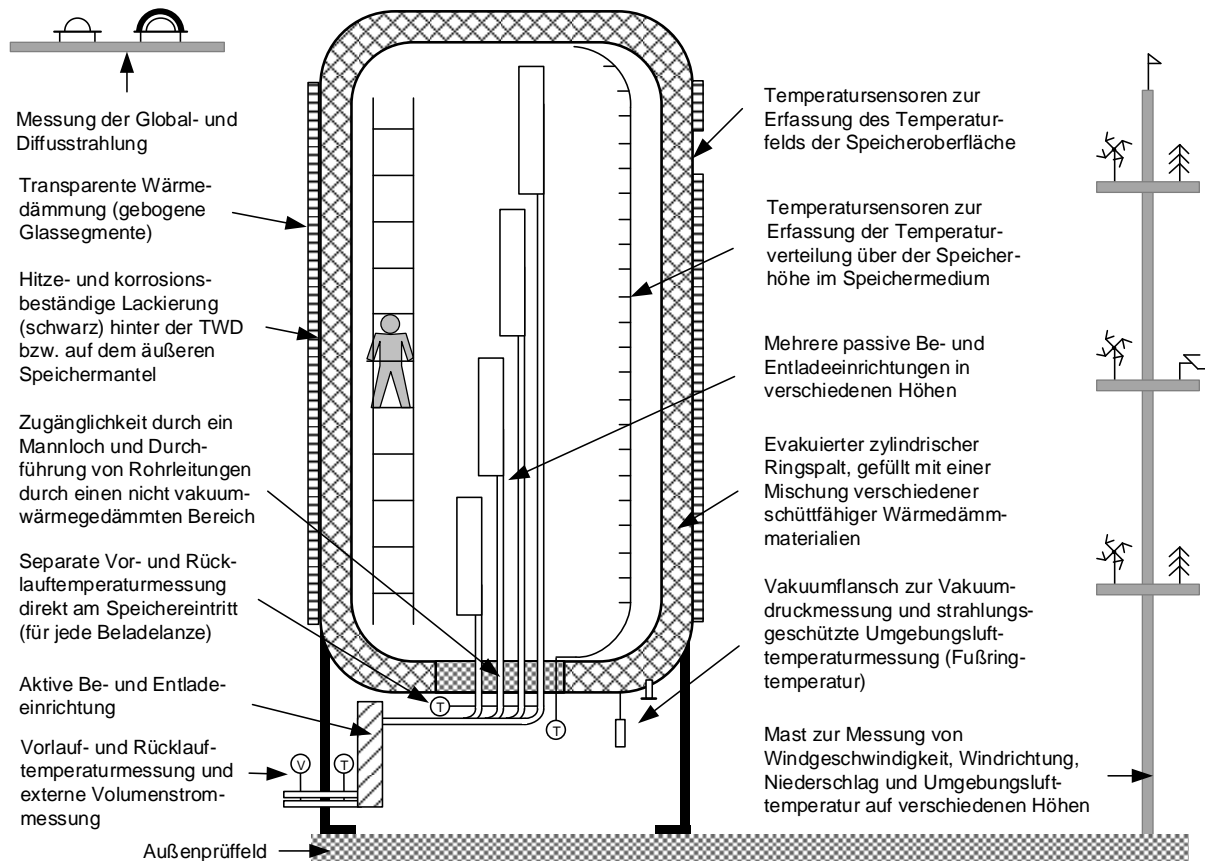


Abbildung 50. Schematisch dargestelltes Funktionsmuster inkl. Erläuterung zu ausgewählten Komponenten des Funktionsmusters und der messtechnischen Ausstattung des Außenspeicherprüfstandes

Tabelle 10. Erläuterung relevanter Messsensoren am Außenspeicherprüfstand

Art der Messung	Anzahl	max. Abweichung	Ort
Oberflächentemperaturmessung am äußeren Speichermantel (Pt100)	30	$\Delta\vartheta = \pm 0,27 \text{ K}$	Verteilt über den äußeren Speichermantel
Temperaturmessung im Speichermedium (Pt100)	45	$\Delta\vartheta = \pm 0,35 \text{ K}$	Äquidistant verteilt über die Speicherhöhe (Abstand: 100 mm)
Vorlauf- und Rücklauf-temperaturmessung (Pt100)	7	$\Delta\vartheta = \pm 0,15 \text{ K}$	Aktive SBE bzw. einzelne Beladelenzen
Messung der Umgebungslufttemperatur (Pt100)	2	$\Delta\vartheta = \pm 0,27 \text{ K}$	Mast des Außenprüfstandes bzw. am Messtechnikschaltschrank
Messung der Umgebungslufttemperatur im Fußring (Pt100)	1	$\Delta\vartheta = \pm 0,15 \text{ K}$	Freihängend und strahlungsgeschützt im Fußring
Druckmessung im zylindrischen Ringspalt der Vakuumdämmung	2	$\Delta p/p = \pm 15 \%$	Vakuumflansch am Speicherboden
Global- und Diffusstrahlungsleistung (horizontal)	je 1	$\Delta \dot{G}/\dot{G} = \pm 1,5 \%$ ¹	Dach eines nebenstehenden Gebäudes
Volumenstrommessung in den hydraulischen Kreisläufen (MID)	3	$\Delta \dot{V} = \pm 8,1 \text{ l/h}$	Heizzentrale (jeweils im hydraulischem Rücklauf)
Windgeschwindigkeit in der Horizontalen	3	$\Delta w = \pm 0,2 \text{ m/s}$	Mast des Außenprüfstandes (auf verschiedenen Ebenen)
Niederschlagsintensität	1	$\Delta n/n = \pm 2 \%$	Mast des Außenprüfstandes

¹ gilt für Strahlungsleistungen bei 500 W/m²

9.2 Untersuchung der Vakuumwärmedämmung

Die Vakuumwärmedämmung umschließt den Innentank des Funktionsmusters vollständig, mit Ausnahme des Bodenbereichs, bei dem eine kreisrunde Fläche mit einem Durchmesser von 1,15 m ohne Wärmedämmung vorliegt. Dieser Bereich beinhaltet das Mannloch als Einstieg in den Innentank und die hydraulischen Durchführungen der Beladelanzen, der Vor- und Rückläufe und der Entlüftungsleitung. Darüber hinaus befinden sich vier Durchbrüche im nicht wärmegeprägten Bodenbereich, welche die Durchführung von Messleitungen mit Hilfe von Dichtungseinsätzen (siehe Kapitel 7.4) ermöglichen. Im Mantelbereich besteht die Vakuumwärmedämmung aus einem koaxialen, zylindrischen Doppelmantelblech, das mit einer pulverförmigen Dämmmaterialmischung gefüllt ist und eine Dämmstärke von 200 mm besitzt. Im Boden und Deckelbereich resultiert der Abstand zwischen Innentank und Außentank aus der Wahl der Größe der Klöpperböden, welcher im Falle des Deckels des Funktionsmusters in etwa 235 mm entspricht. Die pulverförmige Dämmmaterialmischung besteht zu 30 Massenprozent aus pyrogener Kieselsäure und zu 70 Massenprozent aus grobkörnigen, expandierten Perlit. Die homogene Materialmischung besitzt im Ringraum eine mittlere Schüttdichte von 62 kg/m³.

Die Temperaturmessung im Speichermedium erfolgt mit biegbaren Mantel-Widerstandstemperatursensoren, deren Anschlussleitungen über die in Kapitel 7.4 untersuchten Dichtungseinsätze im Speicherboden aus dem Speicher geführt werden. Die Hülsen der vertikal angeordneten Temperatursensoren sind im Speichermedium horizontal orientiert. Ein eventuell innerhalb des Speichermediums auftretender horizontaler Temperaturgradient wird nicht messtechnisch erfasst und daher auch nicht berücksichtigt. Die Qualität der Vakuumwärmedämmung des Funktionsmusters wird im Folgenden mit Hilfe von Auskühlversuchen (siehe Abbildung 51) bewertet.

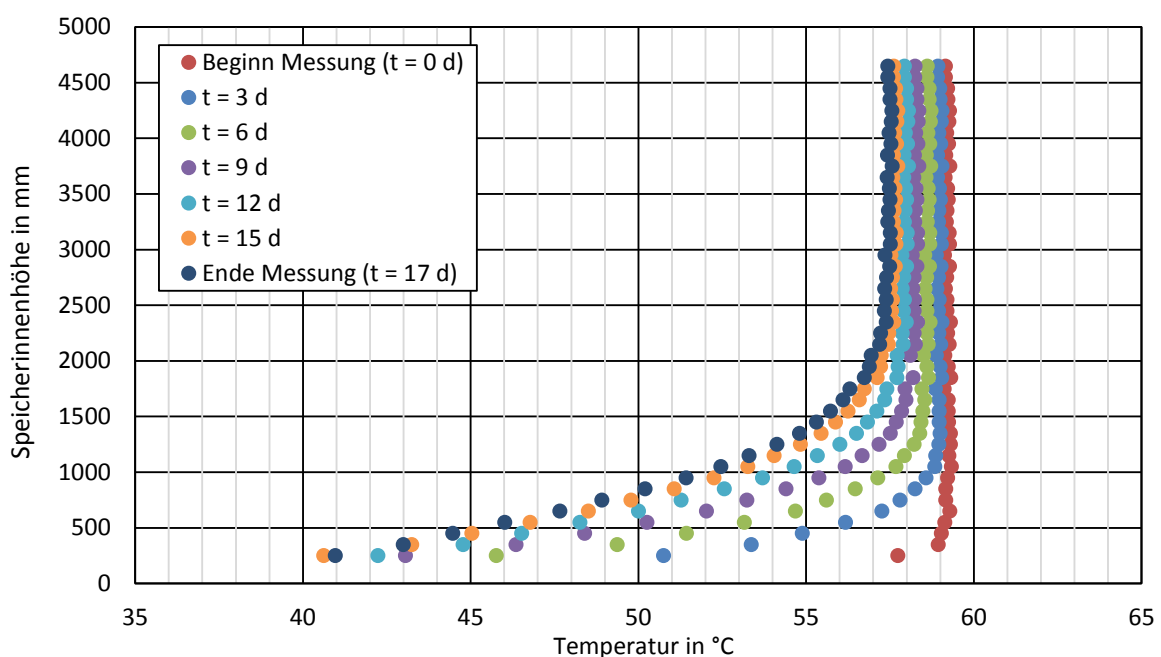


Abbildung 51. Auskühlversuch mit homogener Starttemperatur; Temperaturverteilung im Funktionsmuster über der Speicherhöhe als Funktion von der Auskühldauer in Tagen

In Abbildung 51 sind die Temperaturen des Speichermediums als Funktion von der Höhe des inneren Speicherbehälters aufgetragen.

Die Versuchsdauer umfasst einen Zeitraum von 17 Tagen ohne aktive Be- und Entladung des Funktionsmusters. Die mittlere Umgebungslufttemperatur in diesem Zeitraum beträgt $18,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die über die Versuchsdauer gemittelte Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebungslufttemperatur beträgt $38,0\text{ K}$. Es zeigt sich, dass eine im Vergleich zur Temperaturabnahme im oberen Speicherbereich starke Temperaturabnahme im unteren Speicherbereich stattfindet. Dies ist auf den nicht wärmegeprägten Bodenbereich zurückzuführen. Diese im Vergleich zur restlichen Wärmedämmung offensichtlich dominante Wärmebrücke wird in Kapitel 9.5 mit Hilfe von zusätzlichen Auskühlversuchungen und Simulationsstudien weiter untersucht. Es kann an dieser Stelle angenommen werden, dass das thermische Verhalten des Funktionsmusters durch die Anbringung einer konventionellen Wärmedämmung im Bodenbereich signifikant verbessert werden kann.

Im oberen Speicherbereich findet eine weniger starke und über die Höhe annähernd konstante Temperaturabnahme statt. Eine durch die größere Oberfläche des Deckelsegments stärkere dauerhafte Temperaturannahme im Bereich des Deckels findet nicht statt, da die daraus resultierende Temperaturinversion keinen stabilen Schichtungszustand des Speichermediums Wasser darstellt, welcher im Falle seines Auftretens durch makroskopische Vermischungsvorgänge in eine annähernd homogene vertikale Temperaturverteilung umgeschichtet wird. Die Temperaturabnahme im Bodenbereich breitet sich durch Wärmeleitung im Speichermedium Wasser und in der Behälterwand sowie in den Speichereinbauten in höher gelegene Schichten aus. Nach 17 Tagen erreicht diese Beeinflussung in etwa die Mitte des Speichers. Eine über die gesamte Speicherhöhe gemittelte Auskühlrate für den betrachteten Zeitraum beträgt $0,25\text{ K/d}$. Wird ausschließlich die obere Speicherhälfte berücksichtigt, die nicht durch die Wärmebrücke im Boden beeinflusst wird, so wird eine Auskühlrate von $0,1\text{ K/d}$ erreicht.

Weiterhin fällt in Abbildung 51 auf, dass die in einer Höhe von 250 mm gemessene, unterste Speichertemperatur am letzten Versuchstag wieder zunimmt. Dieses Verhalten lässt sich zum einen darauf zurückführen, dass solare Gewinne an der äußeren Fußringoberfläche bzw. der transparenten Wärmedämmung zu einer Erhöhung der Speicherbodentemperatur und dadurch zu einer Erwärmung der untersten Wasserschicht führen. Zum anderen treten durch den sich aufgrund der solaren Einstrahlung ausbildenden Temperaturgradienten im unteren Speicherbereich interne Wärmeströme im Speichermedium auf, die diese Temperaturzunahme erklären.

Die Ergebnisse eines Auskühlversuchs für einen thermisch geschichteten Ausgangszustand sind in Abbildung 52 dargestellt. Die anfängliche Temperaturverteilung über die Speicherhöhe zeigt zwei Temperatursprünge, die typisch für den Betriebszustand eines solarthermischen Warmwasserspeichers sind. Der Temperatursprung im unteren Speicherbereich ist deutlicher ausgeprägt als der im oberen Speicherbereich.

Die über die gesamte Speicherhöhe gemittelte Auskühlrate des Speichers beträgt 0,20 K/d bei einer mittleren Außentemperatur von 21,0 °C. Die über die Versuchsdauer gemittelte Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebungslufttemperatur beträgt 40,3 K. Es zeigt sich besonders im Deckelbereich und im Bereich $750 \text{ mm} < h_i < 1750 \text{ mm}$ eine verstärkte Temperaturabnahme. Erwartungsgemäß und entsprechend des thermischen Verhaltens des Funktionsmusters in Abbildung 52 bildet sich trotz der größeren wärmeübertragenden Fläche im Deckelbereich keine Temperaturinversion aus. Stattdessen resultiert im oberen Speicherbereich eine über die Höhe annähernd konstante Temperaturverteilung. Die Gründe hierfür wurden bereits in Zusammenhang mit den Ausführungen zu Abbildung 51 erläutert. Im Bodenbereich treten negative Auskühlraten auf, die wieder auf solare Gewinne am Fußring und der TWD bzw. interne vertikale Wärmeströme im Speichermedium hindeuten. Auffällig ist weiterhin, dass im Bereich der Speichermitte ($2250 \text{ mm} < h_i < 3250 \text{ mm}$) im Vergleich eine sehr niedrige mittlere Auskühlrate von 0,06 K/d vorliegt. Das gegenüber dem Versuch mit homogener Starttemperatur abweichende Verhalten der Auskühlraten lässt sich auf den verstärkten Einfluss der Wärmeleitung bzw. des Wärmetransports zwischen einzelnen Speicherbereichen zurückführen. Diese führt zu einem bevorzugten Abbau der größten Temperaturgradienten innerhalb des Speichermediums

Auf den Aspekt, dass bei großvolumigen und außenaufgestellten Warmwasserspeichern die Bilanzierung von Wärmeströmen innerhalb des Speichermediums bzw. der Bilanzierung solarer Gewinne eine erhöhte Bedeutung zukommt, wird in Kapitel 10 und Kapitel 11 eingegangen.

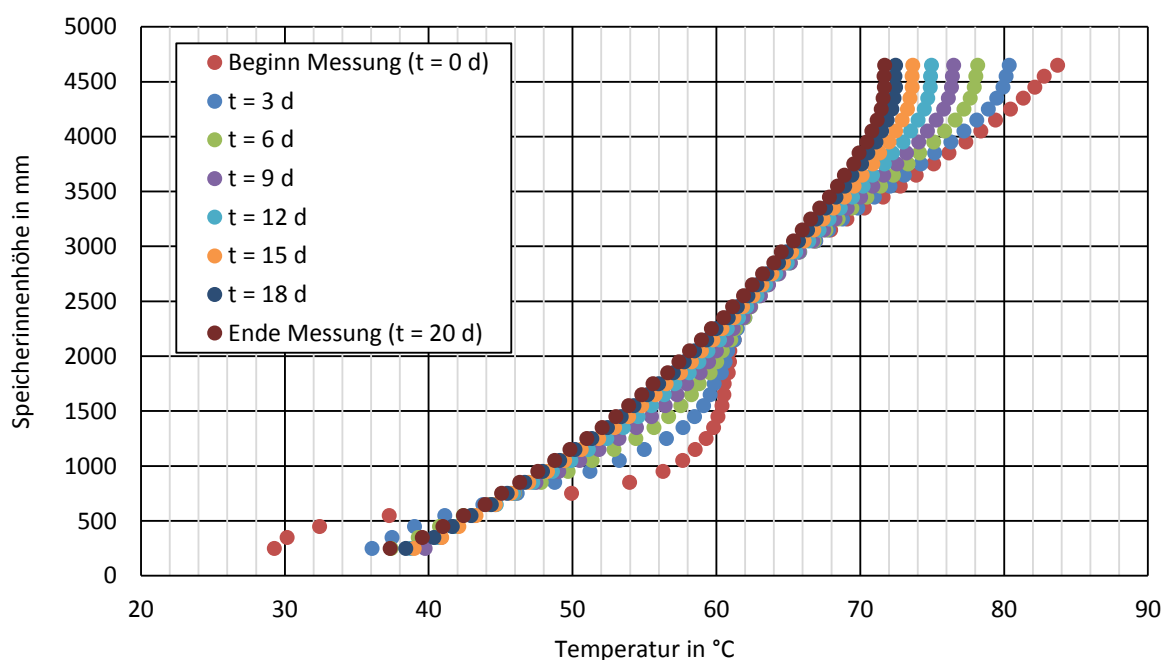


Abbildung 52. Auskühlversuch mit inhomogener Starttemperatur; Temperaturverteilung im Funktionsmuster gemessen auf verschiedenen Höhen als Funktion von der Auskühldauer in Tagen

Wird die über die Speicherhöhe gemittelte Auskühlrate des Versuchs mit homogener Starttemperaturverteilung mit der des Versuchs mit inhomogener Starttemperaturverteilung verglichen, so fällt auf, dass die Auskühlrate bei inhomogener Starttemperaturverteilung um 25 %¹² niedriger ist als die bei homogener Starttemperaturverteilung. Die höhere mittleren Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebungslufttemperatur und die höhere Temperatur im oberen Speicherbereich beim Auskühlversuch mit inhomogener Starttemperaturverteilung lassen zunächst jedoch eine Zunahme der Auskühlrate erwarten. Neben einem unterschiedlich stark ausgeprägten Einfluss der solaren Gewinne durch die transparente Wärmedämmung kann dieses Verhalten auch auf größere Wärmeverluste durch den nicht wärmegeprägten Bodenbereich zurückgeführt werden. Die größeren Wärmeverluste beim Auskühlversuch mit homogener Starttemperatur resultieren aus der höheren anfänglichen Temperatur am Speicherboden.

Eine Berechnung der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Vakuumwärmedämmung aus den Ergebnissen der Auskühlversuche ist nur bedingt möglich, da zum einen der Einfluss der Wärmebrücken im unteren Speicherbereich durch die unzureichende Wärmedämmung des Speicherbodens und des Fußrings sowie der Einfluss der transparenten Wärmedämmung im Ergebnisse der Auskühlrate indirekt enthalten ist und zum anderen bei Vorhandensein von Temperaturgradienten über der Speicherhöhe ein Wärmestrom innerhalb des Speichermediums auftritt, der ebenfalls die Auskühlrate beeinflusst. Mit Hilfe eines um eine transparente Wärmedämmung erweiterten Rechenmodells für Warmwasserspeicher, bei dem eine Trennung zwischen Speicherboden, Speicherdeckel und Speichermantel erfolgt und der Wärmetransport zwischen den Speicherschichten berücksichtigt ist, wird in Kapitel 11.2 eine Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Vakuumwärmedämmung ermöglicht. Diese beträgt für die Wärmedämmung des Speichermantels $\lambda_{\text{eff, Mantel}} = 12,0 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ bei der Auswertung eines Auskühlversuchs aus Kapitel 0. Es lässt sich festhalten, dass mit der Vakuumwärmedämmung somit eine sehr niedrige mittlere Auskühlrate bzw. effektive Wärmeleitfähigkeit des Funktionsmusters erreicht werden kann. Zusätzlich zeigt die ermittelte effektive Wärmeleitfähigkeit eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Labormessungen (siehe Kapitel 4.4). Im unteren Speicherbereich resultieren aus der Wärmebrücke im Bereich des Bodens jedoch erhöhte Auskühlraten. Diese werden bei weiteren Speichern dieser Art deutlich reduziert, da der Bodenbereich ohne Vakuumwärmedämmung beim hier untersuchten Funktionsmuster größer gewählt wurde, um den Einbau der Messsensoren und einer erhöhten Anzahl an hydraulischen Anschlüssen zu ermöglichen. Bei zukünftigen Speichern dieser Art kann der Durchmesser des nicht vakuumwärmegeprägten Bodenbereichs von 1150 mm auf ca. die Hälfte reduziert werden.

¹² Bezogen auf die Auskühlrate bei inhomogener Starttemperaturverteilung

9.3 Untersuchungen der Schichtbe- und Entladeeinrichtung

Am Funktionsmuster wird als aktive Schichtbe- und Entladeeinrichtung der Exergiemanager der Fa. Nitsch-Regelungstechnik eingesetzt, der in Abhängigkeit von der Vorlauftemperatur den Speicher über vier hydraulische Anschlüsse beladen kann. Diese hydraulischen Anschlüsse befinden sich am Funktionsmuster im nicht vakuumwärmegedämmten Bereich des Speicherbodens. Es verlaufen von den vier hydraulischen Anschlüssen stehende Kunststoffrohre mit aufgesetzter Einströmvorrichtung oder aufgesetzter passiver Schichtbe- und Entladeeinrichtung innerhalb des Funktionsmusters zur jeweiligen Ausströmungshöhe. Diese Anordnung der Speichereinbauten ist schematisch in Abbildung 87 und als Foto in Abbildung 86 in Anhang D dargestellt. Der Rücklaufanschluss, d.h. der Austritt am Funktionsmuster der aktiven Schichtbe- und Entladeeinrichtung befindet sich ebenfalls im nicht vakuumwärmegedämmten Bereich des Speicherbodens und ist gemäß Abbildung 87 positioniert. Als Einströmvorrichtungen im Speicher werden die im Kapitel 6 als Beladelanze bezeichneten Vorrichtungen verwendet. Als passive Schichtbe- und Entladeeinrichtung wird der Lamellenlader verwendet, jedoch im Vergleich zu Kapitel 6 mit veränderten Abmessungen. Der Lamellenabstand ist konstant und beträgt 5 mm, der Lamellenlader besitzt zwei Lamellenpakete und eine dementsprechend reduzierte Gesamthöhe und die Tiefe ist im Vergleich zum untersuchten Lamellenlader aus Kapitel 6 um den Faktor vier vergrößert. Die aktive Schichtbe- und Entladeeinrichtung wird entweder mit vier Beladelanzen als Einströmvorrichtung oder mit vier Lanzen mit aufgesetzten Lamellenladern betrieben.

Exemplarisch sind in Abbildung 53, Abbildung 54 und Abbildung 55 die gemessenen Temperaturen innerhalb des Speichermediums bei der Beladung des Funktionsmusters mit einer Beladelanze und einem Lamellenlader dargestellt. Bei allen Versuchen liegt eine anfängliche thermische Schichtung im Funktionsmuster vor. Die Beladung erfolgt über die Beladelanze 3, den Lamellenlader 3 und den Lamellenlader 2, siehe Abbildung 87 in Anhang D. Es wird während der Beladung ein Wechsel zwischen den Lanzen durch die aktive Schichtbe- und Entladeeinrichtung manuell unterbunden, um ausschließlich das Einschichtverhalten der einzelnen passiven SBE zu untersuchen. Der Beladevolumenstrom wurde im Vergleich zu den Messungen aus Kapitel 6 deutlich höher gewählt, um realitätsnahe Betriebszustände bei der Anwendung solcher Speicher zu betrachten. Die Vorlauftemperatur¹³ wurde bei beiden Versuchen höher als die höchste Temperatur im Speicher gewählt.

¹³ Die im Folgenden als Vorlauf- und Rücklauf bezeichneten Temperaturen repräsentieren die Vorlauf- und Rücklauftemperatur der aktiven Schichtbe- und Entladeeinrichtung. Die individuellen Beladefluidtemperaturen an den vier Anschlüssen zur Beladung bzw. am Anschluss des Rücklaufs werden direkt am Speicherboden erfasst. Beim Vorlauf handelt es sich um das in den Speicher einströmende und beim Rücklauf um das aus dem Speicher ausströmende Fluid.

In Abbildung 53 ist das grundsätzliche Beladeverhalten einer Einströmvorrichtung mit fester Austrittshöhe exemplarisch am Verhalten der Beladelanze ersichtlich. Oberhalb der Austrittshöhe findet durch die im Vergleich zur Speicherfluidtemperatur höhere Beladefluidtemperatur eine lokale Temperaturerhöhung statt. Diese betrifft zunächst nur die oberhalb und im Bereich der Höhe der Einströmvorrichtung befindlichen Speicherbereiche, da zwischen Beladefluid und Speicherfluid eine Vermischung stattfindet und die Mischungstemperatur unterhalb der höchsten Speicherfluidtemperatur liegt. Mit zunehmender Beladedauer bzw. dem Speicher zugeführtem Beladevolumen erhöht sich die Mischungstemperatur und führt dadurch zu einer Vergrößerung des Bereichs der Temperaturerhöhung oberhalb und im Bereich der Eintrittshöhe. Durch den am Speicherboden positionierten Rücklauf verschiebt sich mit zunehmendem Beladevolumen der thermische Schichtungssprung in Richtung des Speicherbodens.

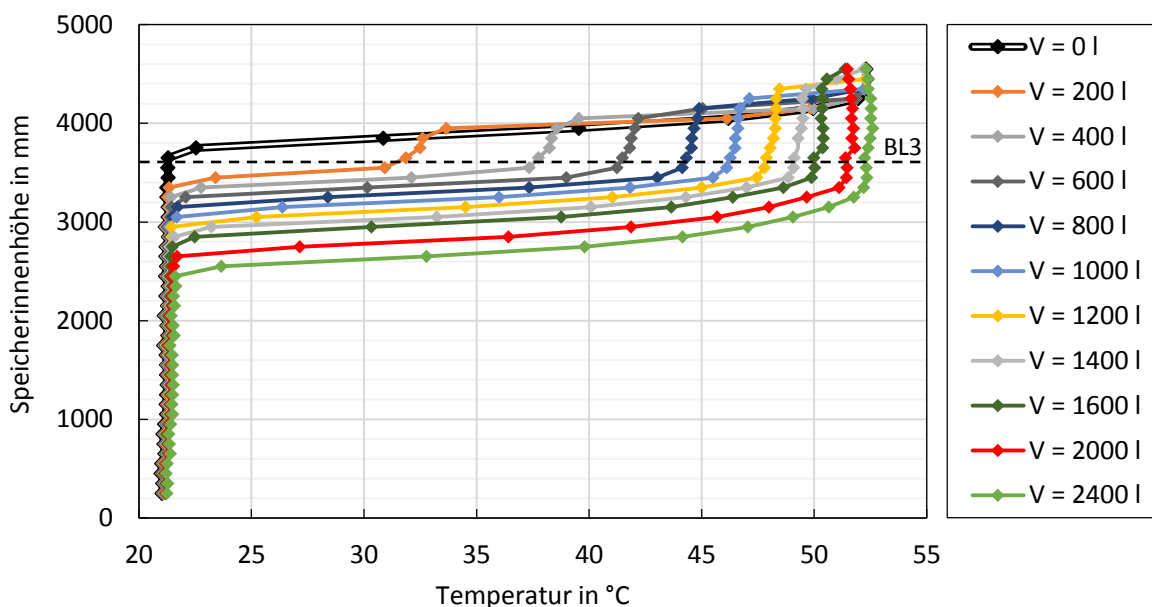


Abbildung 53. Beladung des Funktionsmusters über eine Beladelanze ausgehend von einer anfänglichen Temperaturschichtung, einem mittleren Volumenstrom von $\dot{V} = 1437$ l/h und einer mittleren Vorlauftemperatur von $\vartheta_{VL} = 59,7$ °C; dargestellt sind die über der Speicherhöhe gemessenen Temperaturen als Funktion des Beladevolumens und die Austrittshöhe der Beladelanze 3 mit einer gestrichelten schwarzen Linie

Weiterhin fällt auf, dass es bei der Beladung zwischen den Beladevolumen 1600 l und 2400 l zu einer Verringerung der Temperatur im obersten Speicherbereich kommt, obwohl die Mischungstemperatur der Fluidschichten über der Austrittsöffnung die anfängliche Speicherfluidtemperatur dieser obersten Fluidschichten noch nicht erreicht hat. Dies kann auf das Vorhandensein von makroskopischen Strömungsvorgängen hindeuten, z. B. durch eine Umlenkung der Beladefluidströmung an der Speicherinnenbehälterwand oder an weiteren Speichereinbauten, die zu einer nicht durch freie Konvektion verursachten Vermischung und damit zu einer Reduzierung der Temperatur der obersten Speicherfluidschichten führt.

In Abbildung 54 und Abbildung 55 ist das grundsätzliche Beladeverhalten der passiven Schichtbe- und Entladeeinrichtung Lamellenlader ersichtlich. Während sich beim Versuch mit dem Lamellenlader LL3 der anfängliche Temperatursprung über die gesamte Lamellenladerhöhe erstreckt, befindet sich beim Versuch mit dem LL2 der Temperatursprung im oberen Viertel der Lamellenladerhöhe.

