

Innovative Wärmedämmungen für thermische Energiespeicher

- Schüttfähige Wärmedämmstoffe, Hochtemperatur-Wärmedämmkonzepte und Vakuumwärmedämmungen -

*Winfried Juschka, Stephan Lang, Markus Gensbaur,
Dominik Bestenlehner, Harald Drück*

Universität Stuttgart, Institut für Gebäudeenergetik,
Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE)
Tel.: 0711/685-63229, Fax: 0711/685-63503
winfried.juschka@igte.uni-stuttgart.de

Einleitung

Bei der Entwicklung von Wärmedämmungen für thermische Energiespeicher besteht weiterhin großer Forschungsbedarf, insbesondere für saisonale Wärmespeicher und Wärmespeicher für höhere Temperaturen. In diesem Beitrag werden die Entwicklung und die experimentelle sowie numerische Untersuchung ausgewählter innovativer Wärmedämmungen für diese Einsatzfälle vorgestellt. Die Ergebnisse wurden im Rahmen mehrerer nationaler und internationaler Forschungsprojekte erarbeitet, die in den vergangenen Jahren am Forschungs- und Testzentrum für Solaranlagen (TZS) bzw. am Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart durchgeführt wurden.

1. Schüttfähige Wärmedämmstoffe

Zum Speichern von Wärme bei einem Temperaturniveau bis max. 95°C werden überwiegend wärmegeämmte Wasserspeicher genutzt. Bei der saisonalen Wärmespeicherung in solaren Nahwärmenetzen erfolgt die Wärmespeicherung in großvolumigen Wärmespeichern wie z.B. erdvergrabene Heißwasserspeicher oder auch in Erdsondenspeichern. Um die Wärmeverluste dieser Langzeitwärmespeicher gering zu halten, kommen klassische schüttfähige Wärmedämmstoffsysteme zum Einsatz. Schüttfähige Wärmedämmstoffe sind z.B. Blähglasgranulat (BGG) oder Schaumglas-schotter (SGS). Hauptvorteile von SGS und BGG gegenüber anderen Wärmedämmstoffen sind vor allem die hohe Druck- und Langzeitbeständigkeit im Erdreich, die geringen spezifischen Kosten und die Umweltverträglichkeit. Die effektive Wärmeleitfähigkeit von schüttfähigen Wärmedämmstoffen setzt sich im Wesentlichen aus den Wärme- und Stofftransportmechanismen wie der 3-dimensionalen Wärmeleitung im umgebenden Gas und im Festkörper, sowie Konvektion und Strahlung zusammen (vgl. Abbildung 1.1). Die konvektive Strömung in schüttfähigen Wärmedämmstoffen kann einen entscheidenden Einfluss auf die tatsächlichen Wärme-

verluste eines wärme gedämmten saisonalen Wärmespeichers haben. Bei durchfeuchteter Wärmedämmung, erhöht sich der Wärmestrom durch das Verdunsten und Kondensieren von Wasser. Bei einer entsprechenden Temperatur kann das Wasser verdunsten und kondensiert bei niedriger Temperatur wieder. Findet das Verdunsten und die Kondensation örtlich getrennt statt, entsteht ein Wärmetransport innerhalb der Wärmedämmung. Der Wärmetransport durch Verdunstung und Kondensation ist mit den Vorgängen in einem Wärmerohr vergleichbar. Um solare Nahwärmanlagen mit erdvergrabenem Wärmespeichern energetisch und wirtschaftlich zu verbessern ist es notwendig, das thermische Verhalten von schüttfähigen Wärmedämmstoffen detailliert zu verstehen um praktische Maßnahmen zur Verbesserung der effektiven Wärmeleitfähigkeit abzuleiten. Im Rahmen des Verbundprojektes „CROW“ werden u. a. die Wärmetransportvorgänge in schüttfähigen Wärmedämmstoffen untersucht. Die Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit erfolgt dabei experimentell mit Hilfe einer am IGTE verfügbaren Einplattenapparatur. Diese Untersuchungen dienen zum einen der Erweiterung der Datenbasis an Materialkennwerten für Wärmedämmung saisonaler Wärmespeicher. Zum anderen sollen die Versuche zum besseren Verständnis der Wärme- und Stofftransportmechanismen in porösen Medien, dienen. In Abbildung 1.2 ist eine Funktionsskizze der am IGTE eingesetzten Einplattenapparatur dargestellt. Die Apparatur besitzt einen zylindrischen Probenbehälter mit einem Volumen von 1,3 m³ (Durchmesser 1,4 m, Höhe 0,85 m), die mit allen denkbaren schüttfähigen Wärmedämmstoffen befüllt werden kann. Zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit wird die trockene Probe einer Temperaturdifferenz zwischen oberer und unterer Heiz- bzw. Kühlplatte ausgesetzt. Damit ein gerichteter vertikaler Wärmestrom zwischen der oberen und unteren Heiz- bzw. Kühlplatte erzeugt wird, befinden sich Schutzplatten über- bzw. unterhalb den Heiz-, bzw. Kühlplatten und am Stahlmantel der Einplattenapparatur eine Schutzringheizung bzw. kühlung. Der von der Heizplatte erzeugte Wärme-strom bildet sich somit nur in vertikaler Richtung aus.

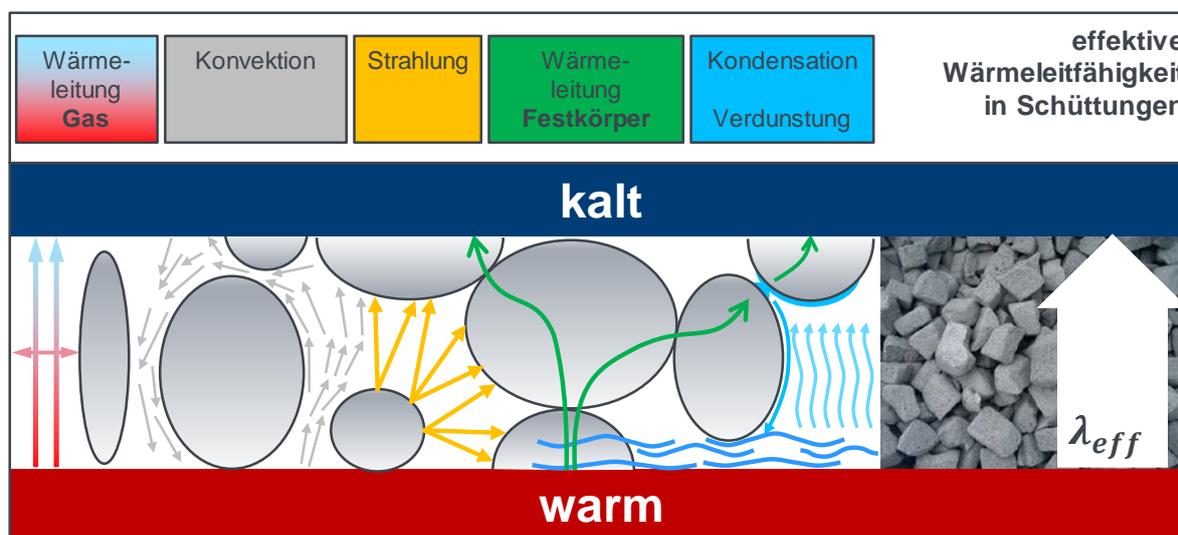


Abbildung 1.1: Wärme- und Stofftransportmechanismen in schüttfähigen Wärmedämmstoffen.