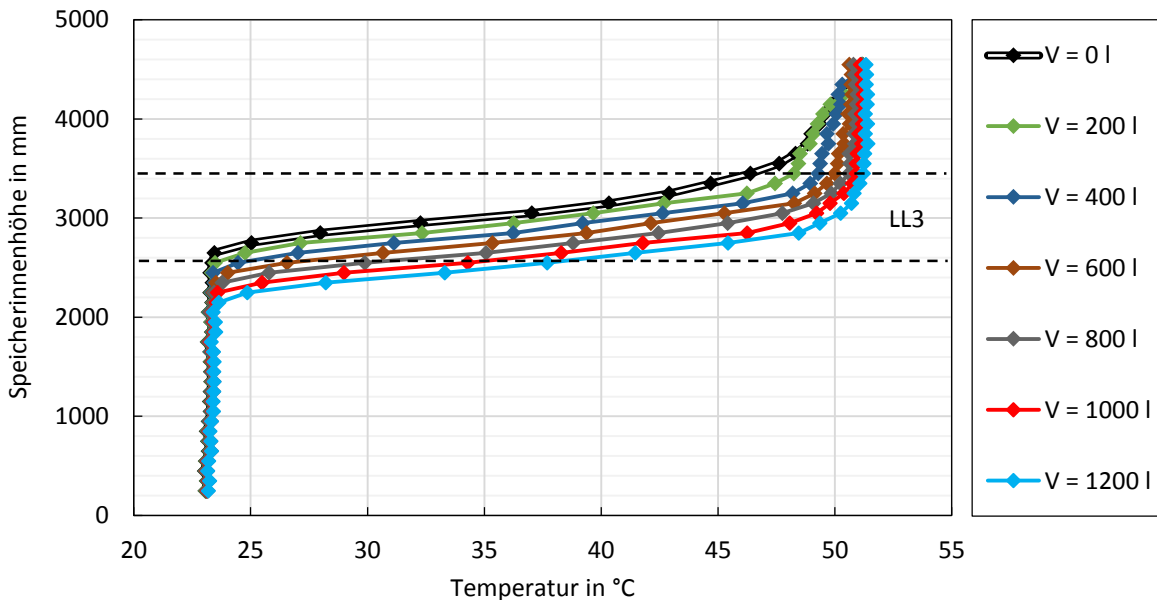


Abbildung 54. Beladung des Funktionsmusters über den Lamellenlader 3 bei einer anfänglichen Temperaturschichtung, einem mittleren Volumenstrom von $\dot{V} = 1409$ l/h und einer mittleren Vorlauftemperatur von $\vartheta_{VL} = 59,2$ °C; dargestellt sind die über der Speicherhöhe gemessenen Temperaturen als Funktion des Beladevolumens und die Höhe der Ober- und Unterkante des Lamellenladers 3 mit einer gestrichelten schwarzen Linie

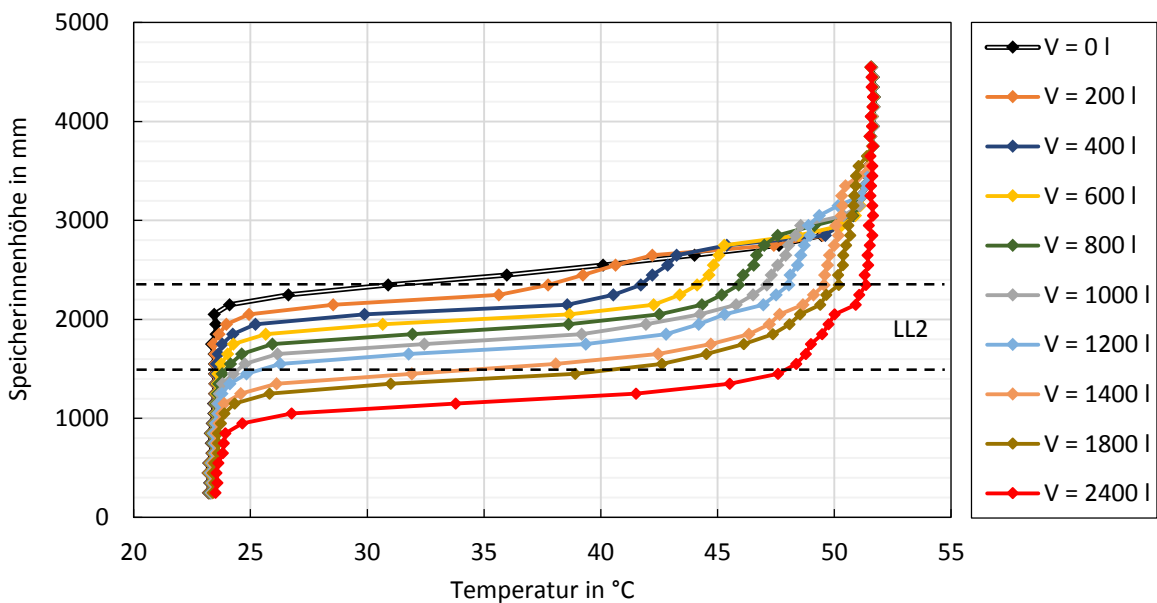


Abbildung 55. Beladung des Funktionsmusters über den Lamellenlader 2 bei einer anfänglichen Temperaturschichtung, einem mittleren Volumenstrom von $\dot{V} = 1420$ l/h und einer mittleren Vorlauftemperatur von $\vartheta_{VL} = 59,9$ °C; dargestellt sind die über der Speicherhöhe gemessenen Temperaturen als Funktion des Beladevolumens und die Höhe der Ober- und Unterkante des Lamellenladers 2 mit einer gestrichelten schwarzen Linie

Ähnlich dem Beladeverhalten der Beladelanze ist zu erkennen, dass durch die im Vergleich zur Speicherfluidtemperatur höhere Beladefluidtemperatur oberhalb des Lamellenladers eine homogene Vermischung des Belade- und Speicherfluids auftritt und eine Verschiebung der Temperaturverteilung unterhalb der Beladefluidaustrittshöhe mit zunehmendem Beladevolumen stattfindet. Dies bestätigt das erwartete Beladeverhalten des Lamellenladers, der für den vorliegenden Zustand der thermischen Schichtung das Beladefluid an der höchsten Stelle austreten lässt. Eine Reduzierung der Speicherfluidtemperatur im Vergleich zur anfänglichen Speicherfluidtemperatur in den obersten Fluidschichten, z. B. durch makroskopischen Strömungsvorgänge, tritt hier nicht auf.

Neben dem Beladeverhalten der passiven Schichtbe- und Entladeeinrichtung Lamellenlader ist dessen Einschichtverhalten von Interesse. Hierzu wurden zwei Einschichtversuche bei einer bestehenden Temperaturschichtung durchgeführt, während denen die Vorlauftemperatur niedriger als die höchste und höher als die niedrigste Fluidtemperatur im Funktionsmuster war. Die Auswahl des für die Einschichtung geeignetsten Lamellenladers (LL1 bis LL4) wird durch die aktive Schichtbe- und Entladeeinrichtung Exergiemanager anhand der gemessenen Vorlauftemperatur, der Temperaturverteilung im Speicherfluid und dem Volumenstrom getroffen. Die Ergebnisse dieser Versuche sind in Abbildung 56 und Abbildung 57 dargestellt. Der Volumenstrom der Beladung wurde bei beiden Versuchen im Vergleich zu den vorab dargestellten Versuchen reduziert, um eine für diese Speichergröße typische Größenordnung eines Beladevolumenstroms zu untersuchen.

Durch die Auswertung der Temperaturen der vier hydraulischen Anschlüsse am Funktionsmuster, jeweils für die Lamellenlader LL1 bis LL4, ist ersichtlich, dass die Beladung bei beiden Versuchen über den Lamellenlader LL2 erfolgte. Dies entspricht der Erwartungshaltung bei gegebener Vorlauftemperatur und der Temperaturverteilung im Speicher. Die Ergebnisse bestätigen die Funktionsfähigkeit des Lamellenladers in Verbindung mit dem Exergiemanager. Es bildet sich entsprechend der vorhandenen Temperaturverteilung im Speicherfluid ein weiterer thermischer Schichtungssprung mit einer Temperatur ähnlich der Vorlauftemperatur aus. Durch das größere Beladevolumen ist der Schichtungssprung in Abbildung 56 ausgeprägter als in Abbildung 57. Ein Einfluss der Beladung durch die SBE auf die Speichertemperaturen oberhalb der Austrittshöhe des Beladefluids, z. B. durch lokale Fehlströmungen im Lamellenlader oder Vermischungsvorgänge von Speicher- und Beladefluid, tritt nicht auf. Unterhalb der Austrittshöhe des Beladefluids erfolgt eine Verschiebung der Temperaturgradienten in Richtung der Höhe des Rücklaufanschlusses.

Beim Versuch mit der mittleren Vorlauftemperatur von 48,1 °C konnte durch die Auswertung der Temperaturen der vier Anschlüsse am Speicherboden festgestellt werden, dass über den Anschluss des LL1 eine Fehlströmung auftrat, die auf einen nicht vollständigen Abschluss dieses Anschluss durch die aktive Schichtbe- und Entladeeinrichtung hindeutet. Fehlströmungen dieser Art können durch eine Nachjustierung der Mischventilsteuerung der aktiven Schichtbe- und Entladeeinrichtung einfach unterbunden werden.

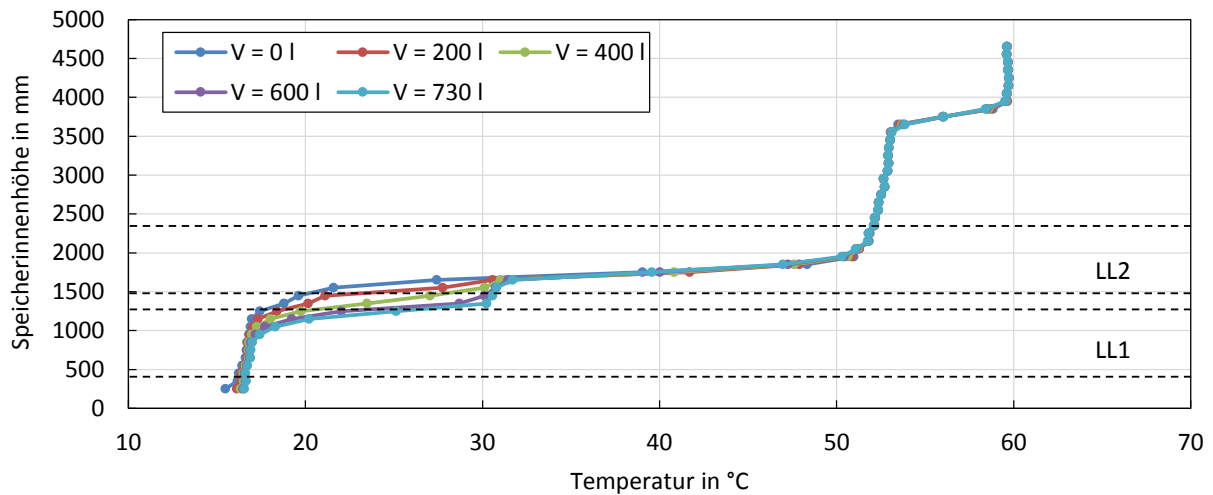


Abbildung 56. Beladung des Funktionsmusters über die aktive Schichtbe- und Entladeeinrichtung bei einer anfänglichen Temperaturschichtung, einem mittleren Volumenstrom von $\dot{V} = 408 \text{ l/h}$ und einer mittleren Vorlauftemperatur von $\vartheta_{VL} = 32,9 \text{ °C}$; dargestellt sind die über der Speicherhöhe gemessenen Temperaturen als Funktion des Beladevolumens und die Höhen der Ober- und Unterkanten der unteren beiden Lamellenlader LL1 und LL2 mit gestrichelten schwarzen Linien

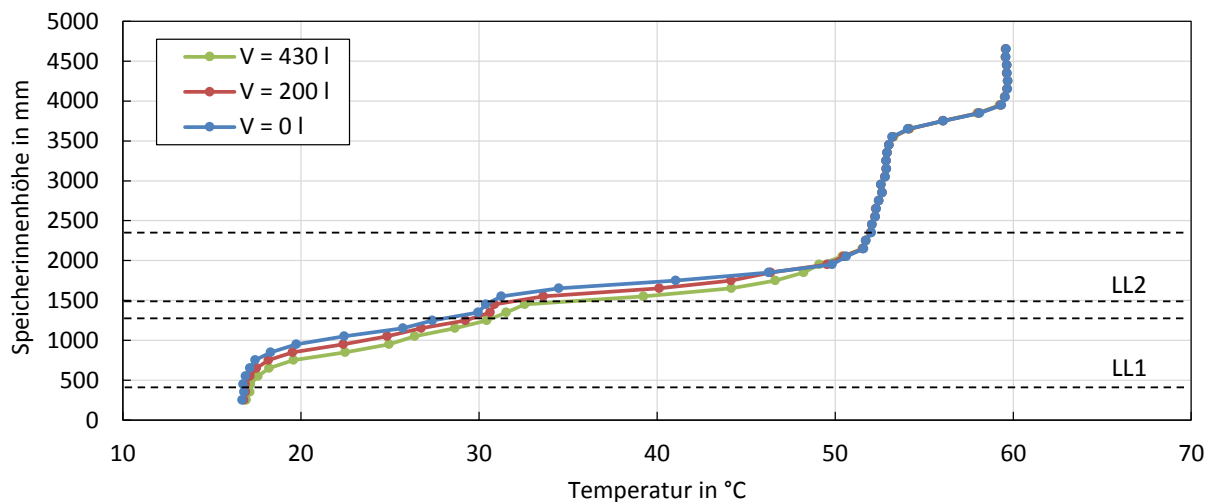


Abbildung 57. Beladung des Funktionsmusters über die aktive Schichtbe- und Entladeeinrichtung bei einer anfänglichen Temperaturschichtung, einem mittleren Volumenstrom von $\dot{V} = 423 \text{ l/h}$ und einer mittleren Vorlauftemperatur von $\vartheta_{VL} = 48,1 \text{ °C}$; dargestellt sind die über der Speicherhöhe gemessenen Temperaturen als Funktion des Beladevolumens und die Höhen der Ober- und Unterkanten der unteren beiden Lamellenlader LL1 und LL2 mit gestrichelten schwarzen Linien

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Kombination der aktiv SBE Exergiemanager in Verbindung mit vier passiven SBE oder vier Einströmvorrichtungen, die jeweils einen Abschnitt der Speicherhöhe zugeordnet sind, erfolgreich umgesetzt werden konnte. Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse des direkten Vergleichs der passiven SBE Lamellenlader mit der Einströmvorrichtung Beladelanze und die Ergebnisse der Einschichtversuche am Lamellenlader, dass die passive SBE Vorteile gegenüber der Einströmvorrichtung Beladelanze besitzt. Besonders die Möglichkeit, entsprechend der

Temperaturverteilung im Speicher das Beladefluid einzuschichten, ist nur bei Verwendung der passiven SBE Lamellenlader gegeben. Um jedoch an unterschiedliche Anwendungen angepasste Betriebsparameter der Kombination einer aktiven und mehrerer passiven SBE zu identifizieren, müssen weitere, umfangreich Belade- und Einschichtversuche durchgeführt werden.

Das Konzept den Speicher in mehrere Höhen-Bereiche einzuteilen, die jeweils eine individuelle und von der aktiven SBE als Einströmvorrichtung genutzte passive SBE besitzen, führt dazu, dass die passiven SBE i. d. R. nur über im Vergleich zur Gesamtspeicherhöhe kleine Höhen von < 2 m eingesetzt werden. Dies ermöglicht es die passiven SBE ohne geometrische Skalierung im Labormaßstab zu untersuchen und deren optimale Betriebsparameter bezüglich Temperaturdifferenz zwischen Belade- und Speicherfluid und Beladevolumenstrom zu bestimmen. Es kann dadurch auf eine auf dimensionslosen Kennzahlen basierende Skalierung der im Labormaßstab bestimmten Betriebsparameter der SBE hin zum Realmaßstab verzichtet werden.

Die im Rahmen dieses Vorhabens entwickelte passive SBE Lamellenlader bietet darüber hinaus den Vorteil, dass durch die 2D-Geometrie eine einfache Skalierung bezüglich des Beladevolumenstroms möglich ist. Es kann angenommen werden, dass das thermische Belade- und Einschichtverhalten unverändert bleibt, sofern ausschließlich die Tiefe des Lamellenladers proportional zur Volumenstrom verändert wird. Bei dieser Annahme bleiben Randeffekte unberücksichtigt. Die Höhe der passiven SBE kann durch die Anzahl der Lamellenpakete variiert werden. Die guten Ergebnisse des Belade- und Einschichtverhaltens der passiven SBE Lamellenlader bestärken die Annahme der Funktionsfähigkeit dieser modularen und einfachen Skalierungsmethodik. Dennoch sind weitere Versuche zum Vergleich des Belade- und Einschichtverhaltens im Labormaßstab und im Realmaßstab notwendig, um die Funktionsfähigkeit der Skalierungsmethodik abschließend nachzuweisen. Diese umfangreichen und zeitintensiven Versuche konnten innerhalb der Projektlaufzeit des Forschungsvorhabens nicht durchgeführt werden. Die Möglichkeit zur Durchführung dieser Untersuchungen bleibt jedoch durch das Vorhandensein eines zugänglichen WWS im Labormaßstab und eines zugänglichen WWS im Realmaßstab erhalten.

9.4 Untersuchungen zur transparenten Wärmedämmung

Auf der gekrümmten äußeren Zylinderwand der Vakuumwärmedämmung des Funktionsmusters wurde eine transparente Wärmedämmung angebracht. Dabei wurde eine absorberparallele TWD-Struktur in Form von gebogenen Glasscheiben verwendet, die mit Hilfe von Fixierungsschienen am Funktionsmuster angebracht wurde. Wie in Abbildung 49 ersichtlich, existieren zwei getrennte TWD-Ebenen, die keinen Luftaustausch zwischen den Ebenen ermöglichen. Je TWD-Ebene werden fünf Glasscheiben eingesetzt und mit Dichtungsbahnen gegeneinander abgedichtet. Die Glasscheiben besitzen eine Stärke von 6 mm, einen Transmissionsgrad nach Herstellerangaben von 82 % bzw. einen Absorptionsgrad von 10 % und einen Wärmedurchgangskoeffizienten nach

Herstellerangaben von $5,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$. Der Abstand zwischen den Glasscheiben und der Speicheraußenmantelfläche beträgt 35 mm.

Auf dem äußeren Speichermantel wurde eine temperaturbeständige, matt-schwarze Lackierung angebracht. Diese verfügt über einen messtechnisch ermittelten¹⁴ und mit dem solaren Spektrum (AM1,5) gewichteten Absorptionsgrad von 0,96.

Die Manteltemperaturen werden mit Anlege-Widerstandstemperatursensoren entsprechend der Verteilung in Abbildung 85 im Anhang D erfasst. Die Globalstrahlung und die Diffusstrahlung in der Horizontalen werden auf dem Dach eines nebenstehenden Gebäudes gemessen, welches südlich des Außenprüfstands steht und das Funktionsmuster im Winter teilweise verschattet.

Durch die auf die TWD des Funktionsmuster treffende solare Direktstrahlung, solare Diffusstrahlung und reflektierte solare Strahlung des Bodens bzw. der bebauten Umgebung erwärmt sich der Speichermantel über die Umgebungslufttemperatur. Für einen exemplarischen Tag sind die gemessenen Speichermanteltemperaturen der oberen TWD-Ebene (siehe Abbildung 85 in Anhang D) und die gemessene Global- und Diffusstrahlung in Abbildung 58 und Abbildung 59 dargestellt.

Zusätzlich sind in Abbildung 59 vier berechnete hemisphärische Strahlungsleistungen für eine senkrechte Fläche dargestellt, die jeweils eine um 90° versetzte Orientierung ausgehend von der Himmelsrichtung Süden besitzen. Diese Strahlungsleistungen sind nach dem Modell von Liu und Jordan /Duf06/ unter Vernachlässigung von Bodenreflexionen bestimmt.

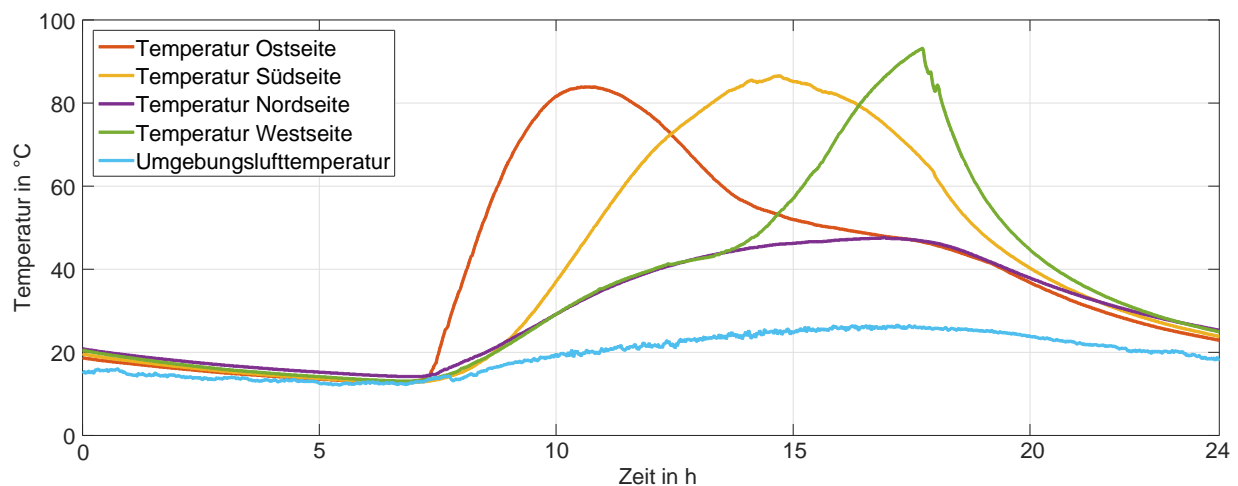


Abbildung 58. Oberflächentemperaturen auf dem Speichermantel des Funktionsmusters (obere TWD-Ebene) und Umgebungslufttemperatur im Tagesgang (26.08.2015)

¹⁴ Messgerät: Agilent Cary 5000 UV-Vis-NIR (Version: 1.12)

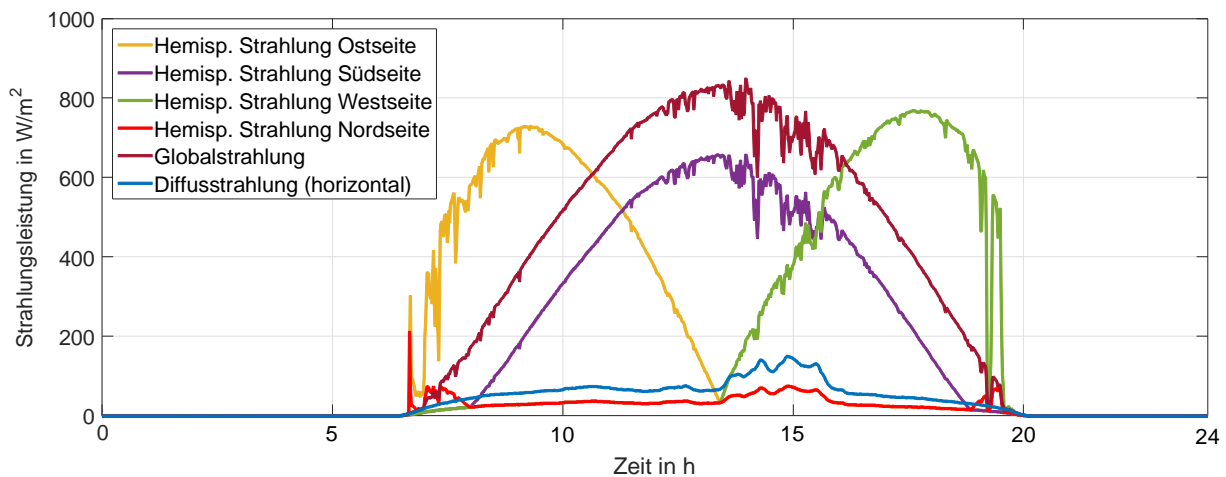


Abbildung 59. Gemessene und berechnete Strahlungsleistungen im Tagesgang (26.08.2015) für eine senkrecht orientierte Fläche; die Globalstrahlung und die Diffusstrahlung in der Horizontalen sind gemessen und die vier in unterschiedliche Himmelsrichtungen orientierten Strahlungsleistung sind berechnet

Erwartungsgemäß folgt die Speichermanteltemperatur der Einstrahlungsleistung auf die jeweilige Fläche. Durch einen direkten Vergleich der gemessenen Oberflächentemperatur des Speichermantels mit der zugehörigen berechneten Strahlungsleistung fällt auf, dass ein zeitlicher Versatz zwischen beiden vorliegt. Dies wird besonders beim Beginn der Einstrahlung auf der Ostfläche und deren Temperaturzunahme bzw. beim Vergleich der Maxima der Oberflächentemperaturen und den Strahlungsleistungen der jeweiligen Flächen deutlich. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Pyranometer durch deren erhöhte Position gegenüber dem Funktionsmuster deutlich weniger verschattet werden und zum anderen, dass der Speichermantel eine nicht zu vernachlässigende Wärmekapazität besitzt.

Die Temperatur der nach Norden orientierten Fläche erfährt ebenfalls eine deutliche Erhöhung, trotz fehlender solarer Einstrahlung. Dies kann zum einen auf die Diffusstrahlung und auf die aus der Umgebung reflektierte direkte Solarstrahlung sowie auf die innerhalb der TWD auftretenden Wärmetransportphänomene zurückgeführt werden. Hierzu zählen die Wärmeleitung im Speichermantel, ein konvektiver Wärmetransport durch freie Konvektion im Luftspalt der TWD und ein Strahlungswärmeaustausch zwischen dem Speichermantel und den Glasscheiben.

Die mittlere Speicherfluidtemperatur während der Messung am 26.08.2015 betrug 55,2 °C. Werden die Oberflächentemperaturen vor dem ersten Temperaturanstieg betrachtet, so zeigt sich, dass diese sich der Umgebungslufttemperatur annähern. Hieraus kann gefolgert werden, dass die Oberflächentemperaturen des äußeren Speichermantels unabhängig von der Speicherfluidtemperatur sind bzw. durch diese nur vernachlässigbaren Einflüssen unterliegt. Ursächlich hierfür ist die sehr gute Wärmedämmwirkung der Vakuumwärmedämmung.

Die Vermutung, dass Luft durch frei Konvektion von der durch die Solarstrahlung erwärmten Speichermantelseite zu einer kühleren, sonnenabgewandte Seite innerhalb des Luftspalts strömt oder eine über der Höhe stabile Temperaturschichtung im Luftspalt hervorruft, wird durch die gemessenen Temperaturverteilung des Speichermantelblechs im Tagesgang in Abbildung 60 bekräftigt. Es ist ersichtlich, dass über der Höhe der TWD auf der Südseite ein deutlicher Temperaturgradient vorliegt. Die Zuordnung der Temperatursensoren ist in Abbildung 85 ersichtlich.

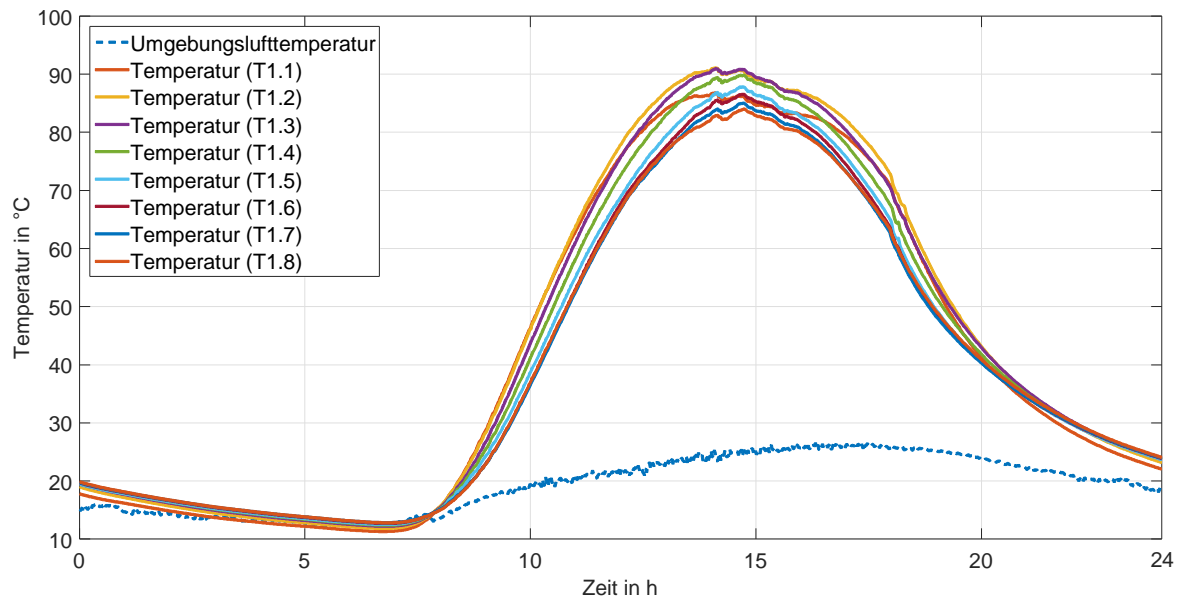


Abbildung 60. Oberflächentemperaturen des Speichermantels der oberen TWD-Ebene des Funktionsmusters und Umgebungslufttemperatur im Tagesgang (26.08.2015); dargestellt sind die Temperaturen der nach Süden orientierten und über der Höhe verteilten Temperatursensoren gemäß Abbildung 85

In Abbildung 61 sind Infrarot-Aufnahmen des Funktionsmusters zur Visualisierung von Temperaturgradienten auf der TWD-Oberfläche gezeigt. Aus den Aufnahmen wird deutlich, dass die Oberflächentemperatur der Glasscheiben im Vergleich zum nicht mit der TWD wärmegeprägten Speicherdeckel bzw. Fußring niedriger ist. Ein vergleichbar ausgeprägter Temperaturgradient, wie er an der Speichermantelfläche über der Höhe vorliegt, tritt nicht auf. Es kann dennoch festgehalten werden, dass sowohl über den Umfang als auch über die Höhe innerhalb der transparenten Wärmedämmung eine Temperaturverteilung vorliegt, die dynamisch und mit einem deutlichen Zeitversatz aufgrund von thermischen Kapazitäten des Speichermantels der solaren Einstrahlung folgt.

Betrachtet man die Ergebnisse der Oberflächentemperaturmessung für repräsentative Zeiträume im Sommer und im Winter so zeigt sich, dass die Differenz zwischen gemessener Speichermanteltemperatur, gemittelt über die Speicheraußenoberfläche und über den Zeitraum 15.07.2015 bis 15.08.2015, und gemessener Umgebungslufttemperatur, gemittelt über den selben Zeitraum, $\Delta\bar{\vartheta} = 14,6$ K beträgt.

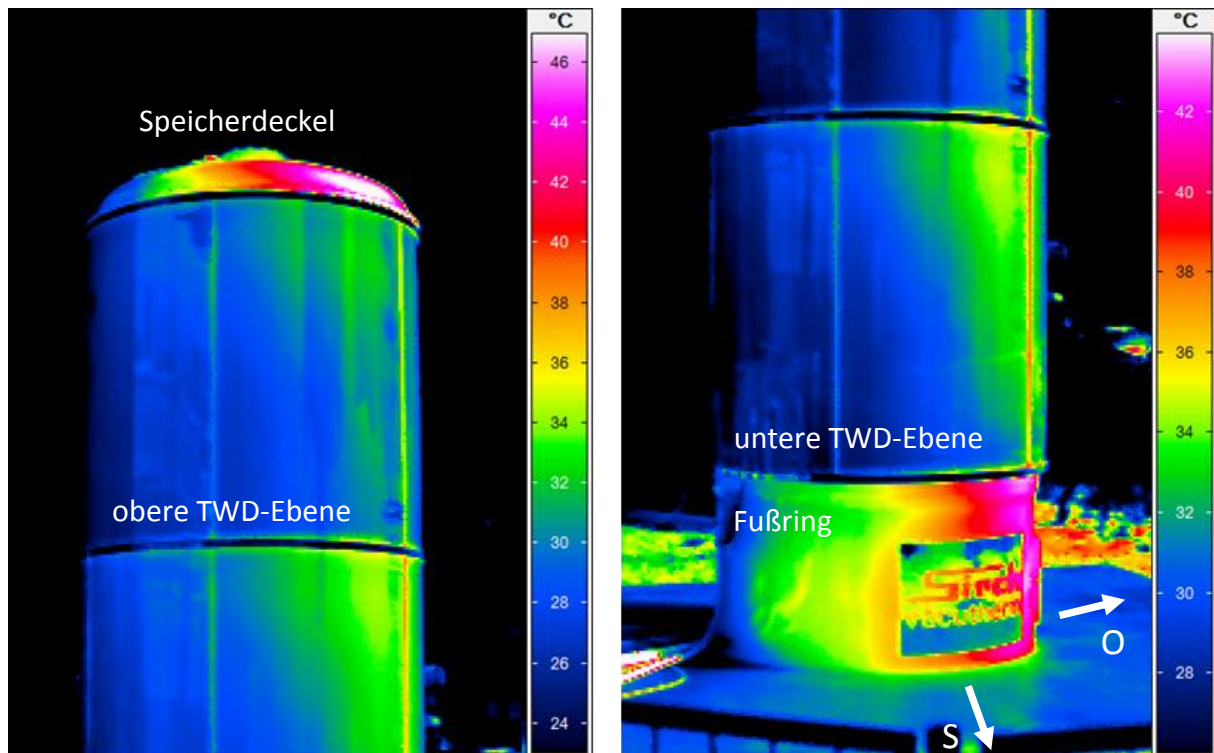


Abbildung 61. Infrarot-Aufnahmen¹⁵ des Funktionsmusters; (links) obere TWD-Ebene und Speicherdeckel; (rechts) untere TWD-Ebene und Fußring inkl. visualisierter Süd- und Ostorientierung; eine Lichtbildaufnahme des Funktionsmusters ist in Abbildung 49 gezeigt. Temperatur des Speicherfluids: $\vartheta_{sp} = 68 \text{ °C}$

Die Differenz für den Zeitraum 15.12.2015 bis 15.01.2016 beträgt $\Delta\bar{\vartheta} = 3,0 \text{ K}$. Die niedrigere Temperaturerhöhung durch die TWD im Winter ist auf die deutlich geringere solare Einstrahlung und die nur im Winter auftretende Teilverschattung der TWD des Funktionsmusters durch ein vom Funktionsmuster aus im Süden befindliches Gebäude verursacht. Weiterhin zeigt der Vergleich individueller Speichermanteltemperaturen mit der Umgebungslufttemperatur, dass der Speichermantel z. T. auf niedrigere Temperaturen als die Umgebungsluft abkühlt. Ähnliche Ergebnisse wurden bereits in Kapitel 5.3.1 beschrieben. Dieser Sachverhalt ist auf einen Strahlungswärmeaustausch der TWD mit dem kalten Himmel in Zeiten ohne solare Einstrahlung zurückzuführen. Diese Unterkühlung wird durch die TWD jedoch überkompensiert.

Die geringe Temperaturerhöhung der Speichermantelfläche im Winter durch die TWD könnte durch die Anwendung einer Kombination einer absorbersenkrechten und einer absorberparallelen TWD-Struktur ermöglicht werden, was die Untersuchungen im Labormaßstab (siehe Kapitel 5.3.2) zeigen. Jedoch werden dadurch die Material- und Montagekosten erhöht und die Problem der Temperaturbeständigkeit der im Regelfall aus

¹⁵ Die Aufnahmen wurden am 08.07.2015 um 11.30 Uhr mit einer Infrarot-Kamera des Typs VarioCAM hr (Fa. Infratec) bei den Randbedingungen $\varepsilon_{ges}^* = 0,95$, $\tau_{Pfad}^* = 1$, $\vartheta_{Pfad} = \vartheta_{Halbraum} = 25 \text{ °C}$ erstellt. Die Temperaturen sind entsprechend der tatsächlichen Emissionsgrade nicht korrigiert und daher nur bedingt vergleichbar.

Kunststoffen bestehenden biegbaren absorbersenkrecht TWD-Strukturen bleiben bestehen.

Es kann dennoch aus den bisherigen Ergebnissen abgeleitet werden, dass eine deutliche Erhöhung der Oberflächentemperatur durch die TWD vorliegt, was die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der TWD bestätigt. Es konnten trotz unterschiedlicher Materialstärken der TWD am Funktionsmuster und der TWD an den Versuchsträgern aus Kap. 5.3.2 vergleichbare Ergebnisse bezüglich der Oberflächentemperatur erreicht werden.

9.5 Identifikation, Umsetzung und Bewertung von Verbesserungsmaßnahmen

Im Rahmen der in Kapitel 0 beschriebenen Untersuchungen konnte der nicht vakuumwärmegeämmte Bodenbereich als relevante Wärmebrücke identifiziert werden. Dieser umfasst die Anschlussleitungen der SBE und den inneren Ring zwischen Innen- und Außenbehälter. Als Verbesserungsmaßnahme wurde der nicht vakuumwärmegeämmte Bodenbereich mit PU-Schaum mit einer Stärke von 100 mm konventionell wärmegeämmt. Zur Bewertung dieser Maßnahme wurde ein weiterer Auskühlversuch durchgeführt (siehe Abbildung 62). Bei diesem betrug die mittlere Umgebungslufttemperatur $11,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die über die Versuchsdauer gemittelte Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebungslufttemperatur $57,6\text{ K}$.

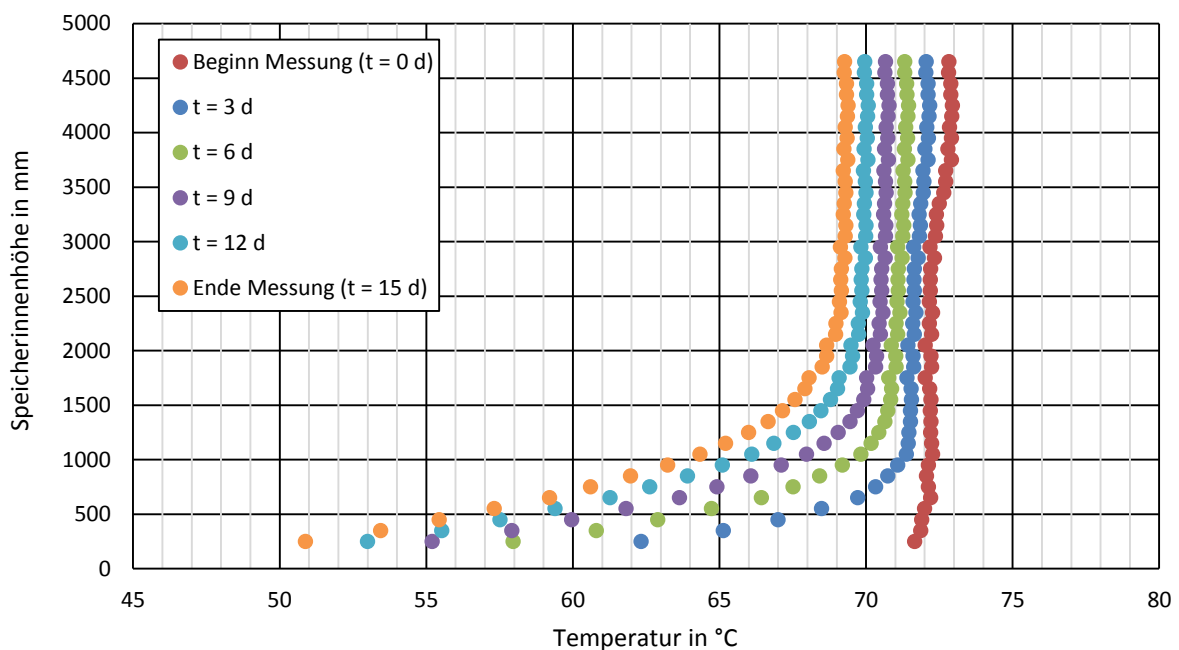


Abbildung 62. Auskühlversuch mit homogener Starttemperatur und zusätzlicher Wärmedämmung des Fußrings; Temperaturverteilung im Funktionsmuster gemessen auf verschiedenen Höhen als Funktion von der Auskühldauer in Tagen

Die über die gesamte Speicherhöhe gemittelte Auskühlrate für den betrachteten Zeitraum beträgt $0,38\text{ K/d}$. Wird ausschließlich die obere Speicherhälfte betrachtet, die nicht durch die Wärmebrücke im Boden beeinflusst wird, so wird eine Auskühlrate von $0,22\text{ K/d}$ erreicht. Die im Vergleich zu den Untersuchungen ohne Wärmedämmung des Bodens in Kapitel 0 erhöhte

Gesamtauskuhlrate resultiert aus der erhöhten mittleren Temperaturdifferenz des Speichermediums zur Umgebungsluft. Ein Vergleich des Verhältnisses der Auskuhlrate der unteren Speicherhälfte zur Auskuhlrate des Gesamtspeichers für die Auskuhlversuche mit und ohne Wärmedämmung des Bodens zeigt, dass durch die Wärmedämmung des Bodens der Anteil der Auskuhlrate der unteren Speicherhälfte an der Gesamtauskuhlrate um 30 %¹⁶ reduziert werden konnte.

Zusätzlich zum Auskuhlversuch wurde ein Simulationsmodell¹⁷ des Funktionsmusters mit der Wärmedämmung des Speicherbodens erstellt und Parametervariationen der Fußring- und Bodengeometrie durchgeführt. Vor der Parametervariation wurden die Simulationsergebnisse des Ausgangssimulationsmodells mit 26 im Speicherboden- und Fußringbereich gemessenen Oberflächentemperaturen verglichen und verifiziert. Durch die anschließende Parametervariation konnte gezeigt werden, dass zusätzlich zur Wärmedämmung des nicht vakuumwärmedämmten Bereichs des Speicherbodens, die Materialwahl und die Abmessungen des inneren Rings zwischen Innen- und Außenmantel einen bedeutenden Einfluss auf die Gesamtwärmeverluste haben. Beispielsweise konnte eine Reduzierung der Wärmeleitfähigkeit des Materials des inneren Fußrings von 40 W/(m·K) auf 20 W/(m·K) die Gesamtwärmeverluste um 23 %¹⁸ senken. Hierbei ist zu beachten, dass aufgrund der als konstant angenommenen Speicherinnentemperatur von 71 °C bzw. der konstant angenommenen Umgebungslufttemperatur von 0 °C bei der Simulation keine Auskuhlung bodennaher Speicherbereiche stattfindet, welche ihrerseits eine wärmedämmende Wirkung besitzen. Dieses Simulationsergebnis stellt somit einen oberen Grenzfall der Reduktion der Wärmeverluste dar. Weiterhin zeigen die Simulationsergebnisse, dass eine Verkleinerung des nicht vakuumwärmedämmten Bodenbereichs ebenfalls zu einer deutlichen Reduzierung der Wärmeverluste führt.

Wärmebrücken am Speicherboden sind nicht gänzlich zu vermeiden, da die Zugänglichkeit über das Mannloch für eine nachträgliche Modifikationen der SBE an andere Anwendungsrandbedingungen und die Durchführung hydraulischer Anschlussleitungen in das Funktionsmuster notwendig sind.

Eine weitere durchgeführte Verbesserungsmaßnahme ist die Verbesserung der Funktionsfähigkeit der Kombination der aktive SBE mit mehreren passiven SBE. Diese Kombination ermöglicht im Gegensatz zur Anwendung von Einströmvorrichtungen mit fester Austritthöhe eine geschichtete Beladung. Die Ergebnisse dieser Verbesserung sind in Kapitel 9.3 erläutert.

Im Hinblick auf die transparente Wärmedämmung wurden im Bereich der Montage Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert. Hier ist besonders eine Verkleinerung der gebogenen Glassegmente zu nennen, welche die Montage deutlich erleichtern würde.

¹⁶ bezogen auf das Verhältnis der Auskuhlrate der unteren Speicherhälfte zur Auskuhlrate des Gesamtspeichers für den Auskuhlversuch ohne Bodenwärmedämmung

¹⁷ Simulationssoftware: Comsol Multiphysics, Version 4.4

¹⁸ bezogen auf die Gesamtwärmeverluste der Berechnung mit einer Wärmeleitfähigkeit von 40 W/(m·K)

9.6 Untersuchung der Marktreife

Werden die Ergebnisse aus den Kapiteln 0 bis 9.5 betrachtet so zeigt sich, dass die für das Funktionsmuster entwickelten Technologien der Vakuumwärmedämmung, der Kombination einer aktiven und mehrerer passiven SBE und der transparenten Wärmedämmung erfolgreich aus dem Labor- und Technikumsmaßstab (Kapitel 4 bis 7) in den Realmaßstab umgesetzt werden konnten. Die Untersuchung und der Nachweis der Funktionsfähigkeit dieser Technologien für ein Funktionsmuster mit einem Wasservolumen von 12 m³ erfolgte an einem neu errichteten Außenspeicherprüfstand. Werden Warmwasserspeicher jedoch unter realen Betriebsbedingungen eingesetzt, sind neben ihrer thermischen Leistungsfähigkeit weitere anwendungsrelevante Aspekte von Bedeutung.

Hierzu zählt der durch die Außenaufstellung notwendige Frostschutz der Anschlussleitungen des Warmwasserspeichers. Dieser ist in Form einer übergeordneten Steuerungs- bzw. Regelungsstrategie der aktiven SBE vorgesehen, die die Temperatur im Fußring erfasst und bei Unterschreitung eines Temperaturgrenzwertes alle hydraulischen Leitungen im Fußring nach einem definierten Zeitintervall kurzzeitig durchströmt. Diese Art des Frostschutzes bedarf einer Einbindung der aktiven Be- und Entladeeinrichtung bzw. der für den Betrieb des Speichers relevanten Pumpen in eine übergeordnete Gebäudeleittechnik.

Die im Monat Januar 2016 gemessene Fußringtemperatur war im Mittel $\Delta\bar{\vartheta} = 9,3$ K höher, als die gemessene Umgebungslufttemperatur, was auf die Wärmeverluste des Speichers, der in diesem Zeitraum eine mittlere Temperatur von 55,3 °C aufwies, zurückzuführen ist. Wird der Warmwasserspeicher mit höheren Temperaturen betrieben bzw. nehmen im Sommer die Umgebungslufttemperatur und die solaren Gewinne der TWD zu, ist mit einer deutlich höheren Fußraumtemperatur zu rechnen. Bei einer Platzierung weiterer Komponenten im Fußraum ist daher auf deren Temperaturbeständigkeit zu achten, insofern die Fußringtemperatur nicht bereits durch weitere Optimierungsmaßnahmen am Speicherboden reduziert wurde.

Obwohl die Kombination einer aktiven SBE mit mehreren passiven SBE eine geschichtete Beladung ermöglicht (siehe Kapitel 9.3), wird bei der Speicherentladung z. Z. auf einen geschichteten Betrieb verzichtet und heißes Wärmeträgerfluid immer über den höchsten Anschluss des Funktionsmusters entnommen bzw. kühles Wärmeträgerfluid dem Speicher immer über den tiefsten Anschluss zugeführt. Eine einfache Erweiterung der Steuerung bzw. Regelung der aktiven SBE würde eine Entladung zumindest auf vier unterschiedlichen Höhen im Speicher ermöglichen.

Aus praktischen Gesichtspunkten wurde bei der aktiven SBE eine online-basierte Fernwartung vorgesehen, die z. B. das Auswerten aktueller Temperaturen des Speicherfluids und den manuellen Eingriff in die Steuerung bzw. Regelung der aktiven SBE ermöglicht.

Die transparente Wärmedämmung am Funktionsmuster in Form gebogener Glasscheiben zeigt nach elf Monaten keine witterungsbedingten Veränderungen. Eine erkennbare Verschmutzung innerhalb der TWD trat in diesem Zeitraum ebenfalls nicht auf, mit Ausnahme lokaler Verschmutzungen der Speicheraußen- und Glasscheibeninnenoberfläche

durch flüssige Montagehilfsmittel, welche zur Befestigung und Fixierung der Glasscheiben notwendig waren.

Wird der erwartete Betriebszeitraum vakuumwärmedämmter Warmwasserspeicher von bis zu 50 Jahren berücksichtigt, so ist die Vakuumdichtigkeit der Vakuumwärmedämmung ein entscheidendes Funktionsmerkmal. Die Ergebnisse der Labormessungen zur effektiven Wärmeleitfähigkeit verschiedener schüttfähiger Füllmaterialienmischungen (siehe Kapitel 5) zeigen, dass die beim Funktionsmuster verwendete Mischung im Druckbereich von 1 mbar bis 10 mbar, im Vergleich zu den anderen untersuchten Mischungen, die niedrigste effektive Wärmeleitfähigkeit zeigt. Der Druckbereich von 1 mbar bis 10 mbar wird aus technologischer Sicht als dauerhaft erreichbarer Druckbereich der Vakuumwärmedämmung für den betrachteten Zeitraum von 50 Jahren erachtet.

Das bei Fa. Sirch gefertigte Funktionsmuster (siehe Kapitel 8) besaß ab Werk einen Druck in der Vakuumwärmedämmung von 2,7 mbar. Der Druckverlauf der Evakuierung¹⁹ als Funktion von der Evakuierungsdauer bei einer mittleren Innenspeicherluft- und Umgebungslufttemperatur von 16,5 °C ist in Abbildung 63 dargestellt. Die Evakuierung fand innerhalb eines Gebäudes statt. Das mit der Mischung 30 Massenprozent pyrogener Kieselsäure und 70 Massenprozent expandiertem Perlit gefüllte Volumen der Vakuumwärmedämmung beträgt 7,05 m³.

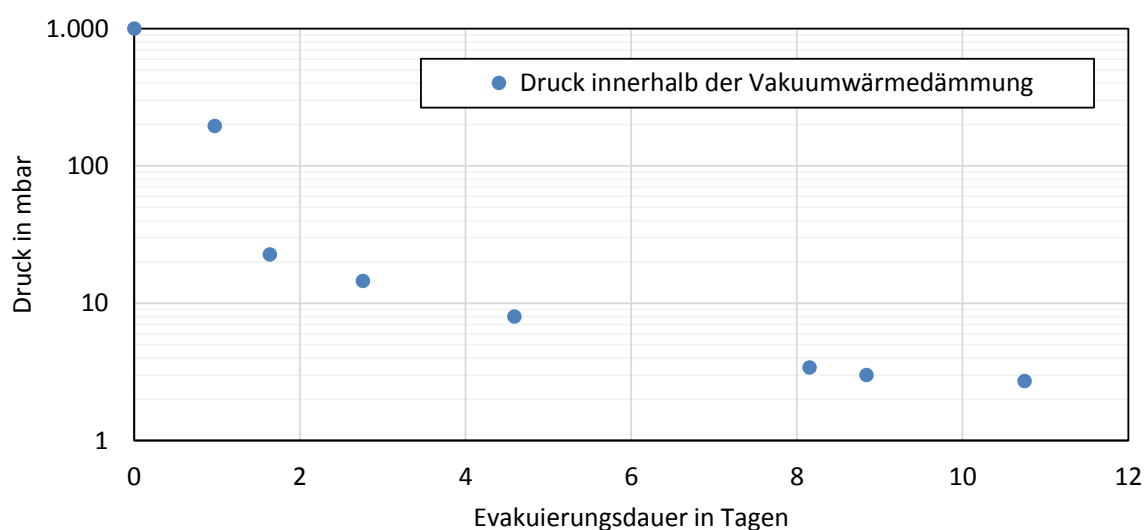


Abbildung 63. Druckverlauf innerhalb der Vakuumwärmedämmung als Funktion von der Evakuierungsdauer

Ausgehend von dem ab Werk erreichten Evakuierungszustand der Vakuumwärmedämmung des Funktionsmusters, das im optimalen Druckbereich der Mischung des Füllmaterials liegt, wurden am Außenspeicherprüfstand verschiedene weitere Techniken zur Evakuierung untersucht.

U. a wurde die Vakuumwärmedämmung bei einem mit Umgebungsluft gefüllten und im Innenbehälter mit Halogenstrahlern zyklisch beheizten Funktionsmuster über einen

¹⁹ Die Evakuierung fand zyklisch statt und der Druck innerhalb der Vakuumwärmedämmung wurde bei gestoppter Vakuumpumpe mit einem Sensor des Typs Pfeiffer Vacuum TPG 202 erfasst.

Zeitraum von 28 Tagen weiter evakuiert²⁰. Während dieses Zeitraums betrug die mittlere Speicherinnentemperatur 35,3 °C und der Speicher war außen aufgestellt, jedoch ohne transparente Wärmedämmung. Weitere Maßnahmen zur Erreichung niedrigerer Drücke in der Vakuumwärmedämmung waren die zyklische Evakuierung im Zeitraum von 43 Tagen des im Betrieb befindlichen Funktionsmusters mit TWD und im Zeitraum von 45 Tagen die Anwendung einer Zeolithfalle, die ggf. ausgasenden Wasserdampf adsorbieren sollte. Die Summe dieser Maßnahmen konnte den Druck in der Vakuumwärmedämmung auf 0,37 mbar bei $\vartheta_{\text{amb}} = 12,48 \text{ °C}$, $\bar{\vartheta}_{\text{Sp}} = 8,48 \text{ °C}$ und $\bar{\vartheta}_{\text{Mantel}} = 20,70 \text{ °C}$ senken.

Eine Langzeitdruckmessung am Funktionsmuster ohne Anwendung druckreduzierender Maßnahmen ergab einen für den Zeitraum eines Jahres extrapolierten Druckanstieg von 0,19 mbar/a. Die Versuchsdauer betrug knapp sieben Monate. Der Start- und Endwert der Druckmessung wurden derart gewählt, dass die Temperatur der Umgebungsluft sowie die mittlere Speichermantel- und die mittlere Speichermediumstemperatur ähnlich²¹ waren. Dies ist notwendig, da die Ergebnisse der Druckmessung eine ausgeprägte Abhängigkeit von diesen Einflussgrößen besitzen. Als Ursache hierfür werden die temperaturabhängige Volumenausdehnung der in der Vakuumwärmedämmung verbleibenden Restgase und mögliche temperaturabhängige Adsorptions- und Desorptionsprozesse von in der Vakuumwärmedämmung befindlichem Wasserdampf vermutet.

²⁰ Die zyklische Evakuierung fand mit einer Vakuumpumpe TRIVAC D16B statt und der Druck innerhalb der Vakuumwärmedämmung wurde bei gestoppter Vakuumpumpe mit einem Sensor des Typs Pfeiffer Vacuum TPR 280 erfasst.

²¹ Versuchsrandbedingungen: $\vartheta_{\text{amb,Start}} - \vartheta_{\text{amb,Ende}} = -4,62 \text{ K}$; $\bar{\vartheta}_{\text{Sp,Start}} - \bar{\vartheta}_{\text{Sp,Ende}} = 8,73 \text{ K}$;
 $\bar{\vartheta}_{\text{Mantel,Start}} - \bar{\vartheta}_{\text{Mantel,Ende}} = -0,06 \text{ K}$;

10 Entwicklung eines TWD-Modells für Warmwasserspeicher

Das thermische Verhalten eines außenaufgestellten Warmwasserspeichers (WWS) unterscheidet sich von dem eines innenaufgestellten WWS durch die deutlich dynamischeren Umgebungsbedingungen, wie z. B. der mit dem Tagesgang variierenden Umgebungslufttemperatur und der solaren Einstrahlung auf die Speicheraußenoberfläche.

In der Regel dominiert der thermische Widerstand der Wärmedämmung eines Warmwasserspeichers den gesamten Wärmedurchgang vom Speichermedium zur Umgebung. Der innere Wärmeübergang vom Speichermedium zur Speicherinnenoberfläche und der äußere Wärmeübergang von der Speicheraußenoberfläche zur Umgebungsluft werden bei theoretischen Betrachtungen daher häufig vernachlässigt. Dies ist gleichbedeutend mit der Annahme, dass auf der Speicherinnenoberfläche die Temperatur des Speichermediums und auf der Speicheraußenoberfläche die Umgebungslufttemperatur vorliegt. Unter dieser Voraussetzung kann bei Kenntnis der Umgebungsluft- bzw. Speichermediumtemperatur und des thermischen Widerstandes der Wärmedämmung der Wärmeverluststrom eines WWS bestimmt werden.

Bei außenaufgestellten WWS verursachen solare Gewinne eine Erwärmung der Speicheraußenoberfläche gegenüber der Umgebungslufttemperatur. Desweiteren ist ein Strahlungsaustausch mit dem sog. kalten Himmel in Zeiten ohne solare Einstrahlung vorhanden, der zu einer Verringerung der Speicheraußenoberflächentemperatur gegenüber der Umgebungslufttemperatur führt (siehe Kapitel 5.3.1). Um diese Einflüsse auf die Wärmeverluste und damit das thermische Verhalten eines Warmwasserspeichers quantifizieren zu können, ist ein analytisches Modell entwickelt worden. Dieses dient zur Bestimmung der Temperatur der Speicheraußenoberfläche, welche anschließend zur Bestimmung der Wärmeverluste unter Annahme der zuvor erläuterten Dominanz des thermischen Widerstands der Wärmedämmung genutzt werden kann.

Die Modellbildung des TWD-Modells²² basiert auf der Annahme, dass eine TWD den thermischen Widerstand der Wärmedämmung nicht beeinflusst. Die TWD verändert ausschließlich den Temperaturgradienten von Speichermedium zur Speicheraußenoberfläche. Dieses Berechnungskonzept bietet den Vorteil, dass in der Simulation des thermischen Verhaltens eines Warmwasserspeichers eine vollständige Entkoppelung zwischen Speicher und TWD vorliegt und somit die komplexen Wärmetransportvorgänge innerhalb der TWD nicht im Speichermodell abgebildet werden.

Die Modellierung und anschließende Simulation einer solarthermischen Anlage wird i. d. R. mit Hilfe von auf Energiebilanzen basierenden null-dimensionalen Simulationsprogrammen durchgeführt. Allerdings können Einzelkomponenten, wie z.B. das Modell eines Warmwasserspeichers, im Rahmen einer solchen Simulation mehrdimensionale Problemstellungen lösen. Die Konzeption und Umsetzung des im Folgenden erläuterten

²² Obwohl im Rahmen der nachfolgend erläuterten Modellentwicklung begrifflich ausschließlich auf ein TWD-Modell Bezug genommen wird, ist die Methodik der Bilanzierung bzw. das entwickelte Modell grundsätzlich auch dazu geeignet das thermischen Verhaltens der Speicheraußenoberflächen ohne TWD abzubilden.

TWD-Modells richtet sich an die Bedürfnisse einer solchen Simulationssoftware, im Speziellen an die des Simulationsprogramms TRNSYS²³.

Analytische Modelle für transparente Wärmedämmungen werden bevorzugt im Bereich gebäudeintegrierter, solarthermischer Komponenten eingesetzt /Eic12/, /Cap89/. TWD-Modelle für die Anwendung einer transparenten Wärmedämmung an einem außenaufgestellten WWS oder einem sog. integrierten Kollektor-Speicher-System sind weniger bekannt. Eine Ausnahme bildet die von /Tah81/ entwickelte Modellierung eines WWS mit TWD für die Außenaufstellung. Aufgrund der beschränkten Verfügbarkeit von adaptierbaren Modellen aus der Literatur und den spezifischen Anforderungen an die Modellierung (siehe Kapitel 11.2.1), wird im Kapitel 10.1 ein im Rahmen dieses Forschungsvorhabens neu entwickeltes TWD-Modell vorgestellt.

10.1 Modellbildung

Das im Folgenden erläuterte Modell einer TWD basiert auf einer instationären Energiebilanz eines Bilanzraums an der Speicheraußenoberfläche. In Abbildung 64 ist ein Schnitt durch ein Segment eines Warmwasserspeichers mit TWD und Vakuumwärmedämmung dargestellt.

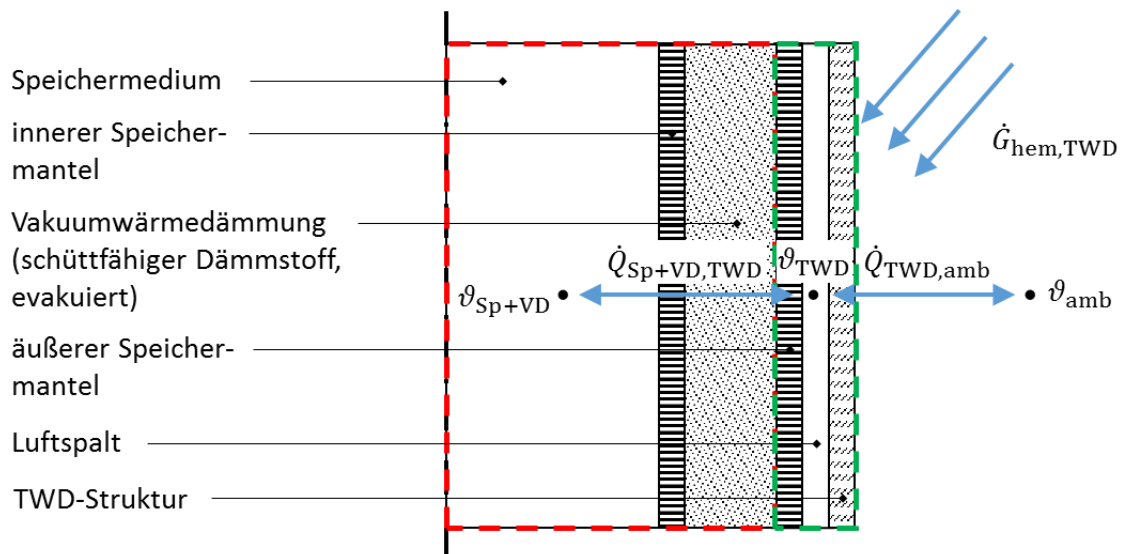


Abbildung 64. Schnitt durch ein Segment eines Warmwasserspeichers mit Vakuumwärmedämmung und transparenter Wärmedämmung; in rot ist der Bilanzraum Speichermedium und Vakuumdämmung, in grün der Bilanzraum TWD und in blau die Wärmeströme zwischen Speicher und Vakuumwärmedämmung sowie TWD und Umgebung dargestellt

Es ist der Wärmestrom $\dot{Q}_{Sp+VD,TWD}$ vom Speichermedium (inkl. Vakuumwärmedämmung) mit der Temperatur ϑ_{Sp+VD} zur TWD mit der Temperatur ϑ_{TWD} , ein Wärmestrom von der TWD mit der Temperatur ϑ_{TWD} zur Umgebungsluft mit der Temperatur ϑ_{amb} und eine solare Einstrahlung $\dot{G}_{hem,TWD}$ eingezeichnet. Der rote Bilanzrahmen umschließt das

²³ TRNSYS Version: 17.01.0025

Speichermedium und die Vakuumwärmedämmung ohne den äußeren Speichermantel, während der grüne Bilanzrahmen, im Folgenden als Bilanzraum TWD bezeichnet, den äußeren Speichermantel, die TWD-Struktur und den Luftspalt einschließt.

Der Bilanzraum Speichermedium und Vakuumwärmedämmung wird ausschließlich durch die Temperatur ϑ_{Sp+VD} repräsentiert. Damit wird ein Temperaturgradient innerhalb der Vakuumwärmedämmung nicht berücksichtigt bzw. die thermische Kapazität der Vakuumwärmedämmung bei einer Modellierung dem Speichermedium zugerechnet. Ausgenommen hiervon ist der äußere Speichermantel, der dem Bilanzraum TWD zugerechnet wird. An dieser Stelle muss darauf hingewiesen werden, dass je nach Parameteridentifikationsverfahren und Auswahl der Modellparameter keine eindeutige Trennung der für die beiden Bilanzräume bestimmten Parameter vorliegt.

Die in der TWD-Struktur, dem Luftspalt und dem Speichermantel erwarteten Wärmetransportphänomene sind in Abbildung 65 näher erläutert. Es werden die Wärmeströme zwischen dem Bilanzraum Speicher inkl. Vakuumwärmedämmung, TWD und Umgebung gezeigt. Das Vorhandensein der Wärme- und Stofftransportphänomene kann angenommen werden, da diese auch bei thermischen Flachkollektoren auftreten, deren struktureller Aufbau ähnlich des Aufbaus des hier gezeigten Bilanzraums TWD ist. Eine umfangreiche Diskussion der Relevanz der bei einem thermischen Flachkollektor auftretenden Wärmetransportphänomene, besonders im Hinblick auf die Modellierung solcher Systeme, gibt /Fis11/.

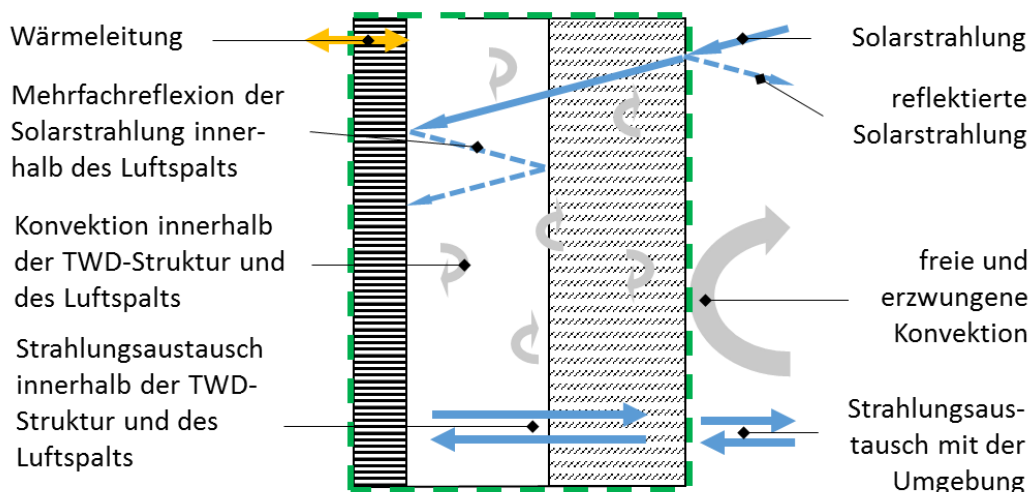


Abbildung 65. Ausschnitt des Bilanzraums TWD mit den erwarteten Wärmetransportphänomenen (unter Vernachlässigung eines Energietransports innerhalb der TWD)

Die instationäre Energiebilanz für den in Abbildung 65 dargestellten Bilanzraum zeigt Gleichung 10.1. Die Änderung der inneren Energie des Bilanzraums TWD dU_{TWD} nach der Zeit dt entspricht nach dem ersten Hauptsatz der Thermodynamik der Summe aller zu- und abgeführten Wärmeströme. Diese setzen sich aus der in den Bilanzraum eintretenden effektiven Solarstrahlungsleistung $\dot{G}_{hem,TWD} - \dot{G}_{refl,TWD}$ und der Summe aller

Wärmeverlustströme \dot{Q}_{Verl} vom Bilanzraum zur Umgebung bzw. zur Vakuumwärmedämmung durch Wärmeleitung, freie und erzwungene Konvektion und Wärmestrahlung zusammen.

$$\frac{dU_{\text{TWD}}}{dt} = \dot{G}_{\text{hem,TWD}} \cdot A_{\text{TWD}} - \dot{G}_{\text{refl,TWD}} \cdot A_{\text{TWD}} - \dot{Q}_{\text{Verl}} \quad (10.1)$$

Gleichung 10.1 kann mit folgenden Annahmen weiter vereinfacht werden, welche für die Modellierung einer TWD in Verbindung mit einem WWS geeignet erscheinen:

- Der äußere Speichermantel, der Luftspalt und die TWD-Struktur besitzt eine gemeinsame effektive Gesamtwärmekapazität $C_{\text{eff,TWD}}$ und eine einheitliche Temperatur ϑ_{TWD} .
- Die Summe aller Wärmeverlustströme durch Konvektion, Wärmeleitung und Strahlung über die Bilanzgrenze des Bilanzraums TWD werden mit einem effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten $k_{\text{eff,TWD}}$ modelliert.
- Der in den Bilanzraum eintretende und absorbierte Anteil der Solarstrahlung wird mit Hilfe des Transmissions-Absorptions-Produktes²⁴ $(\tau^* \alpha^*)_{\text{TWD}}$, das auch Mehrfachreflexionen innerhalb der TWD berücksichtigt, modelliert.
- Die differentielle Änderung der inneren Energie des Bilanzraums TWD nach der Zeit wird linearisiert.
- Ein Wärmetransport zwischen dem Bilanzraum Speichermedium und Vakuumwärmedämmung und dem Bilanzraum TWD findet nicht statt.