Die Temperatur der Platten und der Schutzringe wird hierbei konstant gehalten. Dadurch herrscht zwischen Heizplatte und Schutzheizplatte, sowie zwischen Heizplatte und Schutzringheizung und zwischen Kühlplatte und Schutzkühlplatte, sowie zwischen Kühlplatte und Schutzringkühlung jeweils eine Temperaturdifferenz von $\Delta\theta = 0\text{ K}$. Wird die untere Platte beheizt und die obere Platte gekühlt, stellt sich ein Wärmestrom von unten nach oben ein. Bei dieser Betriebsweise wird die effektiven Wärmeleitfähigkeit aus Gas- und Festkörperwärmeleitung, Konvektion und Strahlung bestimmt. Durch die Umkehr des Wärmestroms kann der Einfluss auf den Wärmetransport durch Verdunsten und Kondensieren eliminiert werden und so der Wärmetransport bei einer Wärmedämmung des Speicherbodens untersucht werden. Der Wärmetransport in Folge von Konvektion kann durch Evakuieren des Probenbehälters unterbunden werden. Die 3-dimensionale Wärmeleitung im ruhenden Gas und der Wärmetransport durch die Infrarotstrahlung findet in den experimentellen Untersuchungen an der Einplattenapparatur immer statt. Um die einzelnen Wärme- und Stofftransportvorgänge, wie Wärmeleitung, Konvektion und Strahlung separat betrachten zu können, werden die experimentellen Untersuchungen durch CFD-Simulationen (CFD: computational fluid dynamics) unterstützt. Bei der simulativen Untersuchung können durch Ein- oder Abschalten von physikalischen Modellen die Wärme- und Stofftransportvorgänge einzeln betrachtet werden. Für die CFD-Simulation wurde die kommerziell verfügbare Software ANSYS Fluent mit den darin implementierten Modellen genutzt. Der Wasserdampfgehalt des Gases entspricht in der CFD-Simulation dem Sättigungswassergehalt der Luft bei der entsprechenden mittleren Temperatur der kalten und warmen Platte.

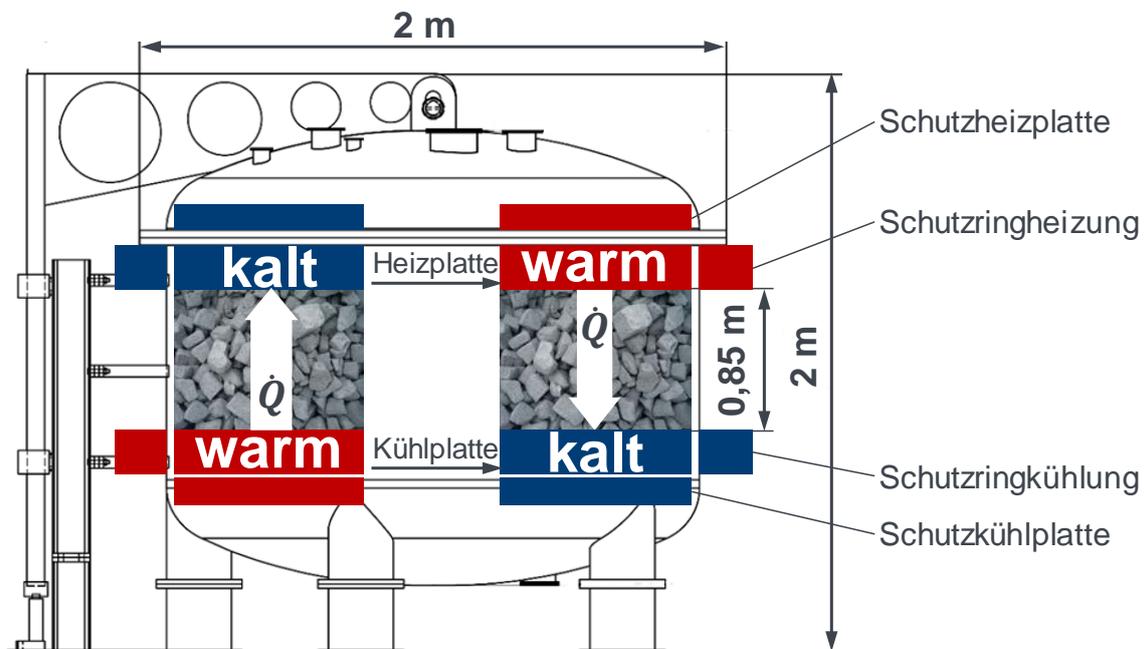


Abbildung 1.1: Funktionsskizze der am IGTE eingesetzten Einplattenapparatur zur Bestimmung der effektiven Wärmeleitfähigkeit von schüttfähigen Wärmedämmstoffen.