Die einzelnen Gleichungsanteile der Gl. 10.1 können mit den obenstehenden Annahmen bzw. mit den Gleichung 10.2 bis 10.4 weiter konkretisiert werden. Zusammenfassend liegt mit den Gleichungen 10.1 bis 10.4 ein Satz von Gleichungen vor, der die Vorausberechnung der Temperatur des Bilanzraums TWD bei Kenntnis der Modellkennwerte und der Eingangsgrößen sowie der Umgebungsbedingungen ermöglicht.

$$\frac{dU_{\text{TWD}}}{dt} \approx \frac{\Delta U_{\text{TWD}}}{\Delta t} = \frac{C_{\text{eff,TWD}} \cdot (\vartheta_{\text{TWD}}^n - \vartheta_{\text{TWD}}^{n-1})}{t^n - t^{n-1}} \quad (10.2)$$

$$\dot{Q}_{\text{Verl}} = k_{\text{eff,TWD}} \cdot A_{\text{TWD}} \cdot (\vartheta_{\text{TWD}}^n - \vartheta_{\text{amb}}) \quad (10.3)$$

$$\dot{G}_{\text{refl,TWD}} = \dot{G}_{\text{hem,TWD}} - \dot{G}_{\text{hem,TWD}} \cdot (\tau^* \alpha^*)_{\text{TWD}} \quad (10.4)$$

²⁴ Das Transmissions-Absorptions-Produkt $(\tau^* \alpha^*)$ ist ein aus der thermischen Solartechnik bekannter Kennwert, der den Anteil der effektiv absorbierten Strahlungsleistung eines abgedeckten Sonnenkollektors beschreibt. Der Transmissionsgrad des Transmissions-Absorptions-Produkts bezieht sich auf die transparente Abdeckung und der Absorptionsgrad bezieht sich auf den Absorber. $(\tau^* \alpha^*)_{\text{TWD}}$ besitzt einen größeren Wert als das Produkt des Transmissionsgrades der transparenten Abdeckung und des Absorptionsgrades des Absorbers bzw. der äußeren Oberfläche des Speichers, da Mehrfachreflexionen innerhalb des Luftspalts berücksichtigt werden (vgl. Abbildung 65).

Je nach Wahl der Approximation der differentiellen Ableitung der inneren Energie der TWD in Gleichung 8.1 bzw. der Komplexität der Modellierung der Wärmeverluste resultiert eine explizit zu lösende Bestimmungsgleichung oder ein implizit zu lösendes Gleichungssystem. Die Erhöhung der Komplexität der Modellierung der Wärmeverluste könnte, ähnlich wie für einen solarthermischen Kollektor in /Fis11/, z.B. durch die Einführung einer Temperatur-, Windgeschwindigkeits- und Einstrahlungsabhängigkeit des effektiven Wärmedurchgangskoeffizienten oder des Transmissions-Absorptions-Produktes bzw. einer Winkelabhängigkeit der solaren Bestrahlung erfolgen.

10.2 Modellverifizierung und -erweiterung

Um die grundsätzliche Tauglichkeit des Modells aus Kapitel 10.1 zu untersuchen, wurden gemessene Oberflächentemperaturen ausgewählter Versuchsreihen der Versuchsträger aus Kapitel 5.3.2 nachmodelliert. Nach einer Anpassung der Parameter $k_{\text{eff,TWD}}$, $C_{\text{eff,TWD}}$ und $(\tau^* \alpha^*)_{\text{TWD}}$ wurden die Oberflächentemperaturen der Versuchsträger mit der TWD Glas und ohne eine TWD aus den Messdaten der hemisphärischen Gesamtstrahlungsleistung in der Versuchsträgerebene und der Umgebungslufttemperatur berechnet. Ausgewählte Ergebnisse dieser Berechnungen zeigt Abbildung 66. Die zur Berechnung verwendeten Parameter sind in Tabelle 11 aufgelistet. Weitere, nicht dargestellte Modellierungsergebnisse zu den in Kapitel 5 untersuchten TWD-Strukturen zeigen, dass das Modell auch für deren Modellierung geeignet ist.

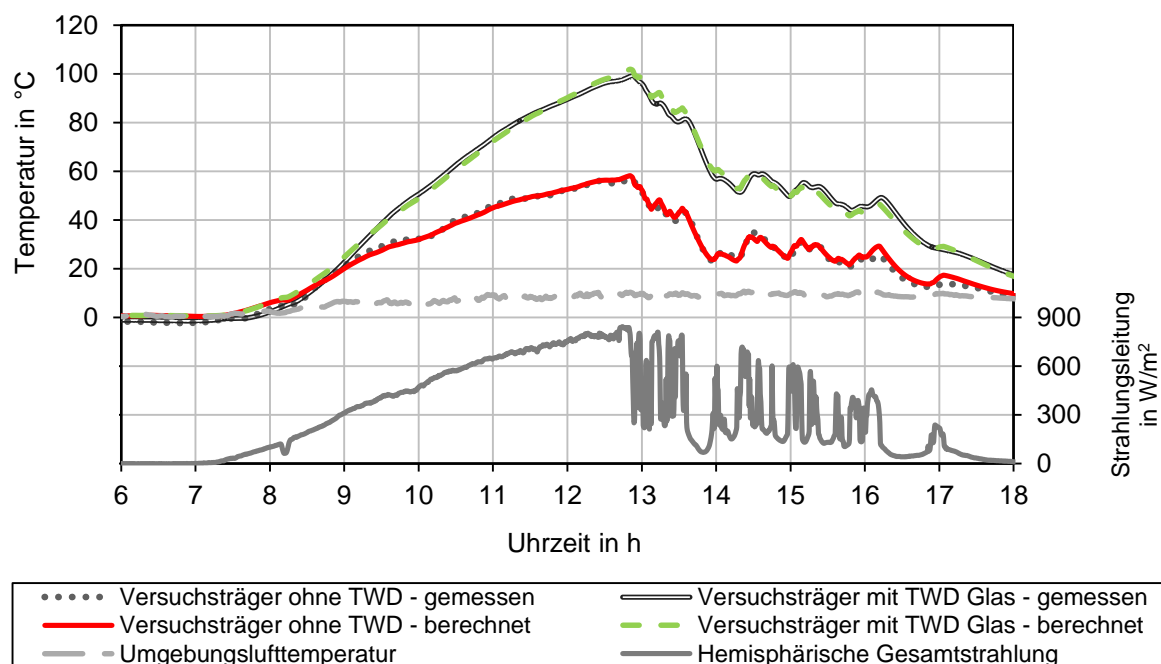


Abbildung 66. Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen für Versuchsträger mit und ohne TWD (Messdaten vom 06.03.2014); dargestellt sind die Temperaturen und die Strahlungsleistung über dem Tagesgang; Versuchsträger sind nach Süden orientiert bzw. senkrecht aufgeständert

Ebenfalls wird deutlich, dass das Modell die Temperaturen mit einer vertretbaren max. Abweichung von ± 5 K zur Messung vorausberechnen kann. Darüber hinaus kann festgehalten werden, dass die Größenordnung der Parameter $k_{\text{eff,TWD}}$ und $C_{\text{eff,TWD}}$ dem erwarteten Wertebereich entspricht, der sich aus einer theoretischen Berechnung mit den Stoffdaten der Versuchsträgermaterialien und Korrelationsgleichungen zum Wärmeübergang an einem thermischen Flachkollektor ergibt.

Zusammenfassend zeigt sich, dass das vorgestellte TWD-Modell geeignet ist, die Temperatur einer TWD in Abhängigkeit von der Umgebungslufttemperatur und der solaren Bestrahlung vorzuberechnen, jedoch nur für eine ebene und in eine Himmelsrichtung orientierte Fläche.

Tabelle 11. Parameter zur Berechnung der Temperaturen der TWD-Versuchsträger für eine Messung der TWD-Struktur Glas bzw. für eine Messung ohne TWD an den in Kapitel 5.2 vorgestellten Versuchsträgern; Randbedingungen: Südorientierte Versuchsträger in senkrechter Aufständigung

Parameter	Wert	Einheit
Effektive Gesamtwärmekapazität $C_{\text{eff,TWD}}$ (Versuchsträger mit TWD Glas)	8500	J/K
Effektive Gesamtwärmekapazität $C_{\text{eff,TWD}}$ (Versuchsträger ohne TWD)	8500	J/K
Effektiver Wärmedurchgangskoeffizient $k_{\text{eff,TWD}}$ (Versuchsträger mit TWD Glas)	5,4	W/(m ² ·K)
Effektiver Wärmedurchgangskoeffizient $k_{\text{eff,TWD}}$ (Versuchsträger ohne TWD)	14,0	W/(m ² ·K)
Transmissions-Absorptions-Produkt ($\tau^* \alpha^*$) (Versuchsträger mit TWD Glas)	0,67	
Transmissions-Absorptions-Produkt ($\tau^* \alpha^*$) (Versuchsträger ohne TWD)	0,95	

Aufbauend auf dieser Modellierung werden im Folgenden zwei Modelle mit der Bezeichnung „mitbewegte TWD“ bzw. „feststehende TWD“ vorgestellt. Diese berücksichtigen unter der Annahme verschiedener Vereinfachungen den Aspekt, dass am Funktionsmuster keine ausschließlich nach Süden orientierte, sondern eine durch die zylindrische Speicher Oberfläche in alle Himmelsrichtungen orientierte TWD vorliegt. Zur Erläuterung des jeweiligen Modellierungskonzepts sind beide Modelle in Abbildung 67 dargestellt.

Das Modell **mitbewegte TWD** nutzt das in Kapitel 10.1 entwickelte Modell, um die Temperatur der TWD eines 30°-Segments auf dem Zylindermantel vorzuberechnen. Es wird die Krümmung des 30°-Segments und eine mögliche Temperaturverteilung über der Höhe (siehe Kapitel 9.4) vernachlässigt. Das 30°-Segment ist bezüglich des Azimutwinkels optimal zur Sonne orientiert ($\Psi_{\text{TWD}} = \Psi_{\text{Sonne}}$), weshalb es im Tagesgang auf dem Zylindermantel seine Position ändert. Für die restlichen TWD-Flächen am Zylindermantel werden die folgenden Annahmen getroffen. Ausgehend von der Temperatur des 30°-Segments liegt ein linearer Temperaturabfall zur Umgebungslufttemperatur auf den restlichen Flächen der sonnenzugewandten Zylindermantelhälfte vor. Auf der sonnenabgewandten Zylindermantelhälfte wird die Umgebungslufttemperatur als TWD Temperatur angenommen. Um eine möglichst einfache Vorausberechnung der TWD-Temperatur zu ermöglichen, wird auf eine Bestimmung der Strahlungsleistung in der TWD-

Ebene des 30°-Segments verzichtet und im Modell die Globalstrahlung zur Berechnung genutzt.

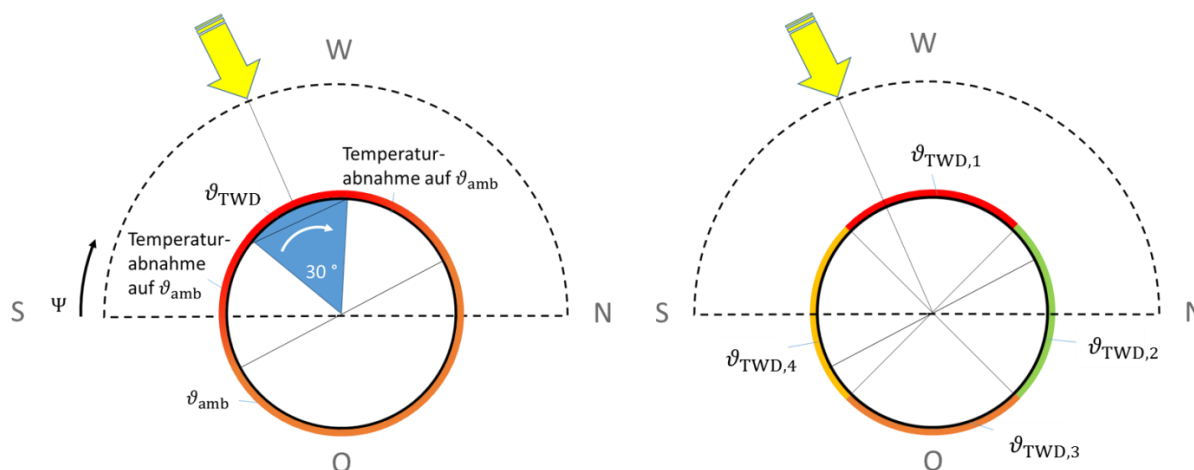


Abbildung 67. Schematische Darstellung der Modellvereinfachungen und -annahmen der Modelle mitbewegte TWD (links) und feststehende TWD (rechts) für einen horizontalen Schnitt durch einen zylindrischen Warmwasserspeicher

Beim Modell **feststehende TWD** wird die TWD Temperatur auf vier 90°-Segmente des zylindrischen Speichermantels, die eine Orientierung in Süd-, West-, Nord- und Ost-Richtung besitzen, mit dem Modell aus Kapitel 10.1 individuell bestimmt. Es erfolgt eine Berechnung der hemisphärischen Strahlungsleistung in der TWD-Ebene der einzelnen 90°-Segmente mit dem Modell nach Liu und Jordan /Duf06/ unter Verwendung der gemessenen Diffusstrahlung in der Horizontalen bzw. der gemessenen Globalstrahlung und unter Vernachlässigung von Bodenreflexionen.

Beide Modelle sind für Berechnungen im Rahmen einer Jahressimulation in der Software TRNSYS implementiert worden.

Zur Parameteridentifikation der Modellkennwerte der Modelle feststehende und mitbewegte TWD wird das nachfolgend dargestellte Vorgehen angewandt. Dieses hat sich zur Parameteridentifikation ähnlich gearteter Modelle bewährt, z. B. in /Dru07/ und /Fis11/. Im Vorgehen nach Abbildung 68 wird eine aus Messgrößen bestimmte und eine durch das jeweilige Modell bestimmte Kenngröße mit Hilfe einer Zielfunktion z verglichen. Für die beiden vorab erläuterten Modelle wird dazu die mittlere, gemessene TWD Temperatur des Zylindermantels $\bar{\vartheta}_{TWD,m}$ und die mittlere, berechnete TWD Temperatur des Zylindermantels $\bar{\vartheta}_{TWD,c}$ herangezogen. Als Zielfunktion dient die über alle Messzeitpunkte (bis zum Zeitpunkt t_N) integrierte Abweichung von $\bar{\vartheta}_{TWD,c}$ und $\bar{\vartheta}_{TWD,m}$ in Form des mittleren Fehlerquadrats. Eine Optimierungsfunktion variiert die Modellparameter derart, dass die Zielfunktion ein Minimum erreicht bzw. die Änderung der Zielfunktion einen Grenzwert unterschreitet. Auf die Problematik des Auffindens des globalen Minimums im Parameterraum soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden. Die erforderliche

Zeitschrittweite der Messdatenerfassung orientiert sich u. a. an der Dynamik der Zustandswechsel der Messgrößen.

Obwohl das Modell feststehende TWD grundsätzlich geeignet ist die vier TWD Temperaturen des Zylindermantels zu berechnen, wird bei diesem Modell, wie auch beim Modell mitbewegte TWD, ausschließlich eine über den Zylindermantel gemittelte TWD Temperatur bestimmt. Dies begründet sich dadurch, dass die von diesen Modellen bestimmt TWD Temperatur in Kapitel 11 dem TRNSYS Speichermodell Type 340 als Eingangsgröße der Umgebungstemperatur übergeben werden soll (siehe Kapitel 10) und diese nicht lokal unterschiedlich sein kann.

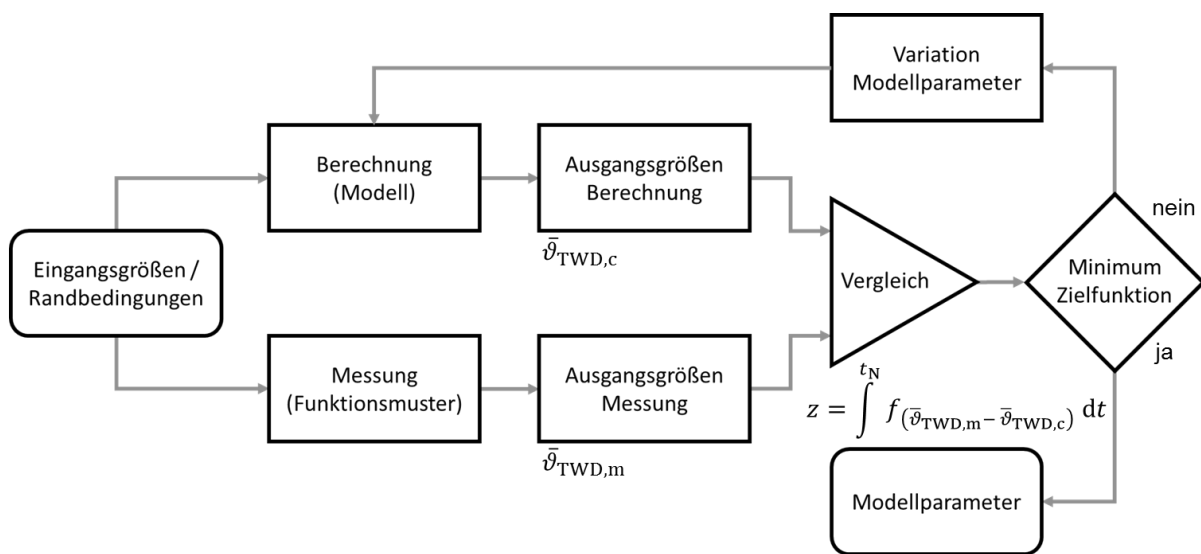


Abbildung 68. Allgemeines Schema zur Bestimmung von Modellparametern /Fis11/; zusätzlich zu den Schritten des Verfahrens sind die im hier vorliegenden Parameteridentifikation für das TWD-Modell benötigten Berechnungsgrößen für die Zielfunktion eingetragen

Zur Überprüfung, ob die Annahmen und Vereinfachungen des Modells nach Kap. 10.1 bzw. der Modelle feststehende und mitbewegte TWD sinnvoll gewählt wurden und zur Klärung, inwiefern das Parameteridentifikationsverfahren geeignete Modellkennwerte bestimmen kann, wird im nachfolgenden Kapitel eine Modellvalidierung durchgeführt.

10.3 Modellvalidierung

Die nachfolgend dargestellten Diagramme in Abbildung 69 und Abbildung 70 zeigen exemplarisch den Vergleich der berechneten mittleren TWD-Temperatur mit der gemessenen mittleren TWD-Temperatur für zwei unterschiedliche Zeiträume des Modells feststehende TWD. Die Ergebnisse für das Modell mitbewegte TWD sind zum Vergleich in Anhang E dargestellt. Es wird zwischen Verifizierungssequenzen und Validierungssequenzen unterschieden.

Bei einer **Verifizierungssequenz** werden Messdaten, die ebenfalls zur Parameteridentifikation verwendet wurden, mit berechneten Daten verglichen, während bei einer **Validierungssequenz** Messdaten, die nicht zur Parameteridentifikation herangezogen wurden, mit berechneten Daten verglichen werden.

Beim Vergleich der Kurvenverläufe zeigt sich, dass beide Modelle unabhängig von der Art der Sequenz das thermische Verhalten der TWD nachbilden können. Bei den Startwerten und im Bereich der Temperaturmaxima treten z. T. erhöhte Abweichungen zwischen Messung und Berechnung auf. Diese erhöhten Abweichungen deuten u. a. auf eine ungenügende Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit in der Modellierung der Wärmeverluste hin. Der Vergleich von Messungen und Berechnungen weiterer, nicht dargestellter Validierungssequenzen zeigt für die beiden Modelle vergleichbar gute Ergebnisse.

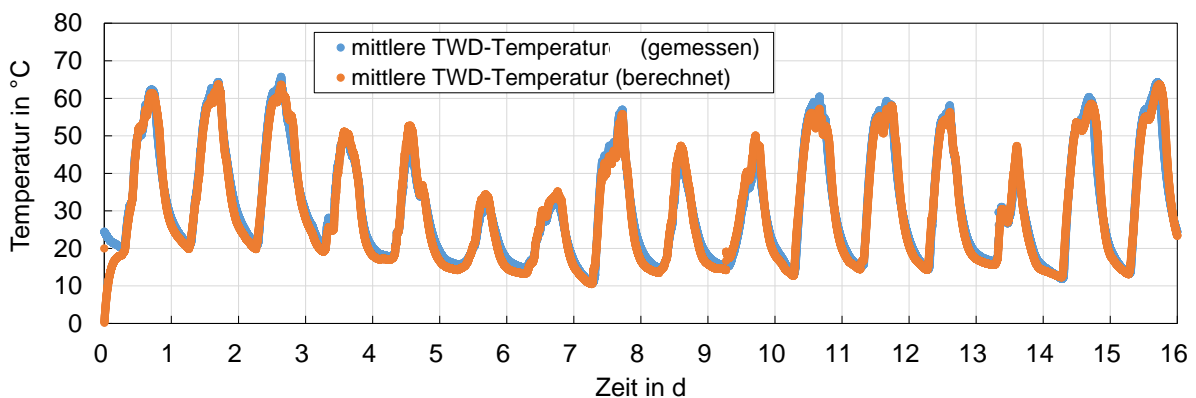


Abbildung 69. Vergleich der gemessenen und berechneten TWD Temperatur für das Modell feststehende TWD; aufgetragen über der Dauer des Messung (Zeitraum 11.08.15 bis 26.08.15, Verifizierungssequenz)

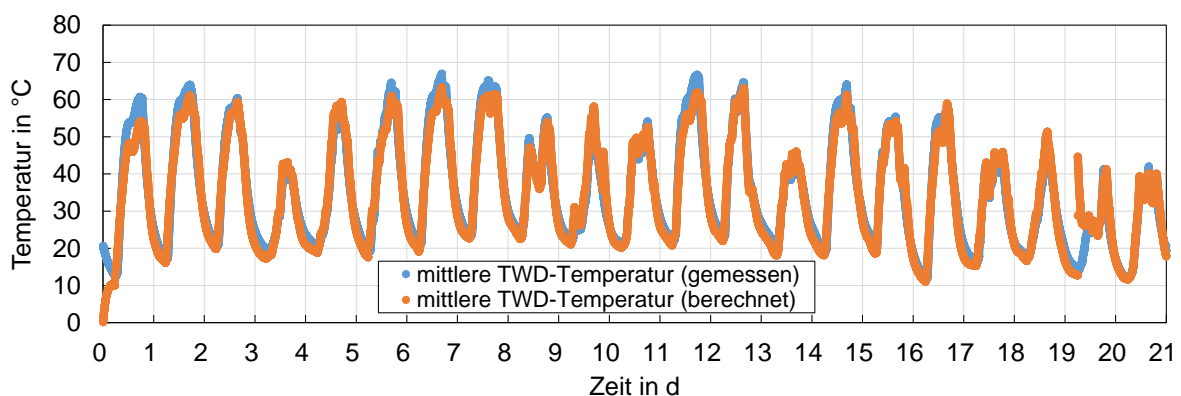


Abbildung 70. Vergleich der gemessenen und berechneten TWD Temperatur für das Modell feststehende TWD; aufgetragen über der Dauer des Messung (Zeitraum 10.07.15 bis 30.07.15, Validierungssequenz)

Ein direkter Vergleich der berechneten und gemessenen mittleren TWD Temperaturen der Modelle feststehende und mitbewegte TWD für eine Validierungssequenz ist in Abbildung 71 dargestellt.

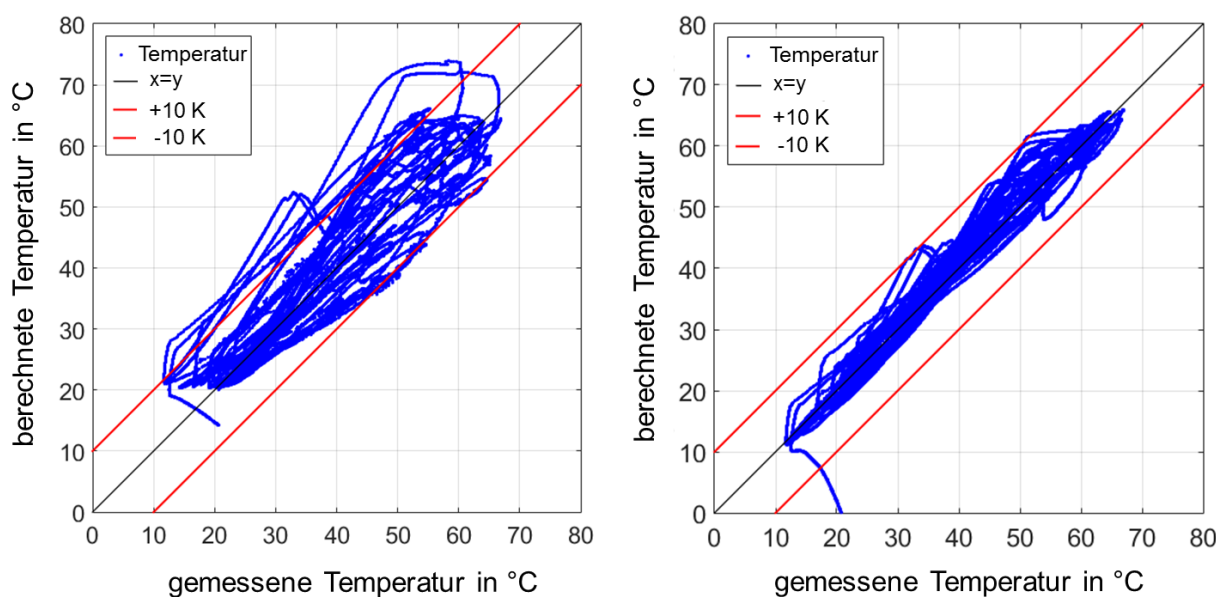


Abbildung 71. Vergleich der gemessenen und berechneten mittleren TWD Temperatur für die Modelle mitbewegte TWD (links) und feststehende TWD (rechts) für eine Validierungssequenz (Zeitraum 10.07.15 bis 30.07.15)

Es zeigt sich eine deutlich höhere Modellgüte bei der Vorhersage der TWD Temperatur des Modells feststehende TWD. Die Abweichung zwischen gemessener und berechneter mittlerer TWD Temperatur liegt beim Modell feststehende TWD zum überwiegenden Teil innerhalb eines Bereichs von ± 10 K, während diese beim Modell mitbewegte TWD z. T. deutlich größer als ± 10 K ist. Im Anfangszeitraum der Vorausberechnung mit dem Modell feststehende TWD verursacht eine ungünstig gewählte Starttemperatur bei $\bar{\vartheta}_{TWD,t=0} = 0$ °C eine erhöhte Abweichung. Beim Modell mitbewegte TWD wird als Starttemperatur $\bar{\vartheta}_{TWD,t=0} = \vartheta_{amb}$ gewählt, was zu geringeren Abweichungen führt. Werden die Verläufe der berechneten TWD Temperatur im Tagesgang betrachtet, so kann festgehalten werden, dass diese anfängliche Abweichung bei einer Berechnung von mehr als einem Tag nicht mehr von Bedeutung ist.

10.4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse aus Kapitel 10.3 haben gezeigt, dass das Modell feststehende TWD bessere Modellierungsergebnisse, als das Modell mitbewegte TWD liefert. Da beiden Modellen das in Kapitel 10.1 entwickelte gleichungsbasierte Berechnungskonzept zugrunde liegt, können die besseren Ergebnisse des Modells feststehende TWD auf eine geeignetere Umsetzung der TWD-Modellierung der Versuchsträger auf einen zylindrischen Speicher zurückgeführt werden. Das Modell feststehende TWD wird im Folgenden im Rahmen der Entwicklung des Abnahmeverfahrens (siehe Kapitel 11) und der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung (siehe Kapitel 12) genutzt.

Im Hinblick auf das Modell feststehende TWD kann festgehalten werden, dass ein guter Kompromiss zwischen notwendiger Modellkomplexität und messtechnischem Aufwand für

die Parameteridentifikation erreicht werden konnte. Für die Vorausberechnung der TWD-Temperatur sind die Globalstrahlung, die Diffusstrahlung in der Horizontalen und die Umgebungslufttemperatur messtechnisch zu erfassen.

Weiterführende Modellierungsarbeiten werden sich mit der Erhöhung der Modellkomplexität des TWD-Modells, jedoch ohne Einbezug weiterer und zusätzlich zu erfassender Messgrößen, und der Anwendung künstlicher neuronaler Netze als Modellierungsmethode befassen. Die Zielstellung dieser Arbeiten ist es, ohne messtechnischen Mehraufwand eine Verbesserung der Modellgüte zu erreichen, wobei die Allgemeingültigkeit der Modelle und die Qualität der Parameteridentifikation ebenfalls bewertet werden müssen. Zukünftige Arbeiten werden sich darüber hinaus mit der Problemstellung befassen, dass die durch die transparente Wärmedämmung erhöhte Oberflächentemperatur des Speichers einen Einfluss auf die wärmedämmenden Eigenschaften der Vakuumwärmedämmung hat (siehe Kapitel 4 und Kapitel 0), weshalb die eingangs getroffene Annahme einer vollständigen Entkoppelung zwischen WWS und TWD auf Gültigkeit geprüft werden muss.

11 Abnahmeverfahren für außenaufgestellte WWS

Das bewährte Prüfverfahren nach EN 12977-3 bzw. EN 12977-4, welches in /Dru07/ entwickelt wurde, dient zur Charakterisierung der thermischen Leistungsfähigkeit von Warmwasserspeichern, die sowohl zur Trinkwassererwärmung als auch zur Raumheizung eingesetzt werden. Die bei dieser Prüfung mit Hilfe von modellgestützten Parameteridentifikationsverfahren bestimmten Kenngrößen dienen primär zur Charakterisierung des thermischen Verhaltens der Warmwasserspeicher, wie dies z.B. für Jahressimulationen erforderlich ist. Zusätzlich können ausgewählte Kenngrößen auch zur Bewertung von Warmwasserspeichern z.B. im Rahmen eines Energy-Labeling /Bac13/ herangezogen werden. Das Prüfverfahren nach EN 12977-3 bzw. EN 12977-4 unterscheidet sich im Wesentlichen von weiteren und z. T. älteren Prüfverfahren (z.B. /AS 1056.1-1991/, /DIN V 4753-8/, /EN 60379:2004/, /EN 12897:2006/, /prEN 50440:2005/, /EN 15332:2007/) durch dessen expliziten, aber nicht ausschließlichen Bezug zu Warmwasserspeichern für solarthermische Anwendungen sowie insbesondere auch durch die Anwendung eines modellgestützten Prüfverfahrens. Dadurch erfolgt eine Fokussierung auf für solarthermische Warmwasserspeicher relevante Modellparameter, die in bisherigen Prüfverfahren nicht oder nur teilweise berücksichtigt wurden /EN 12977-3:2012/. Das Prüfverfahren nach EN 12977-3 und EN 12977-4 bzw. das diesem Verfahren zugrundeliegende Modell bildet durch dessen Fokussierung auf solarthermische Anwendungen eine geeignete Ausgangsbasis für die nachfolgend beschriebene Entwicklung des Abnahmeverfahrens.

Einen aktuellen Überblick über weitere nationale und internationale Normungstätigkeiten im Bereich thermischer Energiespeicher für Gebäudeenergiesysteme und industrielle Anwendungen gibt /Dnr15/.

Die Notwendigkeit der Erweiterung des Prüfverfahrens nach EN 12977-3 bzw. -4 für außenaufgestellte WWS im Rahmen der nachfolgenden Konzeptentwicklung ist der Tatsache geschuldet, dass die in EN 12977-3 und -4 beschriebenen Prüfsequenzen relativ konstante Betriebsbedingungen erfordern, welche für außenaufgestellte Warmwasserspeicher nicht oder nur erschwert realisierbar sind. Eine Außenaufstellung verursacht u. a. fluktuierende Wärmeverluste durch Windströmungen und schwankende Umgebungslufttemperaturen, nicht konstante Wärmestrahlungsverluste durch den Strahlungswärmeaustausch mit der bebauten Umgebung bzw. dem kalten Himmel und einen Einfluss der solaren Bestrahlung auf die Temperatur der Speicheraußenoberfläche bzw. einen Einfluss partieller Verschattungen.