Der Wärmetransport infolge von Strahlung innerhalb der Schüttung konnte mit den in der Software ANSYS Fluent vorhandenen Strahlungsmodellen nicht zufriedenstellend abgebildet werden. Um die Sensitivität der einzelnen Modellparameter in der der CFD-Simulation zu bestimmen wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Die Parameter Wärmeleitfähigkeit des Schüttungsmaterials, der Wasserdampfgehalt und die Porosität der Schüttung haben in der CFD-Simulation die höchste Sensitivität. Die Höhe der Temperaturdifferenz bei trockener Wärmedämmung hat keinen bzw. einen sehr geringen Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit. Abbildung 1.3 zeigt die mit der CFD-Simulation und mit einem analytischen Modell aus dem VDI Wärmeatlas (VDI Modell) [1.1] berechnete effektive Wärmeleitfähigkeit. Im VDI-Modell ist eine Differenzierung zwischen dem Transportmechanismus Verdunsten/Kondensation und der effektiven Wärmeleitung durch Konvektion im feuchten Gas nicht möglich. In Abbildung 1.3 setzt sich somit der Wert für die effektive Wärmeleitfähigkeit im VDI-Modell aus der Konvektion der feuchten Luft und dem Wärmetransport durch Verdunstung/Kondensation zusammen. Wird der Wärmetransport durch Strahlung nicht betrachtet, zeigt sich eine gute Übereinstimmung mit den Werten aus der CFD-Simulation und dem VDI-Modell. In der CFD-Simulation hat die Konvektion von trockener Luft ein Anteil an der effektiven Wärmeleitfähigkeit von 20 % im Fall 1 bzw. 14 % im Fall 2. Den größten Einfluss auf die effektive Wärmeleitfähigkeit hat die Feuchtigkeit in der Schüttung. Die Konvektion des Wasserdampfes hat einen Anteil an der effektiven Wärmeleitfähigkeit von 38 % im Fall 1 bzw. 52 % im Fall 2. Der Anteil an der effektiven Wärmeleitfähigkeit auf Grund von verdunsten und kondensieren liegt im Fall 1 bei 38 % bzw. 34 % im Fall 2.

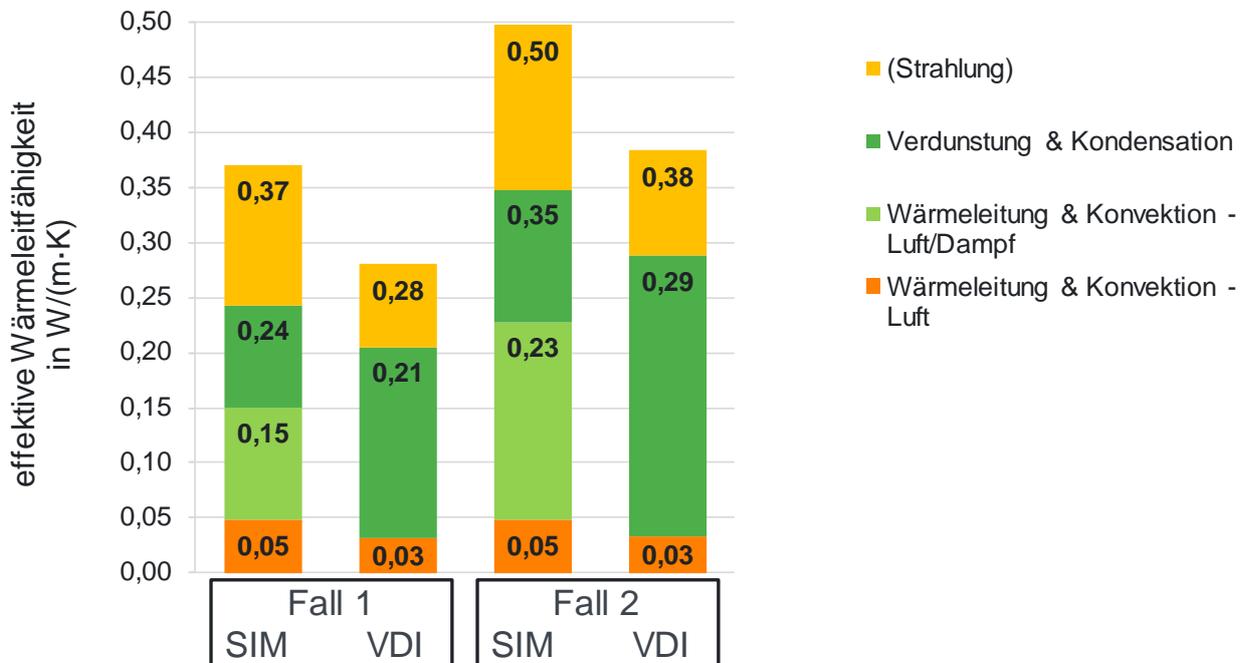


Abbildung 2.1: Ergebnisse der Parameterstudie mit Hilfe der CFD Simulation in Vergleich zum VDI-Modell. Fall 1 $\Delta\vartheta = 30 \text{ K}$, Fall 2. $\Delta\vartheta = 45 \text{ K}$.

Die Untersuchung zeigt, dass ein Durchfeuchten durch geeignete Maßnahmen unbedingt zu verhindern ist, um in der praktischen Anwendung die Dämmwirkung von schüttfähigen Wärmedämmstoffen zu gewährleisten. Des Weiteren wurde mittels der durchgeführten Untersuchungen die Voraussetzung geschaffen, das dynamische Verhalten von schüttfähigen Wärmedämmstoffen in umfangreichere Simulation, wie beispielsweise die Simulationen eines Langzeitwärmespeichers, zu integrieren.

2. Hochtemperatur-Wärmedämmkonzepte

Im Rahmen des EU-geförderten Forschungsprojekts AMADEUS (www.amadeus-project.eu) wurde ein neuartiges Konzept für eine Kombination von Latent-Wärmespeicherung und Strom-Wärme-Strom-Wandlung entwickelt. Eine schematische Skizze des AMADEUS-Konzepts ist in Abbildung 2.1 dargestellt.

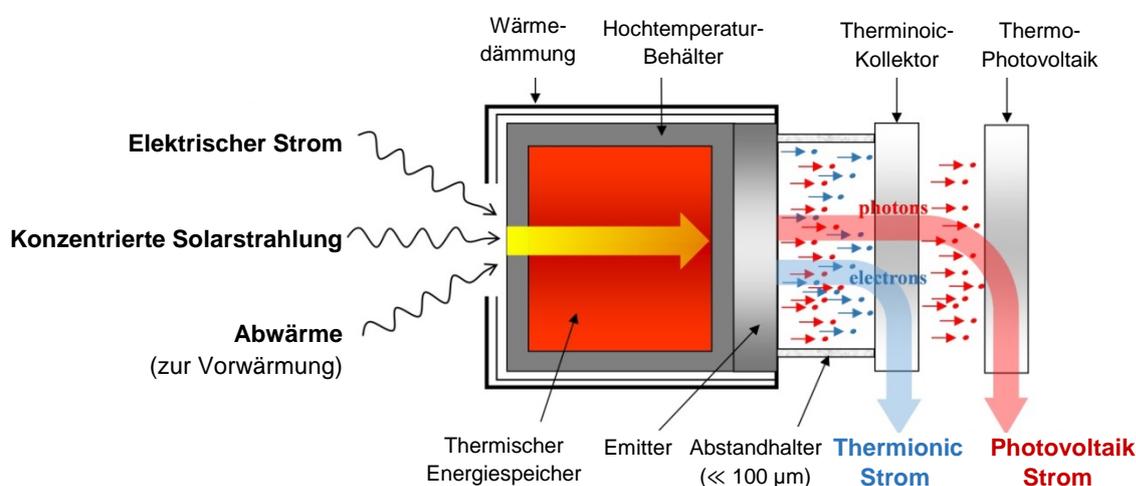


Abbildung 2.1: Schema des AMADEUS-Konzepts für einen thermischen Latentwärmespeicher mit Strom-Wärme-Strom-Wandlung [2.1].