11.1 Konzept des Abnahmeverfahrens

Das Ziel des nachfolgend erläuterten Abnahmeverfahrens ist die Bestimmung der Modellparameter eines WWS-Modells unter Berücksichtigung der durch die dynamischen Umgebungsbedingungen verursachten Einflüsse. Hierzu soll auch das in Kapitel 10 vorgestellte und validierte Modell feststehende TWD genutzt werden, um diese Einflüsse zu

quantifizieren und somit die Parameter des WWS-Modells, entsprechend deren Bedeutung, bestimmen zu können.

Die Basis des neu entwickelten Abnahmeverfahrens bildet das Prüfverfahren nach EN 12977-3 und -4. Das grundsätzliche Vorgehen bleibt unverändert, allerdings werden die Prüfsequenzen zur Parameteridentifikation aufgrund der Außenaufstellung bei nicht konstanten Umgebungsbedingungen durchgeführt, weshalb eine messtechnische Erfassung geeigneter Umgebungskenngrößen erforderlich wird.

Um den Einfluss der nicht konstanten Umgebungsbedingungen bei der Parameterbestimmung quantifizieren zu können, wird dem WWS-Modell statt der gemessenen Umgebungslufttemperatur die berechnete Temperatur des TWD-Modells als Umgebungstemperatur, welche indirekt die dynamischen Umgebungseinflüsse berücksichtigt, übergeben (siehe Abbildung 72). Die ursprünglichen Eingangsgrößen des WWS-Modells werden bei der Verknüpfung beider Modelle um die Eingangsgrößen des TWD-Modells, d.h. um \dot{G}_{glob} und $\dot{G}_{\text{dfu,hrz}}$ erweitert.

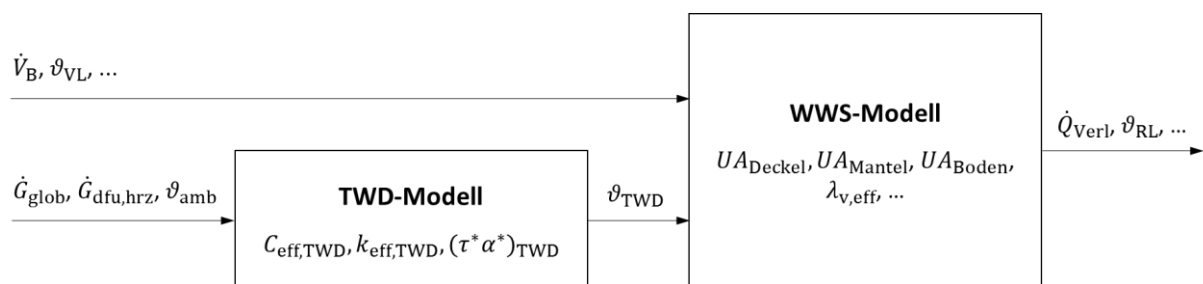


Abbildung 72. Schematisch dargestellte Verknüpfung des TWD-Modells und des WWS-Modells bezüglich der Modelleingangs- und Modellausgangsgrößen

Es wird bei der Verknüpfung der Modelle in Abbildung 72 in einer ersten Annahme davon ausgegangen, dass sich der Einfluss der Außenaufstellung ausschließlich durch eine veränderte Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung und nicht durch einen Einfluss auf den Wärmedurchgangskoeffizienten der Wärmedämmung bzw. des inneren und äußeren Wärmeübergangs bemerkbar macht. Als Umgebungstemperatur des WWS wird im Folgenden die gemittelte Oberflächentemperatur des äußeren Speichermantels bzw. die TWD-Temperatur betrachtet. Dies basiert auf der Annahme, dass der thermische Widerstand der Wärmedämmung deutlich größer ist als der thermische Widerstand des Wärmeübergangs an der Speicheraußenoberfläche bzw. der TWD zur Umgebung.

Die nachweislich inhomogene Oberflächentemperaturverteilung eines zylindrischen Warmwasserspeichers in Höhen- und Umfangsrichtung (siehe Kapitel 9.4) wird im folgenden Abnahmeverfahren durch eine einzige oberflächengemittelte Temperatur der Speicheraußenoberfläche- bzw. der TWD-Temperatur berücksichtigt. Diese Vereinfachung scheint aufgrund der deutlich höheren thermischen Kapazität des Speichermediums im Vergleich zum Speicheraußenmantel gerechtfertigt und ist die Voraussetzung für die Verknüpfung des in Kapitel 10 entwickelten TWD-Modells und des Multiport Store Model

Type 340 /Dru06/ aus TRNSYS. Der TRNSYS Type 340 ist für eine Parameteridentifikation nach EN 12977-3 und -4 geeignet.

Aufgrund der physikalischen Gültigkeit der Modellgleichungen²⁵ des dem Parameteridentifikationsverfahren nach EN 12977-3 und -4 zu Grunde liegenden Warmwasserspeichermodells können mit diesem in gewissem Umfang Umgebungszustände simuliert werden, die während der Parameteridentifikation nicht aufgetreten sind. Die gilt ebenso für das TWD Modell. Eine Modellvalidierung für den Bereich der tatsächlich auftretenden Betriebszustände ist jedoch, soweit möglich, vorzunehmen und für die beiden hier verwendeten Modelle auch erfolgt.

11.2 Praktische Umsetzung des Abnahmeverfahrens

Eine Möglichkeit das in Kapitel 11.1 erläuterte Konzept umzusetzen, ist die Durchführungen der in EN 12977-3 und -4 beschriebenen Prüfsequenzen an einem Außenprüfstand für Warmwasserspeicher (vgl. Kapitel 9.1) bei gleichzeitiger Messung der Globalstrahlung, der Diffusstrahlung, der Umgebungslufttemperatur und mehrerer Oberflächentemperaturen an der Speicheraußenoberfläche. Diese Messgrößen sind notwendig, um alle Einflüsse der dynamischen Umgebungsbedingungen auf die Temperatur der Speicheraußenoberfläche bzw. der TWD mit Hilfe des TWD-Modells zu berücksichtigen. Bei der anschließenden modellgestützten Parameteridentifikation wird ein nach EN 12977-3 bzw. -4 geeignetes Modell des Warmwasserspeichers und das entwickelte TWD-Modell gemäß Abbildung 72 kombiniert.

Die Parameteridentifikation für das TWD-Modell erfolgt vorab und losgelöst von der Parameteridentifikation für das WWS-Modell. Die Modellkennwerte können z. B. nach dem Vorgehen in Kapitel 10.2 bestimmt werden, welches ähnlich der EN 12977-3 bzw. EN 12977-4 dem Ansatz folgt, dass keine invasiven Messungen am Speicher vorgenommen werden müssen. Allerdings sind zur Bestimmung der Parameter des TWD-Modells neben der Globalstrahlung, der Diffusstrahlung in der Horizontalen und der Umgebungslufttemperatur mehrere Oberflächentemperaturen erforderlich, welche bei flächengewichteter Mittelung die Berechnung einer repräsentativen Speichermantel- bzw. TWD-Temperatur ermöglichen. Position und Anzahl der Temperatursensoren sind so zu wählen, das durch eine Flächengewichtung²⁶ eine repräsentative Temperatur ermittelt werden kann.

²⁵ Eine physikalische Gültigkeit kann z. B. bei Modellen angenommen werden, deren Modellierung auf den Erhaltungsgleichungen von Masse, Impuls und Energie basiert.

²⁶ Beim Funktionsmuster aus Kapitel 9.1 erfolgt die flächengewichtete Mittelung mit den Temperatursensoren T6.1, T3.2, T6.3, T3.4, T6.5, T3.6, T6.7, T3.8, T14.1, T11.2, T14.3, T11.4, T14.5, T11.6, T14.7, T11.8 (siehe Anhang D)

11.2.1 Kombination des TWD- und WWS-Modells

Die Kombination des neu entwickelten TWD-Modells mit dem WWS-Type 340 in TRNSYS ist im Folgenden exemplarisch zur Modellierung eines Auskühlversuchs mit homogener Starttemperaturverteilung (Zeitraum: 10.08.2015 bis 27.08.2015, siehe Kapitel 0) des Funktionsmuster angewendet worden.

Die Modellierung von Belade- und Entladeversuchen der EN12977-3 und -4 wurde nicht durchgeführt, da deren auf das Speichervolumen von 12 m³ angepasste Prüfsequenzen, im Speziellen die Sequenzen der L-Prüfung, aufgrund der begrenzten Regelbarkeit der Vorlauftemperatur am Außenspeicherprüfstand nicht durchführbar waren.

Es wurden zunächst die Kenngrößen des TWD-Modells entsprechend dem im Kap. 10.2 beschriebenen Vorgehen bestimmt. Im Anschluss daran wurden ausgewählte Modellkennwerte des WWS-Modells mit einem im Vergleich zu Kap. 10.2 modifizierten Parameteridentifikationsverfahren bestimmt, welches folgende Eigenschaften aufwies:

- Die Zielfunktion war definiert als die Summe der quadratischen Abweichung zwischen den fünf gemessenen und mit dem Type 340 berechneten Speichertemperaturen in fünf unterschiedlichen Höhen.
- Die identifizierten Modellparameter des Type 340 waren die Wärmeverlustrate der Mantelfläche, die Wärmeverlustrate des Speicherbodens, die Wärmeverlustrate des Speicherdeckels und die effektive vertikale Wärmeleitfähigkeit im Speichermedium.
- Bei der Parameteridentifikation mit dem WWS-Modell Type 340 wurde diesem nicht die gemessene Umgebungslufttemperatur als Eingangsgröße übergeben, sondern die vom TWD-Modell bestimmte mittlere TWD-Temperatur (siehe Abbildung 72).
- Der Aspekt, dass sich die TWD nur auf der Zylindermantelfläche und nicht am Boden bzw. am Deckel befindet, wird vernachlässigt.

Die mit dem Parameteridentifikationsverfahren ermittelten Kennwerte der Kombination von TWD- und WWS-Modell sind $UA_{\text{Mantel}} = 1,64 \text{ W/K}$, $UA_{\text{Deckel}} = 0,39 \text{ W/K}$, $UA_{\text{Boden}} = 5,57 \text{ W/K}$ und $\lambda_{v,\text{eff}} = 1,57 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Die mit dem WWS-Modell ohne TWD-Modell ermittelten Kennwerte sind $UA_{\text{Mantel}} = 0,88 \text{ W/K}$, $UA_{\text{Deckel}} = 0,42 \text{ W/K}$, $UA_{\text{Boden}} = 3,55 \text{ W/K}$ und $\lambda_{v,\text{eff}} = 1,77 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$. Die unterschiedlichen Werte der Wärmeverlustraten beider Fälle resultieren allein aus der Anwendung des TWD-Modells.

Abbildung 73 zeigt beispielhaft die gemessene Auskühlung des Funktionsmusters im Vergleich zur berechneten Auskühlung mit dem Type 340 bzw. der Kombination des TWD-Modells und des Type 340 auf verschiedenen Höhen im Speicher²⁷. Es ist durch die annähernd deckungsgleichen Kurvenverläufe ersichtlich, dass mit der Kombination des neu entwickelten TWD-Modells und des Type 340 die Auskühlung der einzelnen Segmente modelliert werden kann. Die Fluktuation der berechneten Temperatur des niedrigsten Speichersegments auf der Höhe h_5 , dessen thermisches Verhalten aus der im Vergleich zur

²⁷ Relative Höhen der mittleren Segmenttemperaturen mit dem Bezug Innenbehälterhöhe: $h_1/h_{\text{ges}} = 0,04$; $h_2/h_{\text{ges}} = 0,18$; $h_3/h_{\text{ges}} = 0,39$; $h_4/h_{\text{ges}} = 0,71$; $h_5/h_{\text{ges}} = 0,96$

Vakuumwärmedämmung schlechten Wärmedämmung des Bodens und der erhöhten Temperatur durch die TWD resultiert, wird im Vergleich zu berechneten Temperatur des WWS-Modells ohne TWD-Modell schlechter abgebildet. Dennoch zeigt die Abweichung der ermittelten Kennwerte des WWS-Type 340 mit und ohne TWD-Modell, dass durch die TWD das thermische Verhalten des Speichers deutlich beeinflusst wird.

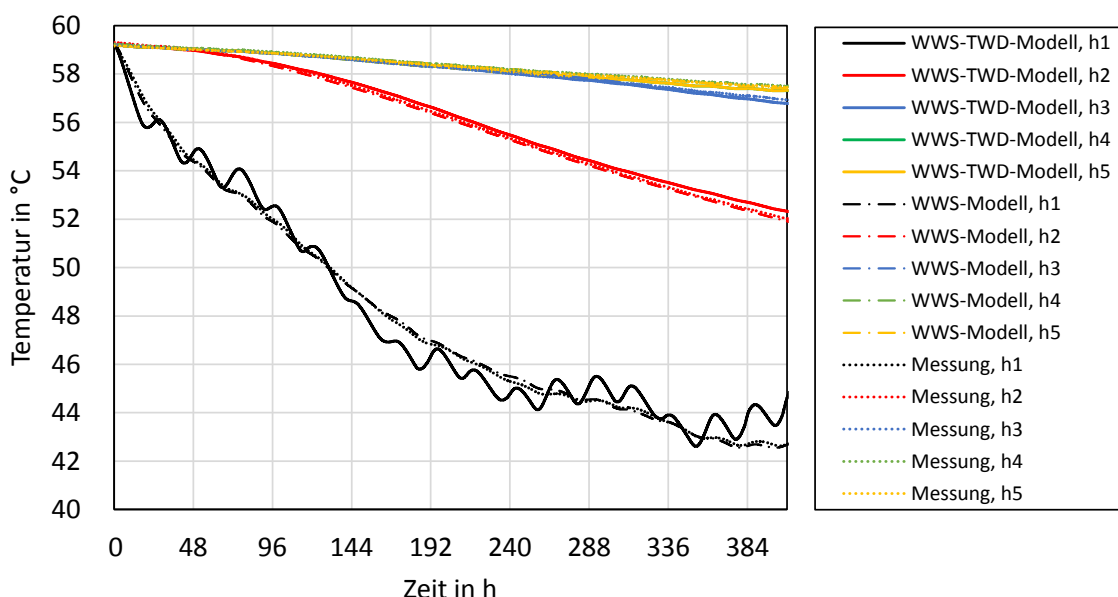


Abbildung 73. Vergleich gemessener und berechneter Temperaturen auf unterschiedlichen Höhen im Speicher (siehe Kapitel 9); die Berechnung erfolgt mit einer Kombination des Warmwasserspeichermodells Type 340 aus TRNSYS und dem neu entwickelten TWD Modell

Des Weiteren zeigt sich, dass die UA -Werte für Deckel, Mantel und Boden bei der Kombination der beiden Modelle höhere Werte als bei der Parameterbestimmung durch den Type 340 alleine aufweisen, da der positive Einfluss der TWD auf die Wärmeverluste beim Modell ohne TWD-Modell implizit in den UA -Werten berücksichtigt ist.

Wird der UA -Wert des Mantels bei Verwendung des TWD-Modells mit Hilfe des Formfaktors für koaxiale Rohre²⁸ gemäß /Han75/ auf eine effektive Wärmeleitfähigkeit umgerechnet, erhält man den Wert $\lambda_{\text{eff,Mantel}} = 12,0 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Die Ähnlichkeit dieses Wertes zur Größenordnung der messtechnisch ermittelten effektiven Wärmeleitfähigkeit im Labormaßstab (siehe Kapitel 4.4) bestätigt die grundsätzliche Funktionsfähigkeit der Kombination des TWD- und WWS-Modells. Die Wärmeverlustrate des Deckels ist im Vergleich zu einer mit Hilfe der geometrischen Verhältnisse zwischen Deckel und Mantel vereinfacht bestimmten theoretischen Wärmeverlustrate um $0,23 \text{ W/K}$ zu groß. Ein Vergleich der ermittelten effektiven vertikalen Wärmeleitfähigkeit mit der Wärmeleitfähigkeit von Wasser deutet darauf hin, dass dieser Parameter ebenfalls zu groß bestimmt wurde, wobei ein möglicher Wärmestrom über den Speichermantel, z. B. ermittelt nach /Dru07/, nicht berücksichtigt ist. Ursächlich dafür, dass die Wärmeverlustrate des

²⁸ Berechnungsgrundlage: $d_{\text{Sp,i}} = 1800 \text{ mm}$, $d_{\text{Sp,a}} = 2200 \text{ mm}$, $h_{\text{Mantel}} = 4400 \text{ mm}$

Deckels zu groß bestimmt wurde, ist vermutlich auch die Tatsache, dass die Wärmeverlustrate des Deckels sehr stark mit der Wärmeverlustrate des Mantels korreliert ist und daher im allgemeinen nicht als belastbare Größe ermittelt werden kann.

Der erhöhte Wert der Wärmeverlustrate UA_{Boden} ist aufgrund des nicht wärme gedämmten Bodens plausibel.

Ein weiterer Grund für die Unterschiedliche Güte der Ergebnisse der ermittelten UA -Werte kann in der Anwendung eines Auskühlversuchs als Prüfsequenz liegen, welche u. U. nur bedingt für die Parameterbestimmung der Kennwerte UA_{Deckel} und $\lambda_{v,\text{eff}}$ geeignet ist.

Weitere Parameteridentifikationen für das WWS-Modell mit und ohne TWD-Modell, mit variierten Startwerten des Optimierungsalgorithmus und mit einer reduzierten Anzahl an Parametern bzw. einer Vorgabe einzelner Parameter, zeigten vergleichbare Ergebnisse. Diese bestätigt die Funktionsfähigkeit der TWD-Modells und die Eignung des gewählten Parameteridentifikationsverfahrens.

11.2.2 Örtlich aufgelöste Bestimmung der Wärmeverlustrate

Der Detaillierungsgrad der Modellierung eines WWS mit dem Type 340 ist für Speichervolumen kleiner 5 m^3 vorgesehen und an den Ablauf des Prüfverfahrens nach EN 12977-3 und -4 angepasst. Mit dem Type 340 modellierte WWS werden häufig für solarthermische Anwendungen im Gebäude- und Quartiersbereich genutzt, weshalb sich die im Modell berücksichtigte Komplexität, z. B. hinsichtlich der Anzahl hydraulischer Anschlüsse oder Temperaturmessstellen, an den Ausstattungsmerkmalen solcher Speichern orientiert. Der WWS-Type 340 besitzt die Möglichkeit die Wärmeverlustrate über den Mantel in vier separate Bereiche bzw. zusätzlich in einen Boden- und Deckelbereich zu unterteilen und den vertikale Wärmetransport mit einer über der Höhe konstanten effektiven Wärmeleitfähigkeit zu berücksichtigen. Die seit Jahren mit dem Type 340 erfolgreich durchgeführten Jahressimulation von WWS in solarthermischer Anwendungen bestätigt die Tauglichkeit dieser Modellkomplexität.

Als Ergänzung zum Parameteridentifikationsverfahren mit dem Type 340 nach EN 12977-3 bzw. -4 wird im Folgenden ein vereinfachtes Vorgehen mit einem neuen WWS-Modell vorgestellt, dessen Zielstellung nicht auf einer späteren Jahressimulation des WWS, sondern ausschließlich auf der Bestimmung ausgewählter Kenngrößen mittels Parameteridentifikation liegt. Diese Zielgrößen sind die über der Speicherhöhe örtlich aufgelösten externen Wärmeverlusten UA_{ext} für jedes Speichersegment bzw. die internen Wärmeverlusten²⁹ UA_{int} zwischen den Speichersegmenten. Die Abgrenzung zur Modellierung mit dem WWS-Modell Type 340 besteht in den über der Speicherhöhe deutlich höher aufgelösten externen und internen Wärmeverlusten, die ggf. eine

²⁹ Die interne Wärmeverlustrate UA_{int} eines Segments stellt ein Maß für die Stärke des Wärmestroms zwischen diesem Segment und seinen direkt angrenzenden Segmenten dar, siehe Gl. 11.3 und 11.4. Begrifflich orientiert sich diese Kenngröße an der Namensgebung der externen Wärmeverlustrate, wobei ein interner Wärmestrom bei einer integralen Betrachtung des Speichers keinen Verlust an thermischer Energie sondern nur an Exergie verursacht.

weiterführende Interpretation der thermischen Verhaltens des WWS bezüglich seiner Wärmeverluste erlaubt. Eine lokal erhöhte externe Wärmeverlustrate könnte z. B. auf eine Wärmebrücke in der Wärmedämmung und eine lokal erhöhte interne Wärmeverlustrate könnte z. B. auf einen verstärkten Wärmetransport innerhalb des Speichermediums durch Speichereinbauten hindeuten. Voraussetzung für die Anwendung dieses Modells ist die Kenntnis des zeitlichen Verlaufs der Temperaturen einzelner Speichersegmente, was die Anwendung von Temperatursensoren im Speicher erfordert.

Dieses Modell basiert darauf, dass der Speicher in vertikaler Richtung in eine bestimmte Anzahl horizontaler Segmente unterteilt wird. Mittels entsprechender Gleichungen wird die Temperatur jedes Speichersegments mit Hilfe des ersten Hauptsatzes der Thermodynamik, ähnlich dem Vorgehen in /Cru10/ berechnet. Es werden für jedes Segment die individuellen ein- und austretenden Wärmeströme bestimmt, deren Summe einen Rückschluss auf die Änderung der inneren Energie bzw. der Temperaturänderung des Segments erlaubt. Die in ein Segment ein- und austretenden Wärmeströme und die Änderung der inneren Energie des Segments werden nach Gl. 11.1 bis Gl. 11.5 berechnet.

In Abbildung 74 ist ein Ausschnitt eines schematisch dargestellten und in mehrere Segmente unterteilten WWS gezeigt. Wird das Segment der Temperatur $\vartheta_{\text{Seg},i}^n$ zum Zeitpunkt n betrachtet, so tritt ein Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{int},i+1 \rightarrow i}$ in das Segment ein und ein Wärmestrom $\dot{Q}_{\text{int},i \rightarrow i-1}$ tritt aus diesem aus. Weiterhin tritt eine Wärmetransport zwischen dem Segment und der Umgebung $\dot{Q}_{\text{ext},i}$ auf, dessen Richtung von der Segmenttemperatur und der externen Temperatur abhängt. Die externe Temperatur kann je nach Modellrandbedingungen z. B. die Umgebungslufttemperatur oder die mittlere TWD-Temperatur sein. Eine Wärmestrom von tiefer gelegenen Segmenten in höher gelegene Segmente wird vom Modell nicht abgebildet, da durch auftriebsinduzierte Mischungsvorgänge solche Temperaturinversionslagen im realen Speicherbetrieb in einem stationären Zustand nicht vorliegen.

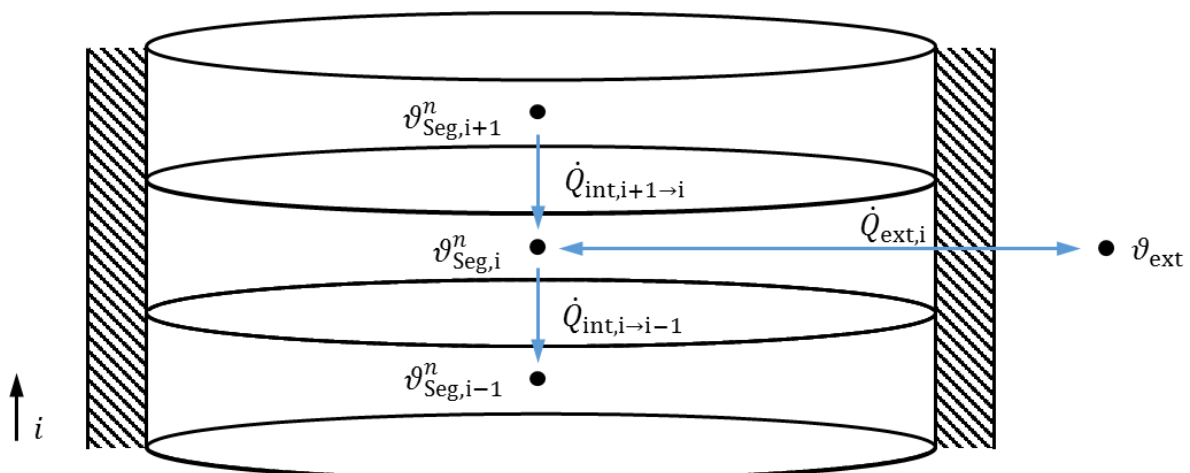


Abbildung 74. Ausschnitt mehrerer schematisch dargestellter Segmente eines Warmwasserspeichers zylindrischer Grundform; es sind die ein Segment repräsentierende Knotentemperatur, die ein- und austretenden internen und externen Wärmeströme und die Definition des Laufindex i dargestellt

$$dU_{\text{Seg},i}/dt = \dot{Q}_{\text{int},i+1 \rightarrow i} + \dot{Q}_{\text{int},i \rightarrow i-1} + \dot{Q}_{\text{ext},i} \quad (11.1)$$

$$dU_{\text{Seg},i}/dt \approx \Delta U_{\text{Seg},i}/\Delta t = C_{\text{eff,Seg},i}/\Delta t \cdot (\vartheta_{\text{Seg},i}^{n+1} - \vartheta_{\text{Seg},i}^n) \quad (11.2)$$

$$\dot{Q}_{\text{int},i+1 \rightarrow i} = UA_{\text{int},i+1 \rightarrow i} \cdot (\vartheta_{\text{Seg},i+1}^n - \vartheta_{\text{Seg},i}^n) \quad (11.3)$$

$$\dot{Q}_{\text{int},i \rightarrow i-1} = UA_{\text{int},i \rightarrow i-1} \cdot (\vartheta_{\text{Seg},i-1}^n - \vartheta_{\text{Seg},i}^n) \quad (11.4)$$

$$\dot{Q}_{\text{ext},i} = UA_{\text{ext},i} \cdot (\vartheta_{\text{ext}} - \vartheta_{\text{Seg},i}^n) \quad (11.5)$$

Das Modell wurde in der Software EES³⁰ erstellt, welche über ein implementiertes Parameteridentifikationsverfahren auf Basis eines Gleichungslösers verfügt. Die Stoffwerte für das Speichermedium, z. B. die effektive Wärmekapazität eines Segments $C_{\text{eff,Seg},i}$, und die Informationen zur Speichergeometrie sind als einstellbare Parametern hinterlegt. Beim Vorhandensein einer Temperaturinversion zwischen zwei Segmenten (z. B. $\vartheta_{\text{Seg},i}^n > \vartheta_{\text{Seg},i+1}^n$) ist ein sog. analytisches Mischen dieser beiden Segmente vorgesehen, bei dem der interne Wärmetransport zwischen zwei Segmenten für den jeweiligen Zeitschritt durch die Erhöhung der internen Wärmeverlustrate um den Faktor 100 verstärkt wird. Die grundsätzliche Funktionsfähigkeit des entwickelten WWS-Modells konnte bereits an mehreren WWS, u. a. an den vakuumwärmegedämmten Speichern aus Kapitel 7, gezeigt werden /Wil15/.

Für einen Auskühlversuch des Funktionsmusters (siehe Kapitel 0) sind exemplarisch die Modellparameter mit dem neu entwickelte WWS-Modell und dem in der Software EES integrierten Parameteridentifikationsverfahren bestimmt worden. Dabei sind die Modellparameter, ähnlich dem Vorgehen in Kapitel 10.2, derart variiert worden, dass die aufsummierte quadratische Abweichung zwischen gemessener Temperatur der Speichersegmente und berechneter Temperatur ein lokales Minimum erreicht bzw. die Änderung der Abweichung einen definierten Grenzwert unterschreitet. Das Modell verfügt über 45 Segmente, die jeweils eine individuelle externe Wärmeverlustrate besitzen, und über 44 interne Wärmeverlustraten, die aufgrund der begrenzten Parameteranzahl in EES z. T. über der Speicherhöhe identisch angenommen wurden. Weitere Randbedingungen sind in Tabelle 12 aufgelistet. Die Ergebnisse der Parameteridentifikation sind in Tabelle 13 für verschiedene Randbedingungen (siehe Tabelle 12) zusammengefasst und in Abbildung 75 grafisch dargestellt.

³⁰ Engineering Equation Solver, Version: V10.027

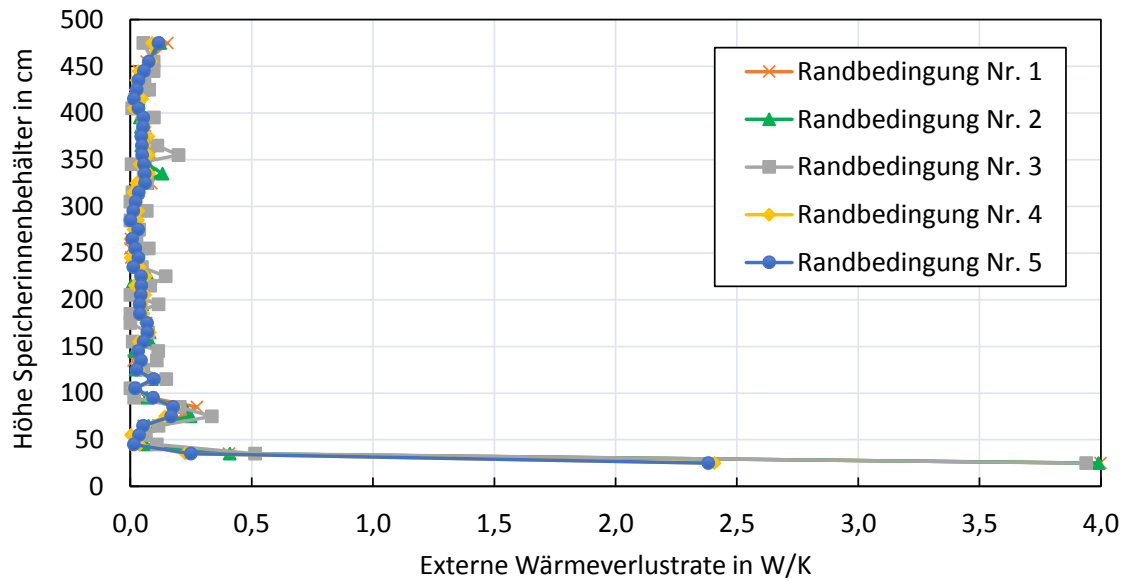


Abbildung 75. Ergebnisse der Parameteridentifikation bei unterschiedlichen Randbedingungen (siehe Tabelle 12); dargestellt sind die externen Wärmeverlustraten als Funktion von der auf eine zylindrische Grundform umgerechneten Speicherinnenbehälterhöhe

Tabelle 12. Randbedingungen der Parameteridentifikation für die Modellierung eines Auskühlversuchs

Nr.	ϑ_{ext}	Randbedingung
1	$\bar{\vartheta}_{TWD}$	Die Temperatur $\bar{\vartheta}_{TWD}$ ist über die TWD-Oberfläche (flächengewichtet) und den Messungszeitraum gemittelt; die Kennwerte UA_{int} aller Segmente sind identisch
2	$\bar{\vartheta}_{TWD}$	Die Temperatur $\bar{\vartheta}_{TWD}$ ist über die TWD-Oberfläche (flächengewichtet) und den Messungszeitraum gemittelt; die Kennwerte UA_{int} der Segmente 11 bis 34 sind identisch
3	$\bar{\vartheta}_{TWD}$	Die Temperatur $\bar{\vartheta}_{TWD}$ ist über die TWD-Oberfläche (flächengewichtet) gemittelt; die Kennwerte UA_{int} der Segmente 11 bis 34 sind identisch
4	ϑ_{amb}	Die Temperatur ϑ_{amb} ist die Umgebungstemperatur; die Kennwerte UA_{int} der Segmente 11 bis 34 sind identisch
5	ϑ_{amb}	Die Temperatur ϑ_{amb} ist die Umgebungstemperatur; die Kennwerte UA_{int} aller Segmente sind identisch

Tabelle 13. Ergebnisse einer Parameteridentifikation des neu entwickelten WWS-Modells

RB-Nr.	$UA_{ext,Mantel}$ ¹ in W/K	$UA_{ext,Deckel}$ ² in W/K	$UA_{ext,Boden}$ ³ in W/K	$UA_{ext,ges}$ in W/K	$\bar{UA}_{int,ges}$ ⁴ in W/K
1	2,20	0,22	4,40	6,82	19,97
2	2,27	0,20	4,40	6,87	20,02
3	2,87	0,15	4,45	7,47	20,13
4	1,90	0,17	2,63	4,70	12,17
5	1,90	0,19	2,63	4,72	11,73

¹ Die ext. Wärmeverluste des Mantels wird durch die Summation der individuellen ext. Wärmeverlustraten der Segmente $i = 3$ bis $i = 43$ ermittelt.

² Die ext. Wärmeverluste des Deckels wird durch die Summation der individuellen ext. Wärmeverlustraten der Segmente $i = 44$ und $i = 45$ ermittelt.

³ Die ext. Wärmeverluste des Bodens wird durch die Summation der individuellen ext. Wärmeverlustraten der Segmente $i = 1$ und $i = 2$ ermittelt.