Als PCM¹-Speichermedium kann eine Legierung aus Silizium und Bor eingesetzt werden, mit Schmelztemperaturen von bis zu 2.000 °C. Als Energiequelle kann neben elektrischem Strom aus der Überschuss-Produktion von erneuerbaren Energien auch konzentrierte Solarstrahlung aus Solar-Turm-Kraftwerken und Abwärme verwendet werden. Die Energieumwandlung von Wärme zu elektrischem Strom wird durch eine Kombination aus Thermionic²-Kollektor und Thermo-Photovoltaik-Zelle realisiert. Detaillierte Beschreibungen dieser Technologien und des gesamten AMADEUS-Konzepts finden sich z. B. in [2.2], [2.3], [2.4]. Vorteile des AMADEUS-Konzepts gegenüber z. B. Batteriezellen sind deutlich höhere mögliche volumetrische Energiedichten und vergleichsweise geringe Preise sowie hohe Verfügbarkeit der Speichermaterialien.

Das IGTE hat für diesen neuartigen Hochtemperatur-Latentwärmespeicher ein hinsichtlich Kosten- und Volumeneffizienz optimiertes Wärmedämmkonzept entwickelt

¹ PCM: phase change material. Deutsch: Phasenwechselmaterial.

² auch als „Glühemission“ bekannt

und dafür geeignete Materialien ausgewählt. In diesem Beitrag werden für hohe Temperaturen geeignete Wärmedämmstoffe sowie das Wärmedämmkonzept vorgestellt.

2.1 Marktrecherche Hochtemperatur-Wärmedämmstoffe

Im Vergleich zu Wärmedämmstoffen für Gebäude gibt es nur sehr wenige kommerziell verfügbare Wärmedämmstoffe für Temperaturen bis zu 2.000 °C. Einerseits können nur wenige Materialien diesen hohen Temperaturen standhalten und andererseits gibt es nur sehr wenige Anwendungen bei welchen Temperaturen bis zu 2.000 °C erreicht werden und die eine Wärmedämmung benötigen. Daher wurde zunächst eine Marktrecherche nach geeigneten Hochtemperatur-Wärmedämmstoffen für das AMADEUS-Konzept durchgeführt. Die Hauptkriterien für die Recherche waren Temperaturbeständigkeit, Wärmeleitfähigkeit und der Preis. Tabelle 2.1 listet eine Auswahl an geeigneten Wärmedämmstoffen auf.

Tabelle 2.1: Auswahl an Wärmedämmstoffen [2.5], [2.6], [2.7], [2.8], [2.9], [2.10], [2.11], [2.12], [2.13], [2.14], [2.15], [2.16], [2.17].

Material	Bezeichnung und Hersteller	Max. Temp. ³ [°C]	Wärmeleitfähigkeit ⁴ [W/(m·K)]	Preis [€/dm ³]
Grafit Fasermatte (GFM)	„SIGRATHERM® GFA“; SGL Carbon (D)	2.000 (in Inertgas)	0,5 bei 1.800 °C	17
Grafit Faserplatte (GFP)	„SIGRATHERM® MFA“; SGL Carbon (D)	2.000 (in Inertgas)	0,82 bei 1.800 °C	15
Zirkoniumoxid Faserplatte (ZFP1)	„FBD“; by Zircar Zirconia (USA)	2.000	0,36 bei 1.800 °C	585
Zirkoniumoxid Faserplatte (ZFP2)	„ZYFB-3“; Zircar Zirconia (USA)	1.800	0,18 bei 1.300 °C	263
Aluminiumoxid Faserplatte (AFP)	„UltraBoard 1750/400“ Schupp Industriekeramik (D)	1.750	0,23 bei 1.300 °C	65
Aluminiumoxid Fasermatte (AFM1)	„Alumina mat“; Zircar Ceramics (USA)	1.650	0,26 bei 1.300 °C	7
Aluminiumoxid Fasermatte (AFM2)	„CTM 1600“ CONTHERM (D)	1.600	0,41 bei 1.300 °C	9
Mikroporöse Dämmplatte (MDP)	„WDS® Ultra“; Morgan Advanced Materials (UK)	1.000	0,034 bei 600 °C	2,5

Poröse Wärmedämmstoffe aus Grafit und Zirkoniumoxid sind die einzigen kommerziell verfügbaren, die eine dauerhafte Temperaturbeständigkeit bei 2.000 °C aufweisen. Bei diesen hohen Temperaturen ist Grafit nur in inerter Atmosphäre anwendbar und Zirkoniumoxid muss durch Yttrium stabilisiert werden um mikrostrukturelle Umwandlungen zu vermeiden.

Das AMADEUS-Konzept kann jedoch auch bei Temperaturen unterhalb von 2.000 °C betrieben werden. Außerdem kann die Wärmedämmung aus unterschiedlichen Schichten bestehen, wobei die äußeren Schichten nicht der Maximaltemperatur

³ Maximale Dauertemperatur

⁴ Herstellerdaten; in Stickstoff oder Luftatmosphäre gemessen. Temperaturabhängigkeit s. Abbildung 2.2.

ausgesetzt sind. Daher wurden auch Wärmedämmstoffe mit geringeren Maximaltemperaturen berücksichtigt. Durch die z. T. geringeren Kosten und Wärmeleitfähigkeiten dieser Wärmedämmstoffe kann damit der Material- und Kostenaufwand reduziert werden. Die Preise der Wärmedämmstoffe für Temperaturen oberhalb von 1.000 °C sind dennoch bedeutend höher im Vergleich zu Wärmedämmstoffen für geringere Temperaturen wie expandiertes Polystyrol (ca. 0,075 €/dm³) oder Mineralwolle (ca. 0,045 €/dm³) [2.18].

Die Wärmeleitfähigkeit von porösen Materialien steigt für gewöhnlich mit der Temperatur. Diese Abhängigkeit ist in Abbildung 2.2 für Wärmedämmstoffe aus Tabelle 2.1 dargestellt. Die dargestellten Messpunkte sind Herstellerdaten und die Linien sind vom Autor erstellte Regressionslinien. Die Regressionslinien enden auf der rechten Seite bei der Maximaltemperatur des jeweiligen Wärmedämmstoffs.

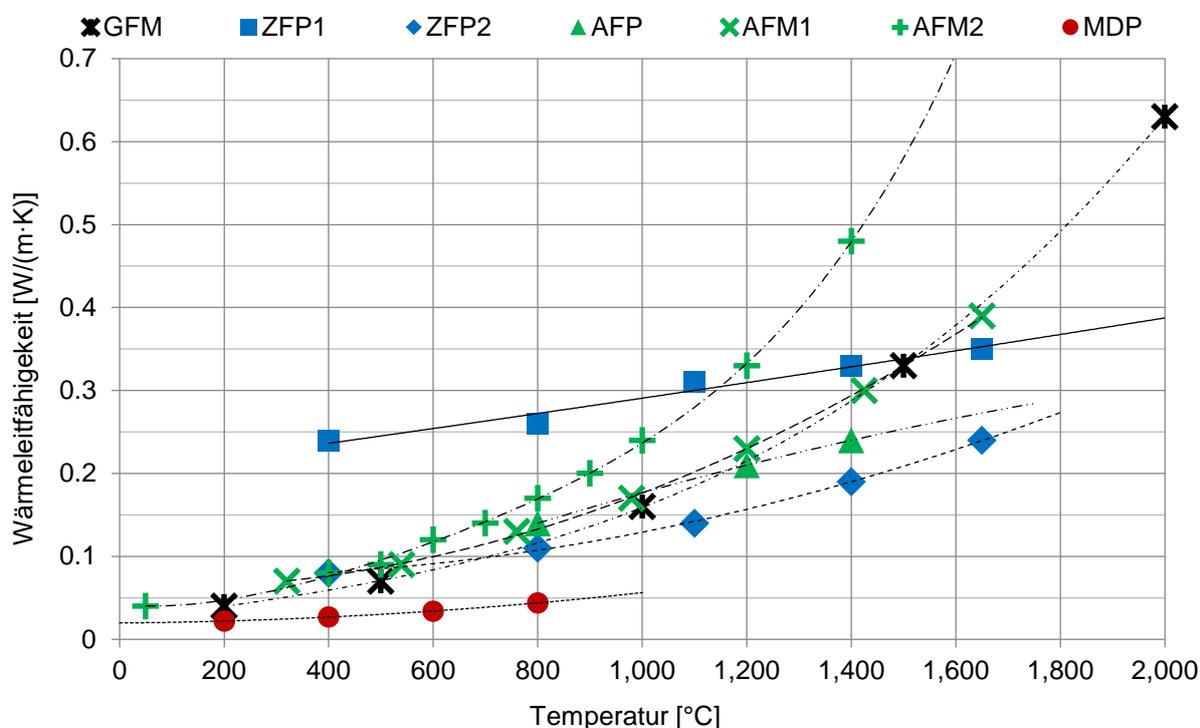


Abbildung 2.2: Wärmeleitfähigkeit ausgewählter Wärmedämmstoffe als Funktion von der Temperatur in Luft- oder Stickstoffatmosphäre (Herstellerdaten) [2.5], [2.7], [2.8], [2.9], [2.10], [2.11].

Die Mikroporöse Dämmplatte (MDP) hat die geringste Wärmeleitfähigkeit der untersuchten Wärmedämmstoffe. Oberhalb der Maximaltemperatur der MDP haben die Zirkonoxid Faserplatten die geringsten Wärmeleitfähigkeiten. Jedoch sind letztgenannte Materialien sehr teuer. Für das AMADEUS-Konzept gilt es eine kosteneffiziente Wärmedämmung mit möglichst geringem benötigtem Dämmvolumen zu identifizieren. Zu diesem Zweck wurden thermische Simulationen an einem stark vereinfachten Modell des AMADEUS-Konzepts (s. Abbildung 2.3) durchgeführt, anhand welcher Grafitfasermatten (GFM), Aluminiumoxidmatten (AFM) und MDP als Bestandteile einer Mehrschicht-Wärmedämmung als am geeignetsten ausgewählt

wurden. Für Bereiche, in denen konstruktionsbedingt eine hohe Steifigkeit notwendig ist, können Faserplattenelemente aus Grafit (GFP) oder Aluminiumoxid (AFP) verwendet werden.

Bei den hohen Temperaturen, die für das AMADEUS-Konzept erforderlich sind und bei welchen die Wärmestrahlung den größten Anteil am Wärmedurchgang durch poröse Strukturen einnimmt, werden in anderen Anwendungen z. T. auch Infrarot-Strahlungsschirme eingesetzt. In einer Potentialstudie konnte jedoch gezeigt werden, dass diese deutlich weniger kosteneffizient sind als der Einsatz der untersuchten Wärmedämmstoffe.

2.2 Wärmedämmkonzepte

In Abbildung 2.3 ist eine Prinzipskizze einer Mehrschicht-Wärmedämmung an einem stark vereinfachten Modell des AMADEUS-Konzepts dargestellt. Es handelt sich dabei um ein Simulationsmodell für das Programm COMSOL Multiphysics, womit u. a. die Auswirkungen der unterschiedlichen Wärmedämmstoffe, Dämmdicken, Atmosphärgase (Stickstoff, Argon, Vakuum) und Speicheroberflächentemperaturen auf die Wärmeverluste des Speichers sowie die Temperaturverteilung innerhalb der Wärmedämmung berechnet wurden (siehe [2.19]). Auf Basis dieser Simulationen wurden geeignete Wärmedämmstoffe anhand der Kriterien Kosten- und Volumeneffizienz ausgewählt.

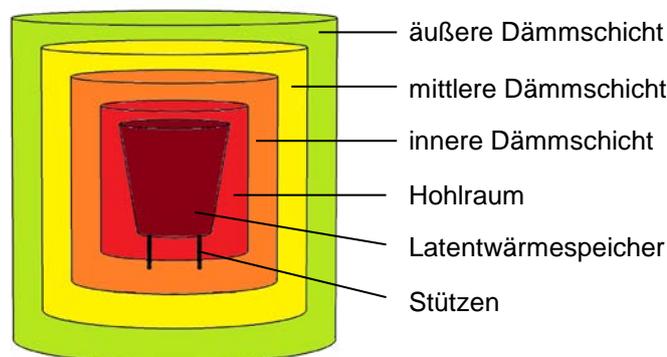


Abbildung 2.3: Prinzipskizze einer Mehrschicht-Wärmedämmung an einem stark vereinfachten Modell des AMADEUS-Konzepts.