⁴ Die mittlere int. Wärmeverluste wird durch Mittelung aller int. Wärmeverlustraten der Segmente ermittelt.

Die Kurvenverläufe der externen Wärmeverlusten der einzelnen Segmente als Funktion von der Speicherhöhe in Abbildung 75 sind für alle Randbedingung ähnlich. Im Mantelbereich besitzen alle Segmente eine über der Speicherhöhe ähnliche externe Wärmeverluste, mit Ausnahme von zwei Segmenten auf einer Höhe von 75 cm und 85 cm, die eine lokal erhöhte Wärmeverluste zeigen. Die externe Wärmeverluste des Bodensegments ist deutlich erhöht, während die externe Wärmeverluste im Deckelbereich, trotz der größeren wärmeübertragenden Fläche, keine relevante Erhöhung im Vergleich zum Mantelbereich zeigt. Eine Ursache für die erhöhten externen Wärmeverlusten auf einer Speicherhöhe von 75 cm und 85 cm könnte eine Wärmebrücke durch eine in der Vakuumwärmedämmung verlaufende Rohrleitung sein. Ein Vergleich der Ergebnisse der Kombination des TWD- und WWS-Modells (siehe Kapitel 11.2.1) und der des vereinfachten Modells zeigt, dass unabhängig von den gewählten Randbedingungen beide Modellierungen bezüglich der externen Wärmeverlusten zu ähnlichen Ergebnissen führen.

Die Größenordnung des Verhältnisses $UA_{\text{ext,Deckel}}/UA_{\text{ext,Mantel}}$ entspricht annähernd dem des geometrischen Flächenverhältnisses $A_{\text{Deckel}}/A_{\text{Mantel}}$ zwischen Deckel und Mantel für die Randbedingungen 1, 2, 4 und 5. Die mittlere interne Wärmeverluste der mit den Randbedingungen 4 und 5 durchgeführten Parameteridentifikation zeigt, im Vergleich zu einer aus der Wärmeleitfähigkeit von Wasser theoretisch ermittelten internen Wärmeverluste von 17 W/K, nicht plausible Ergebnisse. Darüber hinaus unterscheiden sich die externen Gesamtwärmeverlusten dieser Randbedingungen deutlich von den Randbedingungen 1, 2 und 3. Bei der Modellierung mit den Randbedingungen 4 und 5 wurde als externe Temperatur die Umgebungslufttemperatur angenommen, weshalb durch die solaren Gewinne der TWD bei den externen Wärmeverlusten eine Reduktion im Vergleich zu der Modellierung mit der TWD-Temperatur als externe Temperatur auftritt.

Ein Vergleich der externen Gesamtwärmeverluste der Randbedingungen 1, 2 und 3 zeigt ebenfalls eine gute Übereinstimmung mit der rechnerisch ermittelten Gesamtwärmeverluste des kombinierten WWS- und TWD-Modells aus Kapitel 11.2.1.

Eine Umrechnung der externen Wärmeverlusten des Mantels mit Hilfe des Formfaktors für koaxiale Rohre³¹ gemäß /Han75/ auf eine effektive Wärmeleitfähigkeit der Vakuumwärmedämmung ergibt folgende Ergebnisse: $\lambda_{\text{eff,RB1}} = 16,0 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\lambda_{\text{eff,RB2}} = 16,5 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\lambda_{\text{eff,RB3}} = 20,8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$, $\lambda_{\text{eff,RB4}} = 13,8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$ und $\lambda_{\text{eff,RB5}} = 13,8 \text{ mW}/(\text{m}\cdot\text{K})$. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Modellierung mit den Randbedingungen 1 und 2 plausible und zur Parameteridentifikation aus Kapitel 11.2.1 ähnliche Ergebnisse liefert. Weiterhin wird deutlich, dass die Wahl der Randbedingungen einen entscheidenden Einfluss auf die Bestimmung der Modellparameter hat.

³¹ Berechnungsgrundlage: $d_{\text{Sp,i}} = 1800 \text{ mm}$, $d_{\text{Sp,a}} = 2200 \text{ mm}$, $h_{\text{Mantel}} = 4400 \text{ mm}$

11.3 Zusammenfassung

Die Modellierungsergebnisse des TWD-Modells in Verbindung mit dem WWS-Modell Type 340 haben gezeigt, dass die dynamischen Umgebungsbedingungen durch die Kombination beider Modelle das thermische Verhalten eines WWS mit TWD abbilden können. Werden die dynamischen Umgebungsbedingungen nicht modelliert, sind Einflüsse, wie z. B. solare Gewinne, nur indirekt in den Modellkenngrößen enthalten und können nicht separat quantifiziert werden.

Als Ergänzung zum Parameteridentifikationsverfahren nach der EN 12977-3 bzw. -4 ist ein Verfahren entwickelt worden, dessen Fokus auf der Bestimmung der örtlich aufgelösten externen und internen Wärmeverlustrate liegt. Dies ermöglicht es u. a. Erkenntnisse zu den lokalen Eigenschaften der Wärmedämmung, zum Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen auf die Modellierungsergebnisse und zum notwendigen Grad der Modellkomplexität zu erlangen. Die Möglichkeit zur, im Vergleich zum WWS-Modell Type 340, örtlichen Auflösung der internen Wärmeverlustrate, kann besonders für großvolumige WWS relevant sein, da die notwendige Qualität der Modellierung der internen Wärmeverlustrate bei einer höheren örtlichen Auflösung der externen Wärmeverlustrate an Bedeutung zunimmt.

Zukünftige Arbeiten zur Modellierung der dynamischen Umgebungsbedingungen außenaufgestellter WWS könnten sich mit der Implementierung der neu entwickelten Modelle in die Prüfsequenzen der EN 12977-3 bzw. -4 und der Einbindung von künstlichen neuronalen Netzen als ergänzende Modellierungsmethode in die EN 12977-3 bzw. -4 befassen. Darüber hinaus ist vorgesehen, zusätzlich zum Parameteridentifikationsverfahren nach EN 12977-3 bzw. -4 das auf Prüfsequenzen basiert die mittels eines Speicherprüfstands bzw. bei EN 12977-3 alternativ auch im Zusammenhang mit einer Systemtest nach ISO 9459-5 gemessen werden, eine auf in-situ-Messdaten basierendes Verfahren zu entwickeln, was besonders für großvolumiger Speicher, die nicht vorab an Innen- und Außenprüfständen untersucht werden können, zur Qualitätssicherung dienen könnte.

12 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

In der folgenden Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird ein Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung (VWD) mit einem Warmwasserspeicher mit konventioneller Wärmedämmung (kWD) hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit verglichen. Zusätzlich wird der Einsatz einer transparenten Wärmedämmung (TWD) bei einer Außenaufstellung des Speichers untersucht. Die Wirtschaftlichkeit eines Warmwasserspeichers hängt u. a. von der Wärmeversorgungsanlage, in welche dieser integriert ist, ab. Es werden daher Warmwasserspeicher mit unterschiedlicher Speichergröße, unterschiedlicher Art der Wärmedämmung und unterschiedlichem Aufstellungsort im Anwendungsfall eines SolarAktivHauses (SAH) und eines Kindergartens (Kiga) untersucht. Durch eine verbesserte Wärmedämmung des Warmwasserspeichers verringert sich das für einen bestimmten solaren Deckungsanteil und sonst gleichbleibenden Randbedingungen notwendige Speichervolumen. Es werden die Kosten eines Warmwasserspeichers mit kWD und VWD verglichen, der nötig ist, um bei einem SolarAktivHaus (SAH) einen solaren Deckungsanteil von 70 und 80 % und bei einem Kindergarten einen solaren Deckungsanteil von 40 % und 43 % zu erzielen. Zudem werden die Grenzkosten, bis zu welchen eine TWD wirtschaftlich ist, für diese Szenarien ermittelt.

12.1 Speicherpreise und Kosten für umbauten Wohnraum

Wie in Abbildung 76 zu erkennen ist, sinken die Preise pro m³ Warmwasservolumen mit steigender Speichergröße. Bei einem Warmwasservolumen von 59,3 m³ werden 934 €/m³ erreicht. Für einen Speicher mit 100 m³ Warmwasservolumen können nach Information der Fa. Sirch ab einer hinreichenden Abnahmemenge Preise < 900 €/m³ erwartet werden.

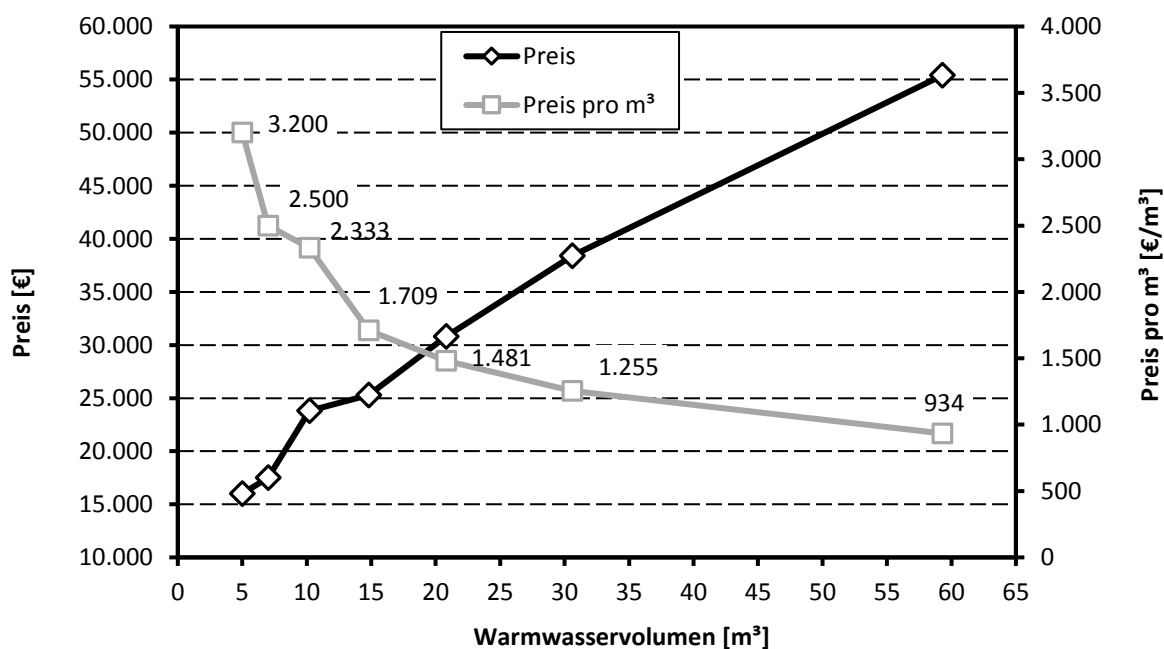


Abbildung 76. Preise (ohne USt) für vakuumwärmedämmte Warmwasserspeicher der Fa. Sirch

Die Preise und Warmwasservolumina der in dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung untersuchten Speicher der Fa. Sirch sind Tabelle 14 zu entnehmen. Alle in diesem Kapitel genannten Kosten und Preise enthalten keine Umsatzsteuer.

Tabelle 14. Preise für Warmwasserspeicher der Fa. Sirch

Warmwasservolumen [m ³]	Preis mit VWD [€]	Preis mit kWD [€]
5	16.000	7.480
7	17.500	9.430
10,2	23.800	12.100
14,8	25.300	16.680
20,8	30.800	22.980
30,6	38.400	24.280
59,3	55.400	41.670

Für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung werden auch die Preise für Speicher benötigt, deren Warmwasservolumen von den Werten der Tabelle 14 abweichen. Diese Preise wurden mit Hilfe von polynomen Kurven interpoliert, die an die Werte aus Tabelle 14, angenähert wurden. Die Funktionen dieser Preiskurven sind in Zahlenwert-Gleichung 12.1 für Speicher mit VWD und in Zahlenwert-Gleichung 12.2 für Speicher mit kWD dargestellt.

$$Preis_{Sp,VWD} [\text{€}] = -5,2104 \cdot V_{Sp}^2 [\text{m}^3] + 1050,5 \cdot V_{Sp} [\text{m}^3] + 11367 \quad (12.1)$$

$$Preis_{Sp,kWD} [\text{€}] = -4,1303 \cdot V_{Sp}^2 [\text{m}^3] + 877,76 \cdot V_{Sp} [\text{m}^3] + 3827,6 \quad (12.2)$$

Mit:

$Preis_{Sp,VWD}$: Preis für einen vakuumwärmegedämmten Speicher [€]

$Preis_{Sp,kWD}$: Preis für einen konventionell wärmegedämmten Speicher [€]

V_{Sp} : Warmwasservolumen des Speichers [m³]

Bei einer Innenaufstellung des Speichers wurden für den vom Speicher belegten Wohnraum gemäß /Sta15/ Kosten von 281 €/m³ (Errechnet aus den vom Bauherrn angegebenen "Veranschlagten Kosten der Bauwerke") angenommen. Das Gesamtvolumen des Speichers wird mit einer Dicke der Wärmedämmung von 0,2 m und einem Zugangsraum zum Mannloch des Speichers am Speicherboden mit einer Höhe von 0,75 m berechnet. Bei dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bleiben Kosten für eine eventuell anzubringende Ummauerung des Speichers unberücksichtigt. Somit stellt die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Innenaufstellung einen Grenzfall für möglichst niedrige Kosten dar.

Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums und der geringen Marktreife können Kosten für die TWD nicht angegeben werden. Es werden in den Ergebnissen allerdings die Grenzkosten dargestellt, bis zu welchen eine TWD für unterschiedliche Szenarien wirtschaftlich ist.

12.2 Simulationsmodelle

Die Simulationsmodelle des SolarAktivHauses und des Kindergartens sind in Kapitel 3.1 beschrieben.

Die Wärmeverlustraten der konventionell und vakuumwärmegeprägten Warmwasserspeicher wurden folgendermaßen angenommen: Für das 12 m³ Funktionsmuster im Realmaßstab, das im Rahmen dieses Projektes gefertigt und untersucht wurde, konnte eine Wärmeverlustrate UA_{Sp} von insgesamt 7,6 W/K ermittelt werden (siehe Kapitel 11.2.1). Dabei können dem Mantel und dem Deckel des Speichers eine Wärmeverlustrate $UA_{Mantel+Deckel}$ von 2,03 W/K zugeordnet werden. Auf den zum Großteil nicht wärmegeprägten Speicherboden entfällt eine Wärmeverlustrate von $UA_{Boden} = 5,57$ W/K.

Die von der Fa. Sirch vertriebenen vakuumwärmegeprägten Warmwasserspeicher werden hingegen im gesamten Bodenbereich konventionell wärmegeprägt. Es wird eine konventionelle Wärmedämmung sowohl im Bereich des Mannloches und der Anschlüsse, als auch im Bereich der Vakuumwärmedämmung und der Standzarge angebracht.

Es wird somit von einer Reduktion der Wärmeverlustrate des Bodens um 50 % ausgegangen, die damit $UA_{Boden} = 2,785$ W/K beträgt. Dieser Wert wird für alle Speichergrößen und sowohl für Speicher mit kWD als auch für Speicher mit VWD verwendet. Es wird angenommen, dass sich die Wärmebrücken im Bereich des Bodens mit unterschiedlicher Speichergröße und Wärmedämmung nicht signifikant ändern. Diese Annahme kann getroffen werden, da sich der Durchmesser des lastabtragenden Tragrings zwischen Innen- und Außenmantel der von Fa. Sirch vertriebenen Speicher bis zu einem Warmwasservolumen von 80 m³ nicht signifikant gegenüber dem Funktionsmuster im Realmaßstab vergrößert.

Die Wärmeverlustrate von Mantel und Deckel muss jedoch entsprechend der Speichergröße und Art der Wärmedämmung variiert werden. Dafür kann nach /EN 12977-3:2012/ eine äquivalente Wärmeverlustrate UA_{Sp} [W/K] für Warmwasserspeicher unterschiedlicher Größe mit Hilfe der Zahlenwert-Gleichung 3.1 bestimmt werden. Aus dem am Funktionsmuster im Realmaßstab ermittelten Wert von $UA_{Mantel+Deckel} = 2,03$ W/K und dem Warmwasservolumen von 12.000 l konnte für Gleichung 3.1 ein Wert von $a_{Mantel+Deckel} = 0,01853$ ermittelt werden. Dieser Wert wurde für Speicher mit VWD zur Skalierung von $UA_{Mantel+Deckel}$ gemäß Gleichung 3.1 verwendet. Für Speicher mit kWD wurde dieser Wert mit dem Faktor 5 multipliziert, womit sich $a_{Mantel+Deckel} = 0,09265$ ergibt. Hierbei wird von einer um den Faktor 5 erhöhten eff. WLF der kWD ausgegangen. Nach Addition von $UA_{Boden} = 2,785$ W/K ergibt sich die Gesamt-Wärmeverlustrate für die entsprechende Speichergröße.

Für die Modellierung der TWD wurde das im Rahmen des Projektes entwickelte TRNSYS-Modell verwendet, das in Kapitel 10 beschrieben ist. Durch die TWD wird die Speicherumgebungstemperatur von im Jahresmittel 9 °C bei Außenaufstellung auf 20,2 °C erhöht. Bei Innenaufstellung beträgt die Speicherumgebungstemperatur konstant 22 °C. Bei einer Speicherinnenaufstellung werden die Wärmeverluste des Speichers an das Gebäude

abgegeben, wodurch sich der Bedarf an Heizwärme durch eine reguläre Speicherentladung während der Heizperiode reduziert.

12.3 Ergebnisse

12.3.1 SolarAktivHaus

In Abbildung 77 ist der solare Deckungsanteil für ein SAH in Abhängigkeit vom Warmwasservolumen des Speichers für verschiedene Aufstellungsorte und Arten der Wärmedämmung aufgetragen. Die roten waagerechten Linien markieren die solaren Deckungsanteile von 70 und 80 %. Für die Außenaufstellung wurden Simulationen mit sämtlichen in Tabelle 14 aufgeführten Warmwasservolumina durchgeführt. Für die Innenaufstellung erfolgten Simulationen mit Warmwasservolumina bis 30,6 m³, da größere gebäudeintegrierte Speicher für ein Einfamilienhaus als technisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll erachtet werden.

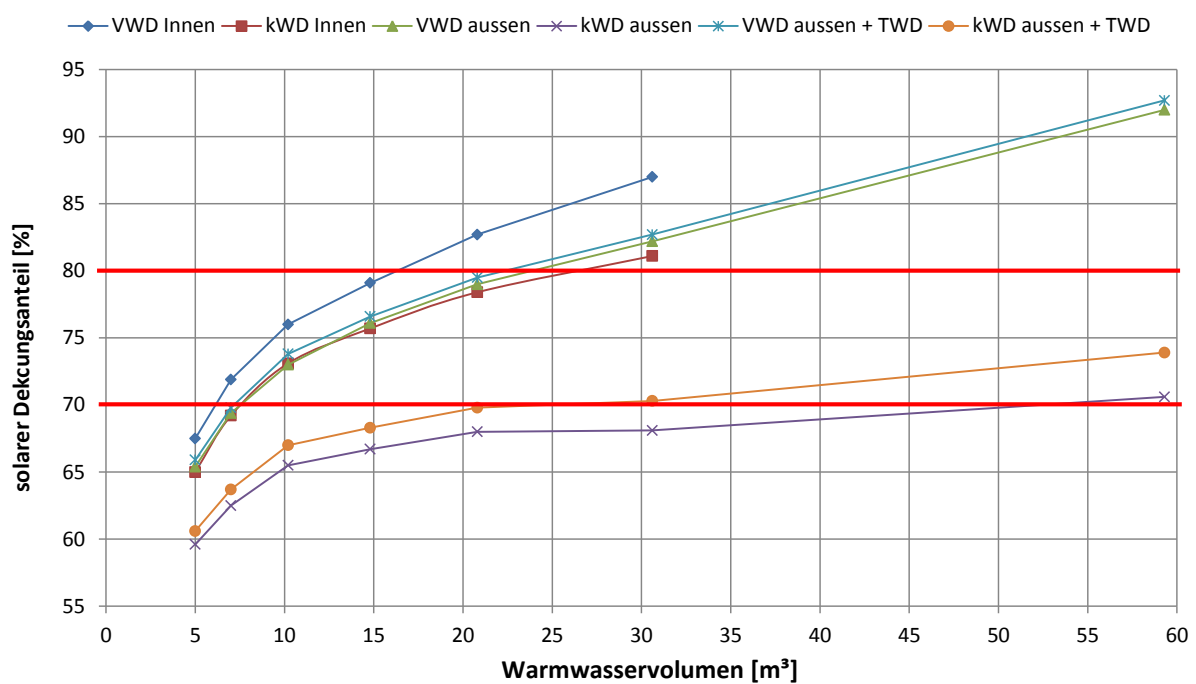


Abbildung 77. Solarer Deckungsanteil für ein SolarAktivHaus in Abhängigkeit des Speichervolumens für verschiedene Aufstellungsorte und Arten der Wärmedämmung

Es ist zu erkennen, dass eine Innenaufstellung gegenüber einer Außenaufstellung bei gleicher Dämmung und gleichem Speichervolumen zu größeren solaren Deckungsanteilen führt. Dies ist neben der höheren Speicherumgebungstemperatur im Inneren des Gebäudes zum größten Teil auch darauf zurückzuführen, dass sämtliche Wärmeverluste des Speichers an das Gebäude abgegeben werden, wodurch sich der Heizwärmebedarf durch eine reguläre Speicherentladung reduziert. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass diese Wärmeabgabe in den Sommermonaten aus dem Gebäude abgeführt werden muss, um eine

Überhitzung der Wohnräume zu vermeiden. Die dafür ggf. notwendige Kosten bleiben in dieser Wirtschaftlichkeitsbetrachtung unberücksichtigt.

Es ist außerdem zu erkennen, dass im Anwendungsfall SAH ein Speicher mit VWD bei Außenaufstellung gegenüber einem Speicher mit kWD bei Innenaufstellung bei gleichem Warmwasservolumen höhere solare Deckungsanteile ermöglicht. Dies gelingt trotz geringerer Speicherumgebungstemperaturen und trotz der Tatsache, dass die Wärmeverluste des Speichers bei Außenaufstellung nicht an das Gebäude abgegeben werden.

Die Wirkung der TWD hängt u. a. von der effektiven Wärmeleitfähigkeit der Wärmedämmung ab. Während bei einem Einsatz einer VWD durch eine zusätzlich angebrachte TWD der solare Deckungsanteil um 0,4 bis 0,8 Prozentpunkte erhöht wird, beträgt die Steigerung des solaren Deckungsanteils bei Einsatz einer kWD 1 bis 3,3 Prozentpunkte.

In Tabelle 15 sind die benötigten Warmwasservolumina, aufgerundet auf ganze m³, und die damit verbundenen Speicherkosten aufgeführt, um einen solaren Deckungsanteil von 70 und 80 % mit den verschiedenen Aufstellungsorten und Arten der Wärmedämmung für den Anwendungsfall SAH zu erreichen. Die Speicherpreise wurden gemäß den Gleichungen 12.1 und 12.2 berechnet. Die Kosten des Wohnraums pro m³ Speichervolumen sind Kapitel 12.1 zu entnehmen.

Tabelle 15. Kosten (ohne USt) für den Warmwasserspeicher im Anwendungsfall SolarAktivHaus für unterschiedliche Speicherkonfigurationen und für solare Deckungsanteile von 70 und 80 %

Wärmedämmung	Aufstellungs-Ort	solarer Deckungsanteil	Warmwasservolumen	Speicher-Preis	Kosten für Wohnraum	Gesamt-Speicherkosten
VWD	innen	70 %	7 m ³	18.465 €	4.153 €	22.618 €
kWD	innen	70 %	8 m ³	10.585 €	4.611 €	15.197 €
VWD	außen	70 %	8 m ³	19.438 €	-	19.438 €
kWD	außen	70 %	53 m ³	38.747 €	-	38.747 €
VWD + TWD	außen	70 %	8 m ³	19.438 € ¹	-	19.438 € ¹
kWD + TWD	außen	70 %	25 m ³	23.190 € ¹	-	23.190 € ¹
VWD	innen	80 %	17 m ³	27.720 €	8.473 €	36.192 €
kWD	innen	80 %	27 m ³	24.516 €	12.478 €	36.994 €
VWD	außen	80 %	24 m ³	33.578 €	-	33.578 €
kWD	außen	80 %	> 59,3 m ³	N.N.	-	N.N.
VWD + TWD	außen	80 %	23 m ³	32.772 € ¹	-	32.772 € ¹
kWD + TWD	außen	80 %	> 59,3 m ³	N.N.	-	N.N.

¹ Preis ohne TWD

Um einen solaren Deckungsanteil von 70 % zu erreichen, ist in dieser Betrachtung ein innenaufgestellter Speicher mit kWD, einem Warmwasservolumen von 8 m³ und Kosten von 15.197 € am wirtschaftlichsten. Als zweitgünstigste Lösung ergibt sich ein außenaufgestellter Speicher mit VWD, einem Warmwasservolumen von ebenfalls 8 m³ und Kosten von

19.438 €. Die Differenz zur kostengünstigsten Variante beträgt 4.241 €. Werden jedoch die zusätzlichen Kosten einer Ummauerung des Speichers und des Aufwandes für die Wärmeabfuhr der Wärmeverluste des Speichers in den Sommermonaten für den innenaufgestellten Speicher mit kWD betrachtet, wird sich voraussichtlich ein außenaufgestellter, vakuumwärmegeprägter Speicher als die wirtschaftlichste Variante ergeben. Wenn nur eine Außenaufstellung der Speicher möglich ist und ein solarer Deckungsanteil von 70 % gefordert ist, können durch eine VWD 19.309 € im Vergleich zu einem konventionell wärmegeprägten Speicher eingespart werden.

Der Einsatz einer TWD kann für den außenaufgestellten Speicher mit VWD zu keiner signifikanten Verringerung des Warmwasservolumens beitragen, weshalb diese Variante für dieses Szenario nicht wirtschaftlich darstellbar ist.

Die Außenaufstellung von Speichern mit kWD ist vergleichsweise unwirtschaftlich. Wird diese dennoch erwogen, kann durch den Einsatz einer TWD das benötigte Warmwasservolumen um 28 m³ reduziert werden. Durch die Verringerung des Warmwasservolumens könnten damit 15.557 € eingespart werden. Das bedeutet, dass sich dieser Betrag als Grenzkosten für eine TWD in diesem Szenario ergibt.

Um einen solaren Deckungsanteil von 80 % zu erreichen, ist ein außenaufgestellter Speicher mit VWD am wirtschaftlichsten. Es ergeben sich damit ein Warmwasservolumen von 24 m³ und Gesamtspeicherkosten von 33.578 €. Durch den Einsatz einer TWD kann das Warmwasservolumen auf 23 m³ verringert werden. Dadurch ergeben sich Grenzkosten für eine TWD von 806 €. Ein solarer Deckungsanteil von 80 % ist mit einem außenaufgestellten Speicher mit kWD mit einem Warmwasservolumen bis zu 59,3 m³ nicht erreichbar.

12.3.2 Kindergarten

In Abbildung 78 ist der solare Deckungsanteil für einen Kiga in Abhängigkeit vom Warmwasservolumen des Speichers für verschiedene Arten der Wärmedämmung aufgetragen. Im Anwendungsfall Kiga wurde keine Innenaufstellung des Speichers untersucht. Die roten waagerechten Linien markieren einen solaren Deckungsanteil von 40 und 43 %.

In diesem Anwendungsfall kann durch die VWD ein um 1,8 bis 6,3 Prozentpunkte höherer solarer Deckungsanteil gegenüber einem Speicher mit kWD erreicht werden. Eine zusätzlich angebrachte TWD kann den solaren Deckungsanteil für Speicher mit VWD um 0,1 bis 0,4 Prozentpunkte und für Speicher mit kWD um 0,4 bis 1,3 Prozentpunkte steigern.

In Tabelle 16 sind die benötigten Warmwasservolumina, aufgerundet auf ganze m³, und die damit verbundenen Speicherkosten aufgeführt, um einen solaren Deckungsanteil von 40 und 43 % mit den verschiedenen Arten der Wärmedämmung für den Anwendungsfall Kiga zu erreichen. Die Speicherpreise wurden gemäß den Gleichungen 12.1 und 12.2 berechnet.

Um einen solaren Deckungsanteil von 40 % zu erreichen, ist ein konventionell wärmegeprägter Speicher mit einem Warmwasservolumen von 28 m³ und

Gesamtspeicherkosten von 25.167 € knapp die wirtschaftlichste Lösung. Durch den zusätzlichen Einsatz einer TWD, kann das notwendige Warmwasservolumen um 7 m³ verringert werden. Aus der Differenz der Gesamtspeicherkosten ohne TWD, ergeben sich damit Grenzkosten für die TWD von 4.728 €.

Um einen solaren Deckungsanteil von 43 % zu erreichen, ist ein vakuumwärmegedämmter Speicher mit einem Warmwasservolumen von 22 m³ und Gesamtspeicherkosten von 31.956 € die wirtschaftlichste Lösung und um 8.074 € günstiger als ein Speicher mit kWD.

Durch den zusätzlichen Einsatz einer TWD, kann das notwendige Warmwasservolumen um 1 m³ verringert werden. Aus der Differenz der Gesamtspeicherkosten ohne TWD, ergeben sich in diesem Fall Grenzkosten für die TWD von 826 €.

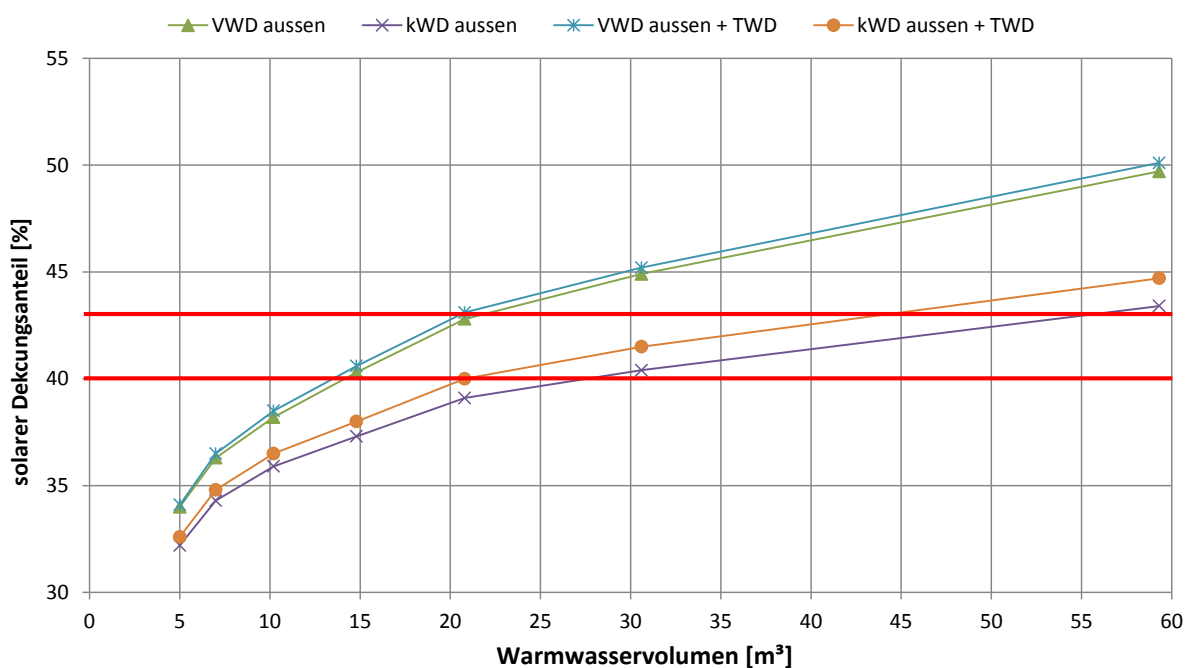


Abbildung 78. Solarer Deckungsanteil für einen Kindergarten in Abhängigkeit vom Warmwasservolumen des Speichers für verschiedene Arten der Wärmedämmung

Tabelle 16. Kosten (ohne USt) für den Warmwasserspeicher im Anwendungsfall Kindergarten bei unterschiedlichen Speicherkonfigurationen und für solare Deckungsanteile von 40 und 43 %

Wärmedämmung	Aufstellungs-Ort	solarer Deckungsanteil	Warmwasservolumen	Speicher-Preis	Kosten für Wohnraum	Gesamtspeicherkosten
VWD	außen	40 %	15 m ³	25.952 €	-	25.952 €
kWD	außen	40 %	28 m ³	25.167 €	-	25.167 €
VWD + TWD	außen	40 %	14 m ³	25.053 € ¹	-	25.053 € ¹
kWD + TWD	außen	40 %	21 m ³	20.439 € ¹	-	20.439 € ¹
VWD	außen	43 %	22 m ³	31.956 €	-	31.956 €
kWD	außen	43 %	56 m ³	40.030 €	-	40.030 €
VWD + TWD	außen	43 %	21 m ³	31.130 € ¹	-	31.130 € ¹
kWD + TWD	außen	43 %	44 m ³	34.453 € ¹	-	34.453 € ¹

¹ Preis ohne TWD

12.4 Zusammenfassung

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigt, dass die Wirtschaftlichkeit einer VWD und einer TWD stark vom Anwendungsfall und den angestrebten solaren Deckungsanteilen abhängt. Je höher der angestrebte solare Deckungsanteil, desto wirtschaftlicher werden diese innovativen Wärmedämm-Technologien gegenüber den konventionellen Wärmedämm-Technologien.