Abbildung 2.4 zeigt ein vereinfachtes Simulationsmodell des Prototyps des AMADEUS-Konzepts. Dieser Prototyp wurde in weiterentwickelter Form im Rahmen des Projekts für Machbarkeitsprüfungen aufgebaut. Die Simulationen mit Hilfe des Modells dienen der Dimensionierung der Wärmedämmung. Es wurden dabei die Wärmeverluste und Temperaturverteilungen ausgewertet um die optimalen Schichtdicken und Verteilungen der Wärmedämmstoffe zu bestimmen.

Während des Betriebs des Prototyps wird der Aufbau um das Thermionic-Thermo-Photovoltaik-Energieumwandlungsmodul dauerhaft unterhalb des Latentwärmespeichers angebracht sein. Dadurch kommt es auch zu Betriebszuständen in denen der Speicher beheizt wird und gleichzeitig das Energieumwandlungsmodul und andere Bereiche gekühlt werden müssen um Überhitzungen in sensiblen Bereichen zu

vermeiden. Im Realbetrieb soll das Energieumwandlungsmodul während der Aufheiz- und Speicherungsphase vom Speicher getrennt werden. Anhand des in Abbildung 2.5 dargestellten entsprechenden Modells wurden Simulationen durchgeführt um die maximalen Wärmeverluste bei unterschiedlichen Speichergrößen und -temperaturen abzuschätzen.

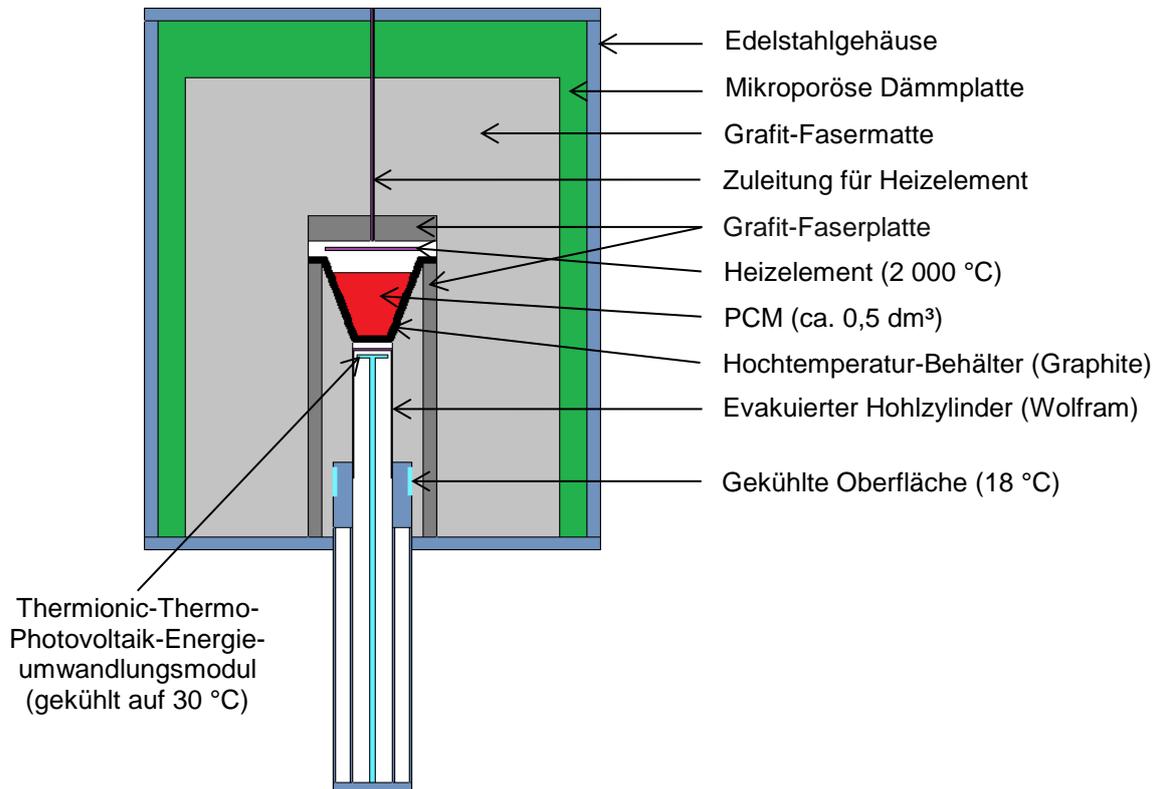


Abbildung 2.4: Vereinfachtes Simulationsmodell des Prototyps des AMADEUS-Konzepts.

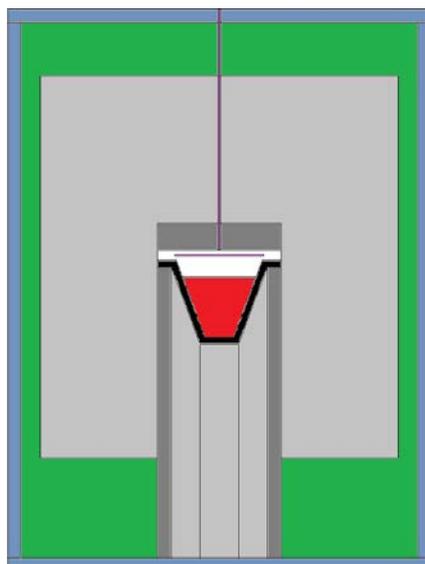


Abbildung 2.5: Vereinfachtes Simulationsmodell des AMADEUS-Konzepts für reale Anwendungsfälle während der Aufheiz- und Speicherphase.

Der Prototyp wurde mittlerweile aufgebaut und es werden erste Versuche durchgeführt. Vorrangig gilt es anhand der Versuche am Prototyp die Funktionsfähigkeit des AMADEUS-Konzeptes nachzuweisen und ggf. Optimierungspotentiale zu identifizieren. Je nach Verlauf der Versuche sind u. a. Variationen der Zusammensetzung des Speichermediums und der Speichertemperatur möglich.