Für die betrachteten Szenarien im Anwendungsfall Kiga konnte eine VWD Einsparungen bei den Speicherkosten von bis zu 8.074 € gegenüber einer kWD erreichen. Im Anwendungsfall SAH sind für die betrachteten Szenarien maximale Einsparungen von bis zu 19.309 € möglich für den Fall eines solaren Deckungsanteils von 70 % und einer Außenaufstellung des Speichers.

Für die TWD ergaben sich bei den wirtschaftlichsten Lösungen Grenzkosten von bis zu 4.728 € für den Anwendungsfall des Kiga und bei einem solaren Deckungsanteil von 40 % sowie einem Speichervolumen von 21 m³.

13 Öffentlichkeitsarbeit

Über das Forschungsvorhaben wurde bei zahlreichen nationalen und internationalen Tagungen und Kongressen berichtet. Zudem erfolgte ein Technologietransfer durch die Teilnahme am Arbeitskreis Langzeitwärmespeicher des BMWi und die Durchführung eines Abschlussworkshops, bei dem speziell Planer und Installateure aus dem Solar-, Heizungs- und Fernwärmebereich informiert wurden.

Im Folgenden sind die einzelnen Beiträge kategorisiert und aufgelistet.

Besuchte Tagungen/Konferenzen:

- 24. OTTI-Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Deutschland, 07.-09.05.2014
- 11th International Conference on Solar Heating and Cooling - Gleisdorf Solar 2014, Gleisdorf, Österreich, 25.-27.06.2014
- 2. Statusseminar der Förderinitiative Energiespeicher 2015, Berlin, Deutschland, 22.-23.04.2015
- 9th International Renewable Energy Storage Conference - IRES 2015, Düsseldorf, Deutschland, 09.-11.03.2015
- 3rd International Solar District Heating Conference - SDH 2015, Toulouse, Frankreich, 17.-18.06.2015.
- 4. OTTI-Anwenderforum Thermische Energiespeicher, Neumarkt in der Oberpfalz, Deutschland, 02.-03.07.2015
- 4th International Conference on Solar Heating and Cooling for Building - SHC 2015, Istanbul, Türkei, 02.-04.12.2015.

Konferenzbeiträge:

- LANG S., BAUER D., DRÜCK H., BESTENLEHNER D. (2013): *Vergleich der Innen- und Außenaufstellung von konventionell- und vakuumgedämmten Warmwasserspeichern für SolarAktivHäuser*. 23. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Deutschland.
- GERSCHITZKA M., BONK S., BAUER D., DRÜCK H. (2014): *Transparente Wärmedämmung für Langzeit-Wärmespeicher zur Außenaufstellung – Experimentelle Untersuchungen*. 11th International Conference on Solar Heating and Cooling, Gleisdorf Solar 2014, Österreich.
- GERSCHITZKA M., LANG S., BAUER D., DRÜCK H. (2015): *Development of a high-efficient long-term thermal energy store for outdoor installation*. 9th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2015, Düsseldorf, Deutschland.
- GERSCHITZKA M., LANG S., BAUER D., DRÜCK H. (2015): *Potential of high-efficient thermal energy stores for solar district heating applications*. 3rd International Solar District Heating Conference, SDH 2015, Toulouse, Frankreich.

- LANG S., GERSCHITZKA M., BAUER D., DRÜCK H. (2015): *Thermal conductivity of vacuum insulation materials for thermal energy stores in solar thermal systems*. 4th International Conference on Solar Heating and Cooling for Building, SHC 2015, Istanbul, Türkei.

Online-Artikel:

- “Speicher können draußen bleiben”, Bine-News vom 27.06.2016, http://forschung-energiespeicher.info/aktuelles/aktuelles-einzelansicht/45/Speicher_koennen_draussen_bleiben/

Abschluss-Workshop:

- Universität Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, 15.06.2016 mit insgesamt 35 Teilnehmern bzw. Teilnehmerinnen

Teilnahme am Arbeitskreis Langzeit-Wärmespeicher:

- Frankfurt a.M., 14.10.2014
- Frankfurt a.M., 03.02.2014
- Frankfurt a.M., 29.04.2015

14 AUSBLICK

Im hier vorgestellten Forschungsvorhaben konnte ein hocheffizienter Warmwasserspeicher mit einem Volumen von etwa 12 m^3 zur Aufstellung außerhalb von Gebäuden als Basis für eine Speicherbaureihe mit Volumina von 5 bis 100 m^3 entwickelt werden. Die thermische Leistungsfähigkeit dieser Speicher wird durch die Kombination der innovativen Technologien Vakuumwärmedämmung und transparente Wärmedämmung und durch den Einsatz neuartiger thermischer Schichtbe- und Entladeeinrichtungen signifikant gegenüber heute üblichen Produkten gesteigert.

Dennoch haben sich durch die erlangten Erkenntnisse und Erfahrungen aus der Projektbearbeitung und dem Betrieb des Funktionsmodells im Realmaßstab neue, noch zu klärende Fragestellungen und Herausforderungen ergeben. Hierzu zählen im Wesentlichen

- die lange Evakuierungsdauer der Vakuumwärmedämmung bei großen Füllmaterialvolumina und mögliche Setzvorgänge des Füllmaterialmischung während der Speicherlebensdauer,
- die Verifizierung der entwickelten Skalierungsmethodik der kombinierten Schichtbe- und Entladeeinrichtung für einen weiten Bereich an Betriebsbedingungen,
- die gezielte Nutzung der Wärmetransportvorgänge innerhalb der transparenten Wärmedämmung zu Homogenisierung des Oberflächentemperaturprofils bzw. die Anwendung temperaturbeständiger, absorbersenkrechtlicher Strukturen transparenter Wärmedämmungen, die eine weitere Reduktion der Wärmeverluste erwarten lassen,
- die Weiterentwicklung des modellgestützten Parameteridentifikationsverfahrens, um nicht ausschließlich mit langandauernden Auskühlversuchen, sondern ebenfalls mit in-situ Messdaten Speicherkennwerte, wie z. B. eine über der Speicherhöhe örtlich aufgelöste Wärmeverlustrate, bestimmen zu können,
- die systematische Identifikation weiterer Anwendungsgebiete und deren wirtschaftliche und technologische Anforderungen an eine Speicherbaureihe mit hocheffizienter Wärmedämmung,
- und die Entwicklung einer optisch ansprechenden und einfachen Integration solcher Speicher in eine bebaute Umgebung.

Diese Fragestellungen und Herausforderungen sollen u. a. im Rahmen eines Folgevorhabens untersucht und Lösungen dafür erarbeitet werden. Weiterhin soll in einem Anschlussvorhaben die Demonstration und weitere Optimierung dieser innovativen Speichertechnologie unter realen Betriebsbedingungen erfolgen. In diesem Zusammenhang ist die Installation und das Monitoring von zwei Pilotspeichern unter realen Einsatzbedingungen, z. B. bei einem Einfamilienhaus, einem großen Mehrfamilienhaus oder einer BHKW-Anwendung, geplant.

15 LITERATURVERZEICHNIS

- /Ath99/ **Athieitis A.K., Ramadan H.** (1999): *Numerical Model of a building with transparent insulation*. Solar Energy, Vol.67, pp. 101-109, 1999.
- /Bac13/ **Bachmann S., Drück H.** (2013): *Ermittlung der Wärmeverluste von Warmwasserspeichern – Vergleich genormter Prüfverfahren*. Konferenz-Beitrag. 23. OTTI-Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein.
- /Bau10/ **Bauer D., Marx R., Nußbicker-Lux J., Ochs F., Heidemann W., Müller-Steinhagen H.** (2010): *German central solar heating plants with seasonal heat storage*. Solar Energy 84 (2010) 612-623.
- /Bei13/ **Beikircher T., Buttinger F., Demharter M., Herzog F., Reuß M.** (2013): *Superisolierter Heißwasser-Langzeitwärmespeicher (Fkz: 0325964A)*. ZAE Bayern. Abschlussbericht. <http://opac.tib.uni-hannover.de/DB=1/SET=3/TTL=3/SHW?FRST=1>. [Online-Zugriff am 25.02.2016].
- /Beß15/ **Beßling B.** (2015): *Untersuchung von Strömungsphänomenen in Be- und Entladesystemen für Warmwasserspeicher*. Bachelorarbeit (nicht veröffentlicht). Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart.
- /BIN01/ **BINE Informationsdienst** (2001): *Vakuumdämmung*. Projektinfo 4/01, Karlsruhe, ISSN 0937 - 8367.
- /Böt14/ **Böttcher F.** (2014): *Untersuchung und Optimierung einer transparenten Wärmedämmung für außenaufgestellte thermische Energiespeicher*. Bachelorarbeit (nicht veröffentlicht). Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart.
- /Bou12/ **Bouquerel M., et al.** (2012): *Heat transfer modeling in vacuum insulation panels containing nanoporous silicas—A review*. Energy and Buildings 54 (2012) 320–336.
- /Bre15/ **Brenner A.** (2015): *Untersuchung von Be- und Entladesystemen für Warmwasserspeicher*. Bachelorarbeit (nicht veröffentlicht). Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart.
- /Bun16/ **Bunksolar S.L.** (2016): <http://bunksolar.com/Kontakt.html>. Firmenweb-site: Produktinformation zu „Langzeitwärmespeicher und Outdoor Wärmespeicher“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Cap89/ **Caps R., Fricke J.** (1989): *Fibrous Insulations with Transparent Cover for Passive Use of Solar Energy*. International Journal of Thermophysics, Vol. 10, No. 2 (1989).

- /Cit16/ **CitrinSolar GmbH** (2016): <http://www.citrinsolar.de/produkte/sonnenhaustechnik.html>. Firmenwebsite: Produktinformation zur „Sonnenhaustechnik“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Cha01/ **Chaurasia P.B., Twidell J.** (2001): *Collector cum storage solar water heater with and without transparent insulation material*. Solar Energy, Vol. 70, No. 5, pp. 403-416, 2001.
- /Cru10/ **Cruickshank C.A., Harrison S.J.** (2010): *Heat loss characteristics for a typical solar domestic hot water storage*. Energy and Buildings 42 (2010) 1703-1710, 2010.
- /Cub16/ **cubeTEC Kai Hölter** (2016): <http://www.cubetec.info/langzeit-waerme-speicher/module>. Firmenwebsite: Produktinformation zu „Langzeit-Wärmespeicher“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Dem11/ **Demharter M.** (2011): *Heat Transport in Evacuated Perlite Powder Insulations and Its' Application in Longterm Hot Water Storages*. Masterthesis, Garching.
- /Dnr15/ **N. N.** (2015): *Die deutsche Normungsroadmap Energiespeicher*. Arbeitsversion Stand: 09/2015 (nicht veröffentlicht). DIN, DKE, DVGW und VDI.
- /Dru06/ **Drück, H.** (2006): *MULTIPORT Store-Model for TRNSYS - Stratified fluid storage tank with four internal heat exchangers, ten connections for direct charge and discharge and an internal electrical heater - Type 340*. TRNSYS Description, Stuttgart.
- /Dru07/ **Drück H.** (2007): *Mathematische Modellierung und experimentelle Prüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen*. Doktorarbeit. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart. Shaker Verlag, Aachen.
- /Dru09/ **Drück H., Stryi-Hipp G., Müller-Steinhagen H.** (2009): *Deutsche Solarthermie-Technologie Plattform (DSTTP), Ergebnisse und zukünftige Aktivitäten*. Konferenz-Beitrag. 19. OTTI-Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein.
- /Dst10/ **Stryi-Hipp G., Drück H., Wittwer V., Zörner W., et al.** (2010): *Forschungsstrategie Niedertemperatur-Solarthermie 2030 für eine nachhaltige Wärme- und Kälteversorgung Deutschlands*. Deutsche Solarthermie-Technologieplattform (DSTTP), Berlin (Hrsg.). 2010. http://www.solarthermietechologie.de/fileadmin/img/Service/PDF/Studien/DSTTP_strategie_einelseiten.pdf. Website: Deutsche Solarthermie-Technologieplattform DSTTP. [Online-Zugriff am 22.03.2016].

- /Duf06/ **Duffie J.A., Beckman W.A.** (2006): *Solar Engineering of Thermal Processes (Third Edition)*. John Wiley & Sons, Inc. New Jersey. ISBN-10: 0-471-69867-9. Kapitel 3.11/6.4/2.15.
- /Eic12/ **Eicker U.** (2012): *Solare Technologien für Gebäude – Grundlagen und Praxisbeispiele*. Kapitel: Thermische Analyse gebäudeintegrierter Solar-komponenten. Vieweg-Teubner Verlag, 2. Aufl., ISBN: 978-3-8348-1281-0.
- /Ene16/ **Ed Energie.depot GmbH** (2016): <http://www.energie-depot.com/kontakt/index.html>. Firmenwebsite: Produktinformation zu „Wärme-Hamster“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Ens16/ **EnerSolve GmbH** (2016): <http://www.enersolve.de/index.php/page/4.html>. Firmenwebsite: Produktinformation zu „MODULO Wärmespeicher“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Est15/ **European Solar Thermal Industry Federation:** (2015) http://www.estif.org/fileadmin/estif/content/market_data/downloads/2014_solar_thermal_markets_LR.pdf. Website: Information zu solaren Wärmemarkt in Europa – Trends und Marktstatistiken 2014. [Online-Zugriff am 22.03.2016].
- /EU13/ **Europäische Union** (2013): *DELEGIERTE VERORDNUNG (EU) Nr. 811/2013 DER KOMMISSION vom 18. Februar 2013 zur Ergänzung der Richtlinie 2010/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates im Hinblick auf die Energiekennzeichnung von Raumheizgeräten, Kombiheizgeräten, Verbundanlagen aus Raumheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen sowie von Verbundanlagen aus Kombiheizgeräten, Temperaturreglern und Solareinrichtungen*. EU-Verordnung, 2013.
- /Eye16/ **EyeCular Technologies** (2016): <http://www.eyecular.com/>. Firmenweb-site: Produktinformation zu „StratiFlex™“. [Online-Zugriff am 25.02.2016].
- /Fis11/ **Fischer S.** (2011): *Dynamische Prüfung von Sonnenkollektoren unter besonderer Berücksichtigung der Einfallwinkelkorrektur und der Reduzierung der Prüfdauer*. Doktorarbeit. Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik der Universität Stuttgart. Shaker Verlag, Aachen.
- /Fri08/ **Fricke J., Heinemann U., Ebert H.P.** (2008): *Vacuum insulation panels—From research to market*. Vacuum 82 (2008) 680–690.
- /Ger14/ **Gerschitzka M., Bonk S., Bauer D., Drück H.** (2014): *Transparente Wärmedämmung für Langzeit-Wärmespeicher zur Außenaufstellung – Experimentelle Untersuchungen*. Konferenz-Beitrag. 11th International

- Conference on Solar Heating and Cooling, Gleisdorf Solar 2014, Österreich.
- /Ger15/ **Gerschitzka M., Lang S., Bauer D., Drück H.** (2015): *Development of a high-efficient long-term thermal energy store for outdoor installation.* Konferenz-Beitrag. 9th International Renewable Energy Storage Conference, IRES 2015, Düsseldorf, Deutschland.
- /Göp09/ **Göppert S., Lohse R., Urbanek T., Schirmer U., Bühl J., Nilius A., Platzer B.** (2009): *Forschungsbericht – Solarthermie 2000plus – Weiterentwicklung und Optimierung von Be- und Entladesystemen für Tank- und Erdbeckenspeicher.* Technische Universität Chemnitz, Fakultät für Maschinenbau, Professur Technische Thermodynamik; Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Thermo- und Magnetofluidynamik. ISBN: 978-3-9811424-0-2.
- /Haa16/ **Haase GFK-Technik GmbH** (2016): <http://www.ichbin2.de/waermespeicher/waermespeicher-oberirdisch.html>. Firmenwebsite: Produktinformation zu „Hase-Wärmespeicher“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Hal09/ **Haller Y.M., Cruickshank C.A., Streicher W., Harrison S.J., Andersen E., Furbo S.** (2009): *Methods to determine stratification efficiency of thermal energy storage processes – Review and theoretical comparison.* Solar Energy 83 (2009). 1847-1860.
- /Hal15/ **Haller Y.M., Haberl R., Persdorf P., Reber A.,** (2015): *StorEx Theoretische und experimentelle Untersuchung zur Schichtungseffizienz von Wärmespeichern.* Institut für Solartechnik SPF. Schlussbericht zum Projekt SI/500935-01.
- /Han75/ **Hahne E., Grigull U.** (1975): *Formfaktor und Formfaktorwiderstand der stationären mehrdimensionalen Wärmeleitung.* Int. J. Heat Mass Transfer, Vol. 18, pp 751-767.
- /Har16/ **Hartmann Energietechnik GmbH** (2016): <http://www.hartmann-energietechnik.de/hartmann-energietechnik/speicher>. Firmenwebsite: Produktinformation zu „Kellerverschweißung und Satellitenspeicher“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Hum16/ **Hummelsberger Schlosserei GmbH** (2016): <http://vakuumpufferspeicher.de/installationsbeispiele.html>. Firmenwebsite: Produktinformation zu „Vakuum-Pufferspeicher“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].

- /Iva14/ **Ivancic A., Mugnier D., Stryi-Hipp G., et al.** (2014): *Solar Heating and Cooling Technology Roadmap*. European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling (RHCPlatform). http://www.rhc-platform.org/fileadmin/user_upload/Structure/Solar_Thermal/Download/Solar_Thermal_Roadmap.pdf. [Online-Zugriff am 06.09.2014].
- /Jen16/ **Jenni Energietechnik GmbH** (2016): <http://www.jenni.ch/swiss-solartank.html>. Firmenwebsite: Produktinformation zu „Swiss Solartank“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Kal13/ **Kaltschmitt M., Stegelmeier M., Streicher W.** (2013): *Erneuerbare Energien – Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. DOI 10.1007/978-3-642-03249-3_3. Kapitel 3.
- /Kau03/ **Kaushika N.D., Sumathy K.** (2003): *Solar transparent insulation materials: a review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7 (2003). 317-351.
- /Lor16/ **Lorenz GmbH** (2016): <http://www.lorenz-behaelterbau.de/sonnenhaus-speicher.html>. Firmenwebsite: Produktinformation zu „Sonnen hausspeicher“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Mal16/ **Mall GmbH** (2016): http://www.mall.info/index.php?eID=download&uid=4178&file=fileadmin%2Ffileadmin%2FGewerblich%2FNeue_Energien%2FProduktinformation%2FProduktinformation_ThermoSol.pdf. Firmenwebsite: Produktinformation zu „ThermoSol“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /May13/ **Mayer W. (Hrsg.), Fuchs B., Izadin A.Q., Bönig J., Hofbeck K.** (2013): *FORETA – Ergebnisse des Forschungsverbundes „Energieeffiziente Technologien und Anwendungen“*. Section: Thermische Wasser-Langzeitspeicher in kleiner Baugröße (pp. I-1 – I-36). ISBN: 978-3-942742-34-4. http://www.wz-straubing.de/RET/download/FORETA_Tagungsband_WZ-SR.pdf. [Online-Zugriff am 25.02.2016].
- /Nit16/ **Nitsch-Regelungstechnik** (2016): <http://www.nitsch-regelungstechnik.de/>. Firmenwebsite: Produktinformation zu System „Exergie-Manager“. [Online-Zugriff am 25.02.2016].
- /Per16/ **Perlite Institute, Inc.** (2016): *Perlite Product Guide 8A; Perlite for nonevacuated cryogenic and low temperature service*. <http://lartpc-docdb.fnal.gov/0001/000190/001/Perlite%20info%20.pdf>. [Online-Zugriff am 08.06.2016].

- /Pin16/ **Pink GmbH** (2016): <http://www.opira.at/>. Firmenwebsite: Produktinformation zu System „OPIRA“. [Online-Zugriff am 25.02.2016].
- /Ret95/ **Rettelbach T., et al.** (1995): *Thermal conductivity of silica aerogel powders at temperatures from 10 to 275 K*. Journal of Non-Crystalline Solids 186 (1995) 278-284.
- /Sch09/ **Schwab H.** (2009): *Vakuuminisationspaneele- Gas- und Feuchteeintrag sowie Feuchte- und Wärmetransport*. Doktorarbeit, Würzburg.
- /Sir16/ **Sirch Tankbau-Tankservice-Speicherbau GmbH** (2016): <http://www.sirch.com/speicherbau/pufferspeicher-sonder/>. Firmenwebsite: Produkt-information zu „Pufferspeicher Sonder“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Son13/ **Song T., Kim J.** (2013): *Vacuum insulation properties of glass wool and opacified fumed silica under variable pressing load and vacuum level*. International Journal of Heat and Mass Transfer 64 (2013) 783–791.
- /Spr11/ **Sprengard C., Spitzner M.** (2011): *Optimierung der energetischen Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von VIP-Paneelen durch die optimale Kombination von Kieselsäure-, Mineralfaser- und EPS-Dämmstoff*. Projektbericht, Stuttgart.
- /Sta14/ **Stark S., Gohl N., Loose A., Drück H.** (2014): *Prototype Development and Construction of a Façade-integrated Solar Thermal System for Domestic Hot Water Preparation*. Konferenzbeitrag. EuroSun 2014, ISES International Solar Energy Society, Aix-les-Bains, Frankreich.
- /Sta15/ **Statistisches Bundesamt** (2015): *Bauen und Wohnen; Baugenehmigungen / Baufertigstellungen Baukosten; 2014*. Wiesbaden, 2015.
- /Sta16/ **Stadur-Süd Dämmstoff-Produktions GmbH** (2016): <http://www.aerogel24.de/Spaceloft-10mm>. [Online-Zugriff am 08.06.2016].
- /Ste09/ **Stegmaier T., Linke M., Planck H.** (2009): *Bionics in textiles: flexible and translucent thermal insulations for solar thermal applications*. Phil. Trans. R. Soc. A (2009) 367. 1749-1758.
- /Sts16/ **StSOL GmbH** (2016): <http://www.stsol.de/speichertechnik/sonderspeicher/sonderspeicher.html>. Firmenwebsite: Produkt-information zu „Sonderspeicher“. [Online-Zugriff am 08.04.2016].
- /Tah81/ **Taha I.S. Eldighidy S.M.** (1981): *Analysis of outdoor solar storage tanks having translucent insulation*. Solar Energy, Vol. 27, pp. 45-50, 1981.

- /Trn16/ **TRNSYS 17.** (2016): <http://sel.me.wisc.edu/trnsys/>. Website: Produktinformation zu Programm TRNSYS 17. [Online-Zugriff am 10.08.2016].
- /Uba13/ **Umweltbundesamt.** (2013): <http://www.umweltbundesamt.de/daten/energiebereitstellung-verbrauch/anteile-der-erneuerbarenenergietraeger>. Website: Information zur Zunahme der Energieerzeugung aus erneuerbare Energien. [Online-Zugriff am 23.03.2016].
- /VDI13/ **VDI Wärmeatlas** (2013): *Abschnitt D6.7 - Wärmeleitfähigkeit von Erdreich, Holz, Holzwerkstoffen, allgemeinen Baustoffen und Mauerwerk*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 11. Aufl., ISBN: 978-3-642-19981-3 (Online), Seite 701.
- /Wac16/ **Wacker Chemie AG** (2016): DA STECKT MEHR DRIN, ALS MAN DENKT: HDK® – PYROGENE KIESELSÄURE, Übersichtsblatt. http://www.wacker.com/cms/media/publications/downloads/6174_DE.pdf. [Online-Zugriff am 08.06.2016].
- /Wal06/ **Wallner G.M., Hausner R., Hegedys H., Schobermayr H., Lang R.W.** (2006): *Application demonstration and performance of a cellulose triacetate film based transparent insulation wall heating system*. Solar Energy 80 (2006). 1410-1416.
- /Wil15/ **Wilhelm L.** (2015): *Bestimmung der segmentweise aufgelösten Wärmeverluste von Warmwasserspeichern*. Bachelorarbeit (nicht veröffentlicht), Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, 2015.
- /Wil13/ **Wilfer T., Bucher S., Böttcher F., Lambarth M., Heinen P.** (2013): *Experimentelle Untersuchung unterschiedlicher transparenter Wärmedämmkonzepte in einem side-by-side-Test*. Projektarbeit (nicht veröffentlicht), Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart, 2013.
- /Won06/ **Wong I.L., Eames P.C., Perera R.S.** (2007): *A review of transparent insulation systems and the evaluation of payback period for building applications*. Solar Energy 81 (2007). 1058-1071.
- /Zha15/ **Zhao W.** (2015): *Simulative Untersuchung und Optimierung einer Speicherkonstruktion hinsichtlich Wärmebrücken*. Diplomarbeit (nicht veröffentlicht). Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik. Universität Stuttgart
- /AS 1056.1-1991/ **AS 1056.1-1991** (1991): *Storage water heaters, Part 1: General requirements*. Standards Australia.

- /DIN V 4753-8/ **DIN V 4754-8 : 1996-12** (1996): *Wassererwärmer und Wassererwärmungsanlagen für Trink- und Betriebswasser, Teil 8: Wärmedämmung von Wassererwärmern bis 1000 l Nenninhalt, Anforderungen und Prüfungen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- /EN 12977-3:2012/ **EN 12977-3:2012** (2012): *Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kundenspezifisch gefertigte Anlagen – Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- /EN 12977-4:2012/ **EN 12977-4:2012** (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.
- /EN 60379:2004/ **EN 60379:2004** (2004): *Verfahren zum Messen der Gebrauchseigenschaften von elektrischen Warmwasserspeichern für den Hausgebrauch (IEC 60379:1987, modifiziert)*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- /EN 12897:2006/ **EN 12897:2006** (2006): *Wasserversorgung – Bestimmung für mittelbar beheizte, unbelüftete (geschlossene) Speicher-Wassererwärmer*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- /EN 15332:2007/ **EN 15332:2007** (2008): *Heizkessel – Energetische Bewertung von Warmwasserspeichersystemen*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- /prEN 12897:2014/ **prEN 12897:2014** (2014): *Wasserversorgung – Bestimmung für mittelbar beheizte, unbelüftete (geschlossene) Speicher-Wassererwärmer*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- /prEN 50440:2005/ **prEN 50440:2005** (2005): *Wirkungsgrad von elektrischen Warmwasserspeichern für den Hausgebrauch*. DIN Deutsches Institut für Normung e.V.
- /ISO 9459-5:2007/ **ISO 9459-5:2007(E)** (2007): *Solar heating – Domestic water heating systems – Part 5: System performance characterization by means of whole-system tests and computer simulation*. International Organization for Standardization.
- /ISO 9459-2:1995/ **ISO 9459-2:1995(E)** (1995): *Solar heating – Domestic water heating systems – Part 2: Outdoor test methods for system performance characterization and yearly performance prediction of solar-only systems*. International Organization for Standardization.

NOMENKLATUR

Abkürzung	Bedeutung
2D	2-dimensional
AM	Air mass
SBE	Schichtbe- und Entladeeinrichtung
BL	Beladelanze
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
CAD	Computer-aided design
CFD	Computational fluid dynamics
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CPC	Compound Parabolic Concentrator
DSTTP	Deutsche Solarthermie-Technologieplattform
EMSR	Elektro- Mess- Steuer- und Regelungstechnik
EP	expandierter Perlit
ESTTP	Europäische Solarthermie-Technologieplattform
fEP	feinkörniger expandierter Perlit
FK	Flachkollektor
FKZ	Förderkennzeichen
gEP	grobkörniger expandierter Perlit
IR	Infrarot
ITW	Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik
Kiga	Kindergarten
kWD	konventionelle Wärmedämmung
LL	Lamellenlader
MEZ	Mitteuropäische Zeit
MID	Magnetisch-induktiver Durchflussmesser
MZ	Messheizungszyylinder
PB	Plattenbelader
PIV	Particle Image Velocimetry
pKS	pyrogene Kieselsäure
PU	Polyurethan
SAH	SolarAktivHaus

SiC	Siliciumcarbid
SZ	Schutzheizungszyylinder
TWD	transparente Wärmedämmung
TZS	Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen
Ust	Umsatzsteuer
UV	Ultraviolett
VRK	Vakuumröhrenkollektor
VWD	Vakuumwärmedämmung
WLF	Wärmeleitfähigkeit
WWS	Warmwasserspeicher
XPS	extrudierter Polystyrolschaum
ZA	Zylinder-Apparatur
ZAE	Zentrum für angewandte Energieforschung
ZPA	Zweiplatten-Apparatur

Lateinische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
A	m^2	Fläche des Speicherdeckels
a	-	Faktor zur Skalierung der Wärmeverlustrate von Warmwasserspeichern
a_{LL}	m	Abstand zwischen zwei Lamellen eines Lamellenpaketes
$a_{\text{Mantel+Deckel}}$	-	Faktor zur Skalierung der Wärmeverlustrate von Warmwasserspeichern
b_{BL}	m	Breite einer Austrittsöffnung der Beladelanze
C_{eff}	J/K	effektive Wärmekapazität
d_{RS}	μm	Porengröße bzw. Spaltweite
d_{PB}	m	Radialdiffusordurchmesser des Plattenbeladers
$d_{Sp,i}$	m	Speicherinnendurchmesser
$d_{Sp,a}$	m	Speicheraußendurchmesser
\dot{G}	W/m^2	Strahlungsleistung
$\dot{G}_{\text{dfu,hrz}}$	W/m^2	Diffusstrahlung in der Horizontalen
\dot{G}_{glob}	W/m^2	Globalstrahlung
$\dot{G}_{\text{hem,TWD}}$	W/m^2	hemisphärische Strahlungsleistung in der TWD-Ebene

$\dot{G}_{\text{refl,TWD}}$	W/m ²	reflektierte Strahlungsleistung in der TWD-Ebene
h	m	Höhe
$h_{\text{a,Sp}}$	m	Gesamtaußenhöhe des Speichers
h_{BL}	m	Austrittshöhe der Beladelanze
h_{ges}	m	Gesamthöhe der Wassersäule des Speichers (Kapitel 11.2.2)
h_i	m	Höhe des WWS-Segmentes i
$h_{\text{i,Sp}}$	m	Höhe des inneren Speicherbehälters
h_{FR}	m	Höhe des Fußrings
h_{LL}	m	Gesamthöhe Lamellenlader
h_{PB}	m	Austrittshöhe des Plattenbeladers
l_{mz}	m	Länge des Messheizungszyinders
i	-	Laufindex der Segmentnummerierung
k_{eff}	W/(K·m ²)	effektive Wärmedurchgangskoeffizient
m_{Sp}	kg	Gewicht des Speichers
n	mm/min	Niederschlag
p	mbar	Druck
$p_{1/2}$	mbar	Halbwertsdruck
$\text{Preis}_{\text{sto,kWD}}$	€	Preis für einen konventionell wärme gedämmten Speicher
$\text{Preis}_{\text{sto,VWD}}$	€	Preis für einen vakuumwärme gedämmten Speicher
\dot{Q}	W	Wärmestrom
$\dot{Q}_{\text{ext},i}$	W	externer Wärmestrom des Segments i
$\dot{Q}_{\text{int},i \rightarrow i-1}$	W	interner Wärmestrom zwischen dem Segments i und $i-1$
$\dot{Q}_{\text{int},i+1 \rightarrow i}$	W	interner Wärmestrom zwischen dem Segments $i+1$ und i
\dot{Q}_{Ref}	W	Wärmestrom durch das Referenzmaterial
\dot{Q}_{S}	W	Wärmestrom durch Probenbehälter inklusive Probe
$\dot{Q}_{\text{Sp+VD,TWD}}$	W	Wärmestrom zwischen dem Bilanzraum Speicher und Vakuumwärmedämmung und dem Bilanzraum TWD
$\dot{Q}_{\text{TWD,amb}}$	W	Wärmestrom zwischen dem Bilanzraum TWD und der Umgebung
\dot{Q}_{Verl}	W	Verlustwärmestrom
S	m	Formkoeffizient
s_{MZ}	m	Außendurchmesser des Messheizungszyinders
s_{VK}	m	Innendurchmesser der Vakuumkammer

s_{VWD}	m	Dämmstärke der Vakuumdämmung des Speichers
S_{ZA}	m	Formkoeffizient der Zylinderapparatur
t	s	Zeit
t^n	s	Zeit zum Zeitpunkt n
t^{n-1}	s	Zeit zum Zeitpunkt n-1
t_N	s	Zeit am letzten Zeitpunkt N
$T_{Sp,max}$	°C	maximale Speichertemperatur
U	J	innere Energie
UA	W/K	Wärmeverlustrate
UA_{ext}	W/K	externe Wärmeverlustrate des Speichermodells (Kapitel 11.2.2)
$UA_{ext,i}$	W/K	externe Wärmeverlustrate des Speichersegments i (Kapitel 11.2.2)
UA_{int}	W/K	interne Wärmeverlustrate des Speichermodells (Kapitel 11.2.2)
$UA_{int,ges}$	W/K	interne Wärmeverlustrate des gesamten Speichers (Kapitel 11.2.2)
$UA_{int,i+1 \rightarrow i}$	W/K	interne Wärmeverlustrate der Segmente i+1 und i (Kapitel 11.2.2)
$UA_{int,i \rightarrow i-1}$	W/K	interne Wärmeverlustrate der Segmente i und i-1 (Kapitel 11.2.2)
$UA_{Mantel+Deckel}$	W/K	Wärmeverlustrate des Speichermantels und -deckels
UA_{Sp}	W/K	Wärmeverlustrate des Speichers
V	m ³	Beladevolumen im Speicher während einer Belade- und Einschichtsequenz (Kapitel 6 und 9.3)
V_{Sp}	m ³	Wasservolumen des Speichers
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom
\dot{V}_B	m ³ /s	Beladevolumenstrom
z	-	Zielfunktion des Parameteridentifikationsverfahrens