3. Vakuumwärmedämmung für Warmwasserspeicher

Im Rahmen des abgeschlossenen Forschungsprojekts „StoEx“ wurde eine Baureihe hocheffizienter Warmwasserspeicher zur Anwendung außerhalb der Gebäudehülle entwickelt. Diese Speicher mit einem Volumen von bis zu 80 m³ verfügen über eine Vakuumwärmedämmung und können zusätzlich mit einer transparenten Wärmedämmung ausgestattet werden. Eine derartige Kombination von Wärmedämmungen wurde an einem außenaufgestellten Prototypen mit einem Speichervolumen von 12 m³ realisiert und hinsichtlich der Wärmeverluste bewertet. Es konnte eine um den Faktor vier niedrigere Wärmeverlustrate im Mantelbereich im Vergleich zu einem konventionell wärmegeprägten Warmwasserspeicher selber Größe erreicht werden. Durch die hocheffiziente Wärmedämmung in Verbindung mit der Speicheraußenaufstellung wird insbesondere für Bestandsgebäude eine effektive Nachrüstung mit großvolumigen Speichern möglich, die zur Langzeitwärmespeicherung geeignet sind.

3.1 Motivation

In Deutschland fallen über 30 % des Endenergieverbrauchs für die Bereitstellung von Wärme in Gebäuden an [3.1], was ein erhebliches Einspar- und Substitutionspotential bietet. Solarthermische Anlagen in Verbindung mit Warmwasserspeichern (WWS) zur Langzeitenergiespeicherung können einen überwiegenden Teil des thermischen Energiebedarfs eines Gebäudes decken. Im Gebäudebestand ist aus wirtschaftlichen Gesichtspunkten die Außenaufstellung solcher Speicher häufig eine Option. Diese Aufstellungsart führt jedoch im Jahresmittel zu niedrigeren Umgebungslufttemperaturen und somit zu erhöhten Wärmeverlusten im Vergleich zu einer Aufstellung im Inneren des Gebäudes. Die Effektivität der Wärmedämmung ist daher bei diesen Speichern von besonderer Bedeutung. Die Kombination einer hocheffizienten Vakuumwärmedämmung (VWD) und einer kostengünstigen transparenten Wärmedämmung (TWD) zur zusätzlichen Nutzung solarer Gewinne ist besonders bei außenaufgestellten Warmwasserspeichern sinnvoll.

3.2 Stand der Technik

Bei der Anwendung einer TWD in Kombination mit einem Warmwasserspeicher ist hinsichtlich der Zielstellung zu unterscheiden, ob solare Gewinne zur Erwärmung des Speichermediums oder die Erhöhung der Absorbtemperatur der TWD im Vordergrund stehen. Die Erhöhung der Absorbtemperatur dient der Reduzierung des Temperaturgradienten zwischen Speichermedium und Speicheroberfläche, womit eine Reduktion der Wärmeverluste erreicht wird. Ein Vergleich verschiedener TWD-Strukturen hinsichtlich der Erhöhung der Absorbtemperatur zeigt z. B. [3.2]. Bei absorber-parallelen TWD, die im Rahmen der hier vorgestellten Forschungsarbeiten

eingesetzt werden, konnten in den letzten Jahrzehnten weitreichende Erkenntnisse zum Wärmetransport erzielt werden. Die grundlegende Natur des Wärmeübergangs in Spalten hoher Aspektverhältnisse (Verhältnis von Spalthöhe zu Spaltweite) für Luft ist bekannt. Strömungskarten für die unterschiedlichen Strömungsregime liegen vor [3.3], [3.4]. Jedoch entsprechen die Randbedingungen innerhalb einer an einem WWS eingesetzten TWD nur z. T. denen der bekannten Untersuchungen, insbesondere aufgrund des inhomogenen Temperaturfeldes des Absorbers. Ergebnisse einer Strömungsvisualisierung innerhalb der TWD zeigen, dass durch das inhomogene Absorber-Temperaturfeld ein für die Modellbildung relevanter und bis dahin nicht berücksichtigter Wärmetransport durch freie Konvektion vorliegt.

Vakuumwärmedämmungen sind seit einigen Jahren Gegenstand intensiver wissenschaftlicher Untersuchungen, besonders im Bereich der Wärmedämmung von Gebäuden durch Vakuum-Isolations-Paneele (VIP). In [3.5] wird eine ausführliche Erläuterung zur Entwicklung der unterschiedlichen Varianten der Vakuumwärmedämmung ausgehend von der Idee des Dewar-Gefäßes gegeben. Wesentliche wissenschaftliche Fortschritte konnten bei der Modellierung des Wärmetransports durch null- und eindimensionale Modelle für verschiedene pulver-, faser- und schaumförmige Kernmaterialien bzw. Kernmaterialmischungen von VWD erzielt werden. Im vorliegenden Anwendungsfall werden Vakuumwärmedämmungen für thermische Energiespeicher betrachtet. Diese besitzen im Gegensatz zu VIPs i. d. R. eine statisch tragende und weitgehend diffusionsdichte Hülle aus Stahlblechen in Form eines Ringspalts. Diese Gestaltungsart der VWD ist aus dem Anwendungsfeld des Behälterbaus für die Tieftemperaturtechnik [3.6] bekannt und wurde z. T. für die Entwicklung thermischer Energiespeicher im Rahmen nationaler Forschungsprojekte adaptiert [3.7], [3.8]. Als Füllmaterial der VWD kommt durch den hohen Preisdruck im Bereich der WWS häufig expandierter Perlit zum Einsatz. Dieser ist im Vergleich zur pyrogenen Kieselsäure, die meist in VIP eingesetzt wird, günstiger, erfordert jedoch einen niedrigeren Vakuumdruck, um die Gaswärmeleitfähigkeit ausreichend zu reduzieren. Die Idee, eine unter thermischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten optimierte Mischung der Füllmaterialien Perlit und Kieselsäure herzustellen, wurde bereits in [3.9] erwähnt und anschließend experimentell in [3.10], [3.11] für VIP und in [3.12], [3.13] für WWS untersucht.

3.3 Methodik und Ergebnisse

Im Rahmen der Entwicklung eines hocheffizienten, außenaufgestellten Warmwasserspeichers erfolgte zunächst eine theoretische Analyse des Einflusses dynamischer Umgebungsbedingungen auf dessen thermisches Verhalten. Die Ergebnisse dieser Betrachtung dienten als Grundlage für die Konzeption und den Aufbau experimenteller Versuchsstände. Für die Charakterisierung des thermischen Verhaltens unterschiedlicher TWD-Strukturen wurden u. a. Modellwände, die einen Ausschnitt der Speicher-
außenhülle repräsentieren, detailliert messtechnisch untersucht (Abbildung 3.1, links). Mithilfe dieser Versuchsstände im Labormaßstab konnten darüber hinaus Voruntersuchungen zur Adaption der transparenten Wärmedämmung für große WWS durchgeführt werden. Ein Untersuchungsaspekt lag hierbei auf der Betrachtung des Wärme-

und Stofftransports innerhalb der TWD. Es wurde die Strömung innerhalb der TWD mit Hilfe eines Tracer-Fluides visualisiert und das Strömungsfeld analysiert.