Griechische Symbole

Symbol	Einheit	Bezeichnung
Δn	mm/min	Niederschlagsdifferenz
Δp	mbar	Druckdifferenz

ΔT	K	Temperaturdifferenz
$\Delta \dot{G}$	W/m ²	Differenz der Strahlungsleistung
$\Delta \dot{V}$	m ³ /s	Differenz des Volumenstroms
Δw	m/s	Differenz der Windgeschwindigkeit
$\Delta \vartheta$	°C	Temperaturdifferenz
$\Delta \bar{\vartheta}$	°C	über einen Zeitraum gemittelte Temperaturdifferenz
ε^*	-	Emissionsgrad
$\varepsilon_{\text{ges}}^*$	-	Gesamtemissionsgrad einer IR-Kamera-Aufnahme
λ_0	W/(m·K)	Kontinuums-Wärmeleitfähigkeit der Luft
λ_{cpl}	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit durch den Kopplungseffekt
λ_{eff}	W/(m·K)	effektive Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_{\text{eff,RB}}$	W/(m·K)	berechnete, effektive Wärmeleitfähigkeit des Speichermantels für unterschiedliche Randbedingungen (Kapitel 11.2.2)
λ_{gas}	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit der Gasphase
λ_{Luft}	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit der Luft
λ_r	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit durch Wärmestrahlung
λ_s	W/(m·K)	Wärmeleitfähigkeit der Feststoffmatrix
$\lambda_{v,\text{eff}}$	W/(m·K)	effektive, vertikale Wärmeleitfähigkeit im Speichermedium
ϑ	°C	Temperatur
ϑ^n	°C	Temperatur zum Zeitpunkt n
ϑ^{n+1}	°C	Temperatur zum Zeitpunkt n+1
ϑ^{n-1}	°C	Temperatur zum Zeitpunkt n-1
ϑ_{amb}	°C	Umgebungslufttemperatur
ϑ_B	°C	Beladetemperatur während einer Speichersequenz
ϑ_{ext}	°C	Externe Umgebungstemperatur des Speichers
$\vartheta_{\text{Halbraum}}$	°C	Temperatur des Halbraums während einer IR-Kamera-Aufnahme
$\bar{\vartheta}_{\text{Mantel}}$	°C	über die Mantelfläche gemittelte Speicheroberflächentemperatur
ϑ_{Pfad}	°C	Pfadtemperatur während einer IR-Kamera-Aufnahme
$\bar{\vartheta}_{\text{Sp}}$	°C	über die Speicherhöhe gemittelte Mediumstemperatur
$\bar{\vartheta}_{\text{Sp+VD}}$	°C	mittelte Temperatur des Speichermediums und der Vakuumwärmedämmung

$\bar{\vartheta}_{\text{TWD}}$	°C	mittelte Oberflächentemperatur der TWD
$\bar{\bar{\vartheta}}_{\text{TWD}}$	°C	oberflächengemittelte und über den Messzeitraum gemittelte Temperatur der TWD
τ_{Pfad}^*	-	Transmissionsgrad des Pfades während einer IR-Kamera-Aufnahme
$(\tau^* \alpha^*)$	-	Transmissions-Absorptions-Produkt
Ψ	°	Azimuthwinkel

Indizes	Bedeutung
Start	Beginn der Messung
Ende	Ende der Messung
Deckel	Speicherdeckel
Boden	Speicherboden
Mantel	Speichermantel
TWD	transparente Wärmedämmung
VL	Vorlauf
RL	Rücklauf
Seg,i	Speichersegment i
Seg,i+1	Speichersegment i+1
Seg,i-1	Speichersegment i-1
Sonne	Sonne
m	gemessen
c	berechnet
t = 0	Startwert zum Zeitpunkt t = 0

ANHANG

Anhang A: Bezug der Berichtsinhalte zur Vorhabenbeschreibung

In der folgenden Abbildung 79 ist der Bezug der Berichtsinhalte zu den Arbeitspaketen der Vorhabenbeschreibung gezeigt. Tabelle 17 und Abbildung 79 fassen die Bezeichnungen der Arbeitspakete der Vorhabenbeschreibung und der Kapitel des Abschlussberichts zusammen.

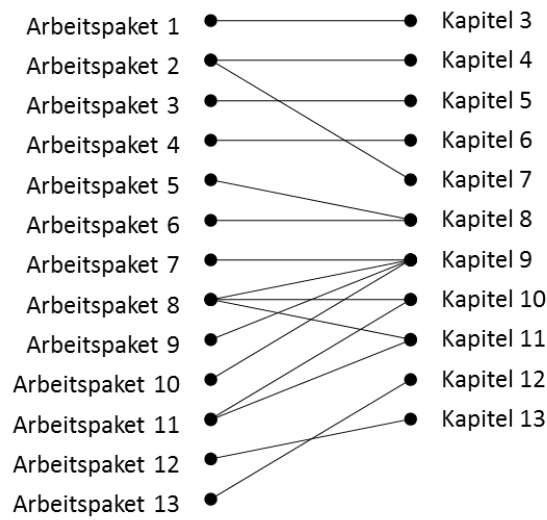


Abbildung 79. Zuordnung der Kapitel des Abschlussberichts zur den Arbeitspaketen der Vorhabenbeschreibung (Stand der Vorhabenbeschreibung: 13 November 2012)

Tabelle 17. Bezeichnung der Arbeitspakete der Vorhabenbeschreibung (Stand der Vorhabenbeschreibung: 13 November 2012)

Arbeitspaket	Bezeichnung
Arbeitspaket 1	Erstellung Pflichtenheft
Arbeitspaket 2	Voruntersuchung zur Wärmedämmung
Arbeitspaket 3	Voruntersuchung zur Transparenten Wärmedämmung
Arbeitspaket 4	Voruntersuchung zur Schichtbe- und Entladeeinrichtungen
Arbeitspaket 5	Konzeption und Konstruktion Prototyp
Arbeitspaket 6	Fertigung Prototyp
Arbeitspaket 7	Aufbau und Inbetriebnahme
Arbeitspaket 8	Untersuchung der Basisvariante
Arbeitspaket 9	Durchführung von Verbesserungsmaßnahmen
Arbeitspaket 10	Untersuchung des verbesserten Prototyps
Arbeitspaket 11	Speicher-Rechenmodell und standardisiertes Abnahmeverfahren
Arbeitspaket 12	Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit
Arbeitspaket 13	Kostenbetrachtung und Wirtschaftlichkeitsuntersuchung

Anhang B: Anlieferung und Aufstellung des Funktionsmusters

In Abbildung 80 ist die Anlieferung und Aufstellung des Funktionsmusters dargestellt.



Abbildung 80. Bilderfolge zur Anlieferung und zur Aufstellung des Funktionsmusters am Prüfstand des ITW/TZS am 18.05.2015

Anhang C: Aufnahmen Einströmvorgänge Beladelanze und Plattenbelader

In Abbildung 81 sind Nahaufnahmen des Ausströmens von Beladefluid aus den Einströmvorrichtungen Beladelanze und Plattenbelader in den Speicher dargestellt.



Abbildung 81. Nahaufnahme des Ausströmens von Beladefluid aus der Beladelanze (oben) und dem Plattenbelader (unten) während einer Beladesequenz; Strömungsmarkierung mit der Methode der Strömungsmarkierung (links) und der Methode der Schlierenoptik (rechts)

In Abbildung 82 sind Nahaufnahmen des Ausströmens von Beladefluid aus der Einströmvorrichtung Plattenbelader bei unterschiedlichen Plattenabständen dargestellt.

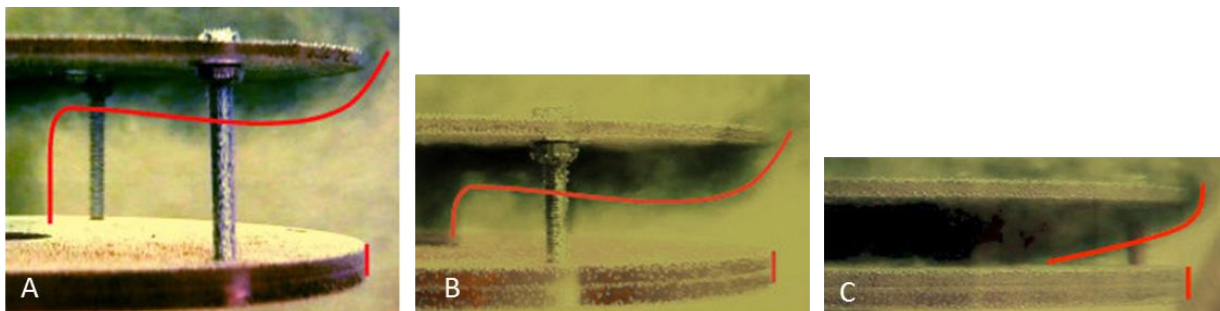


Abbildung 82. Nahaufnahme des Ausströmens von Beladefluid aus dem Plattenbelader während einer Beladesequenz bei einem mittleren Beladevolumenstrom von 101 l/h, einer mittleren Beladefluidtemperatur von 40 °C und einer mittleren Speicherfluidtemperatur von 20 °C bei einem Plattenabstand von 40 mm (Bild A), 25 mm (Bild B) und 15 mm (Bild C); eine rote Linie hebt die Grenze zwischen eingefärbtem Beladefluid und Speicherfluid hervor

In Abbildung 83 ist eine Bilderfolge einer Beladesequenz des Lamellenladers Typ 1 mit markiertem Beladefluid dargestellt.

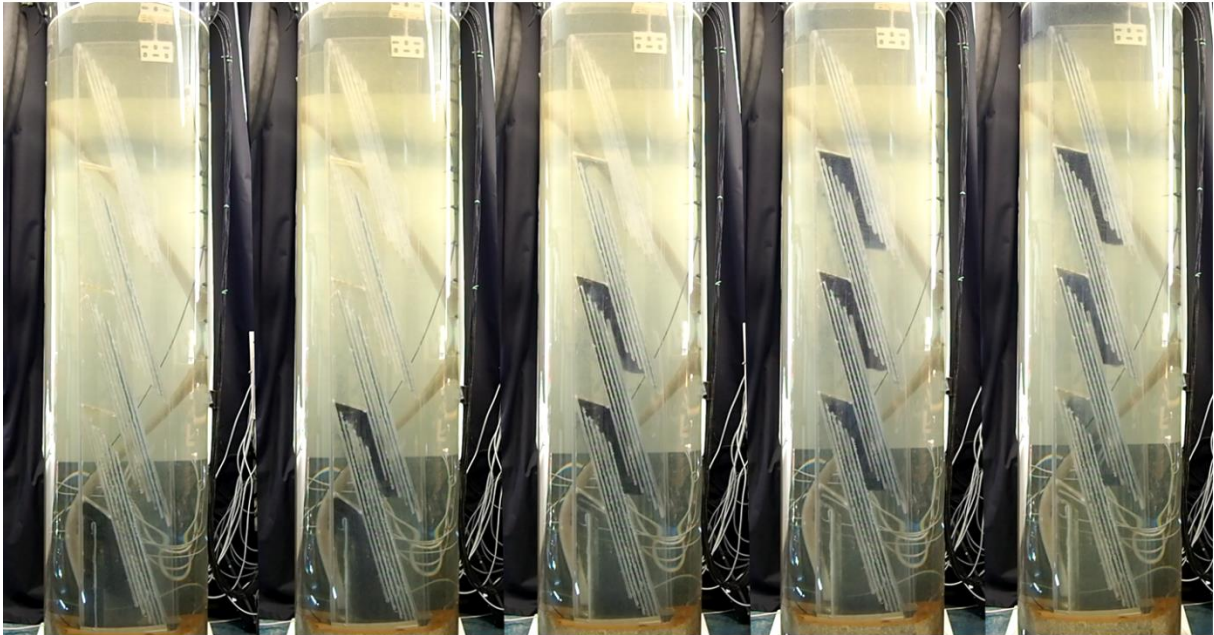


Abbildung 83. Bilderfolge einer Strömungsmarkierung des Beladefluids (Zeitdifferenz zwischen den Bildern: 15 s) während einer Beladesequenz des Lamellenladers Typ 1 mit einem Volumenstrom von 177 l/h, einer Beladefluidtemperatur von 50 °C und einer anfänglichen Speicherfluidtemperatur von 17 °C

In Abbildung 84 ist eine Bilderfolge einer Einschichtsequenz des Lamellenladers Typ 1 mit markiertem Beladefluid dargestellt.



Abbildung 84. Bilderfolge einer Beladefluidmarkierung (Zeitdifferenz zwischen den Bildern: 15 s) während der Einschichtsequenz des Lamellenladers Typ 1 mit einem Volumenstrom von 173 l/h, einer Beladefluidtemperatur von 37 °C und einer geschichteten, anfänglichen Speicherfluidtemperaturverteilung resultierend aus der Beladesequenz in Abbildung 83

Anhang D: Messsensoren und Funktionsmuster

In Abbildung 85 ist die Anordnung der Temperatursensoren auf dem äußeren Mantelblech des Funktionsmusters dargestellt.

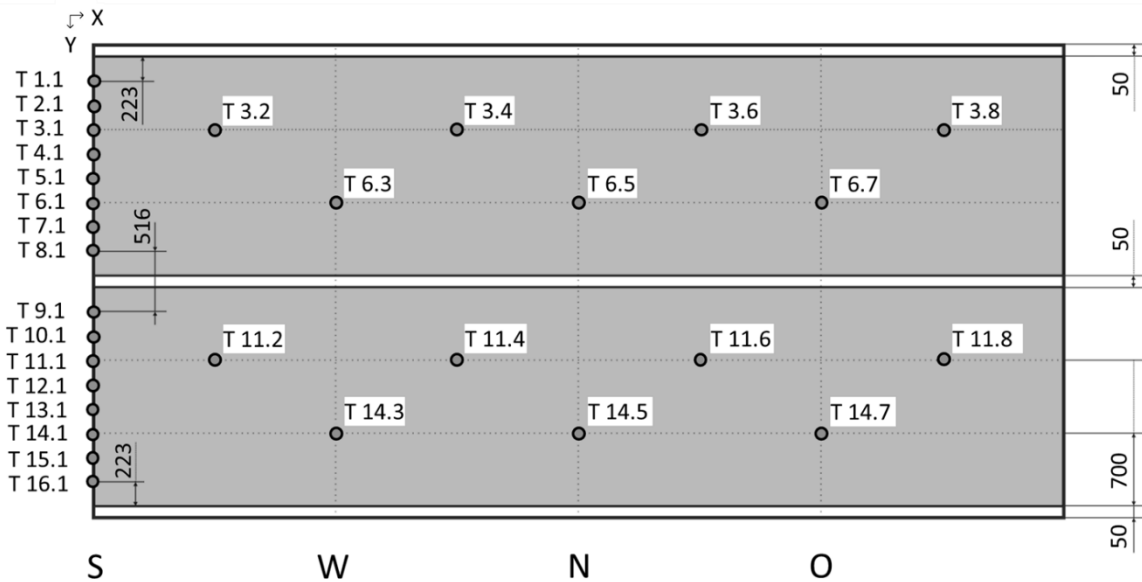


Abbildung 85. Schematisch dargestellte Anordnung der Temperatursensoren auf dem äußeren Mantelblech des Funktionsmusters inkl. Sensorbezeichnung; alle Maßangaben in der Einheit mm

In Abbildung 86 ist ein Foto des Inneren des Funktionsmusters dargestellt.

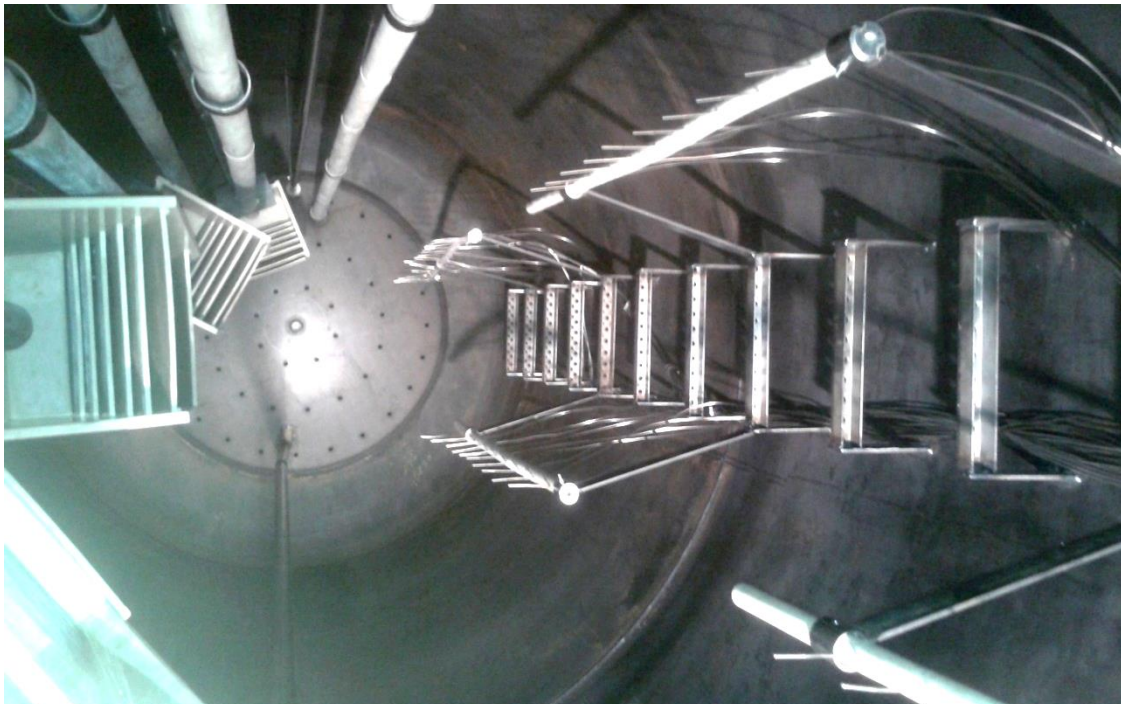


Abbildung 86. Foto des Inneren des Funktionsmusters aufgenommen vom Boden: Mehrere Lamellenlader über der Speicherinnenhöhe verteilt (links oben) und vier Lanzen mit Sensorhalterungen bzw. die Steigleiter (rechts)

In Abbildung 87 sind die Einbauten des Funktionsmusters schematisch dargestellt.

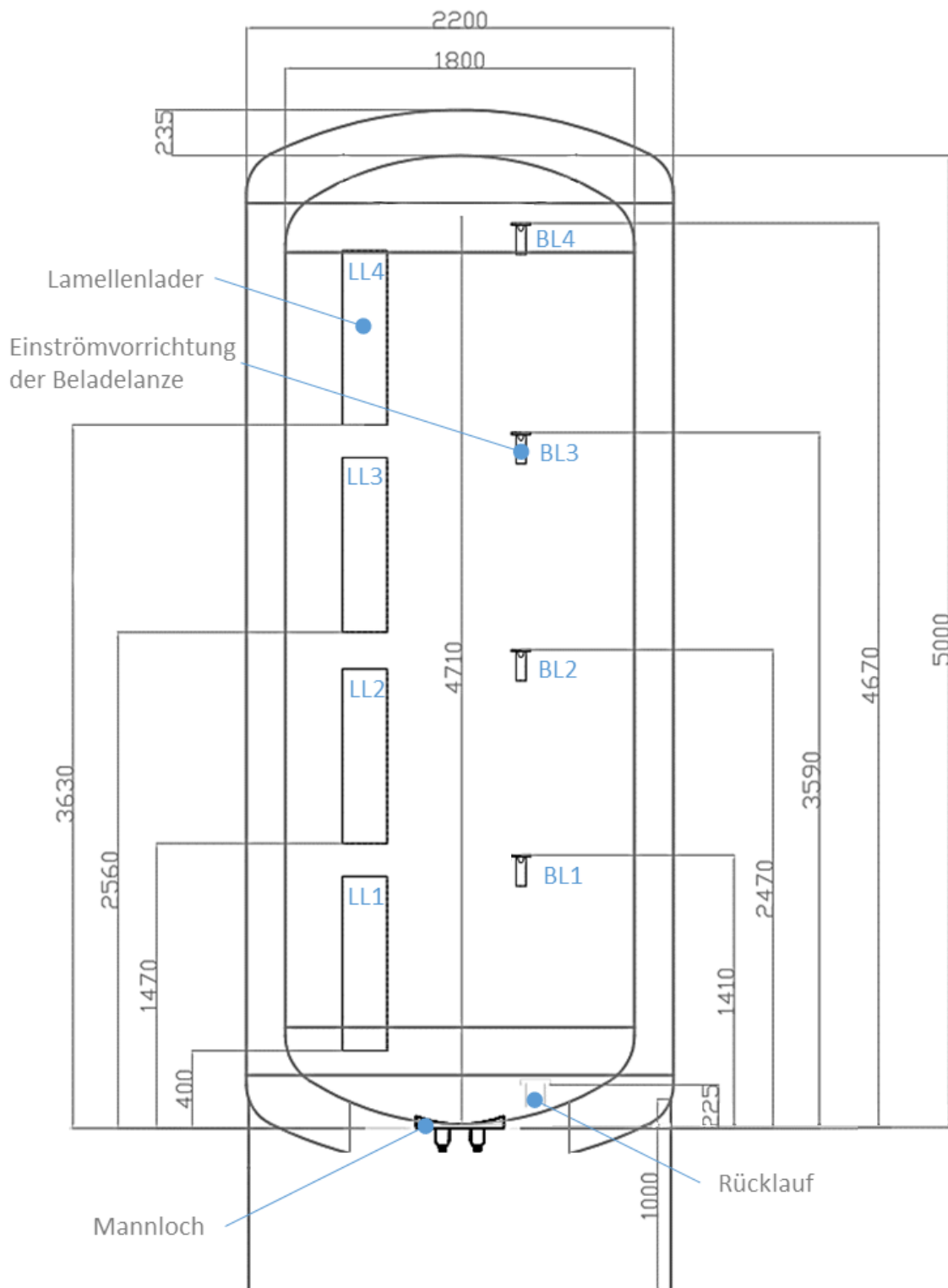


Abbildung 87. Schematische und vereinfachte Abbildung der Einbauten des Funktionsmusters inklusive Maßangaben in der Einheit mm

Anhang E: Validierung Modell mitbewegte TWD

In Abbildung 88 und Abbildung 89 sind ergänzende Modellierungsergebnisse zur Validierung des entwickelten Modells mitbewegte TWD aus Kapitel 10.3 dargestellt.

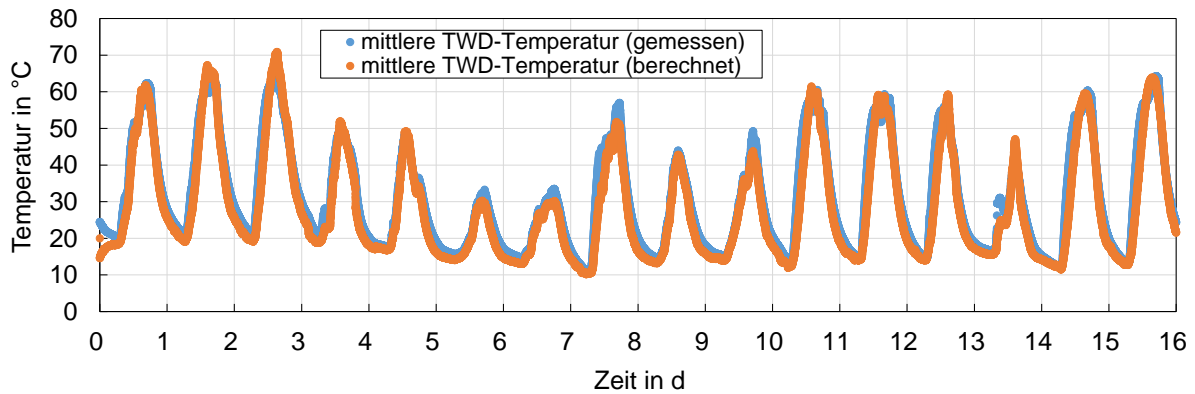


Abbildung 88. Vergleich der gemessenen und berechneten mittleren TWD-Temperatur für das Modell mitbewegte TWD; aufgetragen über der Dauer der Messung (Zeitraum 11.08.15 bis 26.08.15, Verifizierungssequenz)

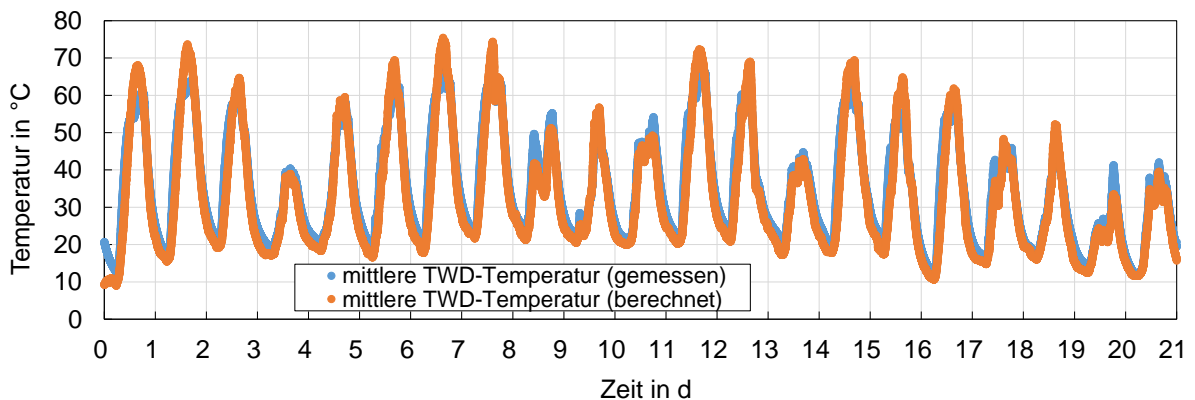


Abbildung 89. Vergleich der gemessenen und berechneten mittleren TWD-Temperatur für das Modell mitbewegte TWD; aufgetragen über der Dauer der Messung (Zeitraum 10.07.15 bis 30.07.15, Validierungssequenz)

Anhang F: Pflichtenheft

Pflichtenheft (Anforderungsliste an die Speicherbaureihe)

Abkürzungen:

F	Forderung
f_{sol}	solarer Deckungsanteil [%]
ID	Identifikator
Mind.	Mindestanforderung
Opt.	Optimum
PCM	Phase Change Material (Phasenwechselmaterial)
W	Wunsch
WP	Wärmepumpe

Pflichtenheft				
Speicherbaureihe "StoEx"				
			Soll-Vorgabe	
F/W	ID	Anforderung	Mind.	Opt.
	1	Speicherbaureihe		
F	1.1	Baureihe von hocheffizienten Warmwasserspeichern mit einem Volumen von etwa 5 bis 100 m ³ zur Aufstellung im Freien	-	-
F	1.2	Spezifische Kosten (inkl. Wärmedämmung) bezogen auf Speicherkapazität	18 €/kWh	15 €/kWh
F	1.3	Optimierte Art der Beladung	geschichtet	stufenlos geschichtet
W	1.4	Optimierte Art der Entladung	auf 4 Ebenen	stufenlos
F	1.5	Optimierung der Speicherbaureihe für Sonnenhäuser hinsichtlich		
		* In der Baureihe angebotenen Speichervolumina [m ³]	5, 10	2 - 30 (individuell)
		* Speicherkapazität pro Bruttovolumen [kWh/m ³]	35	50
		* Speichernutzungsgrad bei $f_{sol}=50\%$ [%]	70	90
F	1.6	Optimierung für öffentliche Gebäude (Kindergarten) hinsichtlich		
		* In der Baureihe angebotenen Speichervolumina [m ³]	5, 10, 20	5 - 75 (individuell)
		* Speicherkapazität pro Bruttovolumen [kWh/m ³]	35	50
		* Speichernutzungsgrad bei $f_{sol}=50\%$ [%]	70	90
W	1.7	Optimierung für Nahwärme (als Pufferspeicher mit Wochenzyklus)		
		* In der Baureihe angebotenen Speichervolumina [m ³]	10, 30 (kaskadierbar)	10, 30, 50, 70, 100 (kaskadierbar)
		* Speicherkapazität pro Bruttovolumen [kWh/m ³]	40	55
		* Speichernutzungsgrad im Betrieb als Pufferspeicher [%]	90	98
W	1.8	Realisierung einer liegenden Bauform (incl. ausgeprägter Temperaturschichtung)		
	2	Mechanische bzw. drucktechnische Anforderungen an den Behälter		
F	2.1	Optimale Materialstärke der Innen- und Außenhülle -> Kostenminimierung bei Einhaltung konstruktiver Sicherheitsanforderungen	wirtschaftl. Optimal	technisch optimal
W	2.2	Aufstellung beim Transport mit nur einem Kran	-	-
W	2.3	Konstruktion einer der Speicherhüllen ohne statische Stützwirkung	-	-
F	2.4	Nachevakuieren des Speichers über längere Zeit nicht notwendig	2 Jahre	ges. Lebensdauer
	3	Speicherkapazität		
W	3.1	Erhöhung der Speicherkapazität	0,1	0,5
W	3.2	Erhöhung der maximalen Speichertemperatur [°C]	120	150
W	3.3	Einsatz von PCM (z.B. Parafin)	-	-
W	3.4	Vereisung des Speichers durch Kombination mit einer WP-Anlage	-	-

	4 Externe Wärmeverluste		
F	4.1 Verbesserung der Dämmwirkung bei gleicher Dämmstärke gegenüber konventionellen Dämmstoffen	Faktor 5	Faktor 10
F	4.2 Füllmaterialkosten (Perlite etc.)	400 €/m ³	100 €/m ³
W	4.3 Senkung der Mindestanforderung an das Vakuum in Abhängigkeit vom Füllmaterial auf	0,1 mbar	50 mbar
W	4.4 Einsatz einer Mischung aus teuren und günstigen Füllmaterialien	-	-
F	4.5 Minimierte Wärmebrücken durch den Wartungszugangsschacht	-	-
F	4.6 Minimierte Wärmebrücken durch die Aufständering	-	-
F	4.7 Einsatz von transparenter Wärmedämmung	-	-
	5 Internen Wärmeverluste des Speichers		
F	5.1 Auswahl geeigneter Vorrichtungen zur thermisch geschichteten Be- und Entladung	-	-
W	5.2 Wärmeleitung durch die innere Behälterhülle minimieren	-	-
	6 Speicherherstellung		
F	6.1 Auswahl von Füllmaterialien mit günstigem Schüttverhalten	-	-
F	6.2 Gute Verarbeitbarkeit der verwendeten Materialien	-	-
W	6.3 Geringes Gesundheitsgefährdungspotential der verwendeten Materialien	-	-
W	6.4 Hohe Umweltverträglichkeit der verwendeten Materialien	-	-
F	6.5 Auswahl von Füllmaterialien mit hoher Verfügbarkeit	ohne Limit. herstellbar	Massenprodukt
	7 Speicheraufstellungsort und Speicherdesign		
F	7.1 Aufstellung im Freien	-	-
F	7.2 Witterungsfest	gemäß DIN EN ISO 12944-2	gemäß DIN EN ISO 12944-2
F	7.3 Optisch anpassbare Transparente Wärmedämmung	-	-
F	7.4 Ästhetisch ansprechend	-	-
	8 Zugänglichkeit des Speichers		
F	8.1 Zugänglichkeit des Speicherinneren ermöglichen	-	-
F	8.2 Möglichkeit der Reparatur des Speichers	-	-
F	8.3 Anpassbarkeit an geänderte Systemrandbedingungen	-	-