Dieses wird maßgeblich durch freie Konvektionsströmungen, die aus einem inhomogenen Oberflächentemperaturfeld des Absorbers resultieren, beeinflusst. Ergebnisse einer Strömungsvisualisierung zeigen innerhalb der TWD (Spaltweite: 35 mm) Luftgeschwindigkeiten von bis zu 0,4 m/s.



Abbildung 3.1: Versuchsstände im Labor- (links), Technikums- (mittig) und Realmaßstab (rechts) zur Untersuchung transparenter Wärmedämmungen und hoch-effizienter Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung.

Die Auswahl des Füllmaterials bzw. der Füllmaterialmischung der Vakuumwärmedämmung wurde u. a. anhand der effektiven Wärmeleitfähigkeit, die mit Hilfe einer Zweiplattenapparatur und einer Zylinderapparatur im Labormaßstab messtechnisch bestimmt (Abbildung 3.2) wurde, und der Materialkosten getroffen.

In der im Projekt „StoEx“ entwickelten Speicherbaureihe wurde eine Füllmaterialmischung aus 70 Ma-% grobkörnigem, expandiertem Perlit und 30 Ma-% pyrogener Kieselsäure genutzt. Diese zeigt im Vakuumdruckbereich zwischen 1 mbar und 10 mbar die niedrigste effektive Wärmeleitfähigkeit im Vergleich zu den anderen Füllmaterialmischungen.

Basierend auf den Ergebnissen aus den Versuchen im Labormaßstab fertigte die Fa. Sirch Tankbau-Tankservice Speicherbau GmbH den in Abbildung 3.1 (rechts) dargestellten Prototypen (12 m³ Wasservolumen) mit VWD und TWD im Realmaßstab, sowie mehrere Versuchsspeicher (1,5 m³ Wasservolumen) im Technikumsmaßstab. An den Warmwasserspeichern im Technikumsmaßstab erfolgten die Ermittlung der Leckageraten und die Charakterisierung der Evakuierbarkeit der VWD. Der Prototyp im Realmaßstab wurde auf einem eigens hierfür konzeptionierten und errichteten Außenprüfstand mit Hilfe neu entwickelter Testsequenzen hinsichtlich seines thermischen Verhaltens und der Effizienz der TWD, aber auch betriebsrelevanter Aspekte, wie Evakuierungsdauer und Vakuumdichtigkeit, untersucht. Es konnte durch die beiden Wärmedämmtechnologien eine sehr niedrige mittlere Auskühlrate des Speichers von 0,2 K/d (Dämmstärke: 20 cm; mittlere Temperaturdifferenz zwischen Speichermedium und Umgebung: 40 K) bzw. eine um den Faktor vier niedrigere

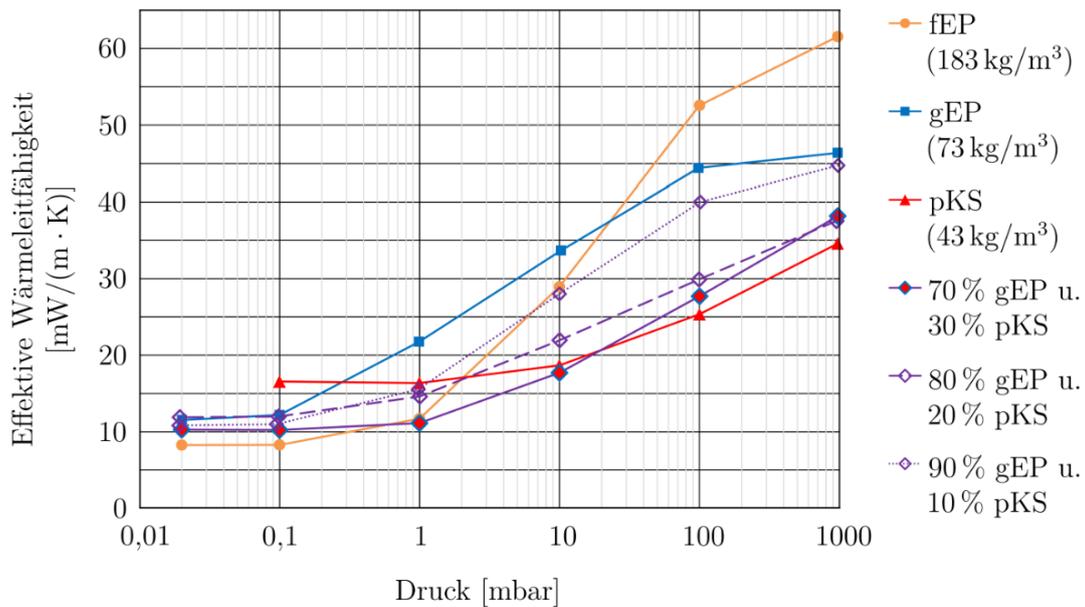


Abbildung 3.2: Labormessung der effektiven Wärmeleitfähigkeit unterschiedlicher Füllmaterialien bzw. Füllmaterialmischungen in Abhängigkeit des Vakuumdrucks [3.7]; gemessen bei einer Mitteltemperatur von 48 °C und der angegebene Schüttdichte (fEP: feinkörniger, expandierter Perlit, gEP: grobkörniger, expandierter Perlit, pKS: pyrogene Kieselsäure)

Wärmeverlustrate im Mantelbereich gegenüber einem konventionell wärmege-
 dämmten Warmwasserspeicher selber Größe erreicht werden. Außerdem erfolgte der
 Nachweis einer für den vorgesehenen Betriebszeitraum von 50 Jahren ausreichend
 geringen Druckzunahme in der VWD von ca. 0,2 mbar/a. Das hochdynamische, therm-
 ische Verhalten der TWD wird bestimmt durch die Umgebungslufttemperatur und die
 vorherrschende solare Einstrahlung. Abbildung 3.3 zeigt einen typischen Verlauf der
 Oberflächentemperatur an acht vertikalen Flächen in unterschiedlicher, azimuthaler

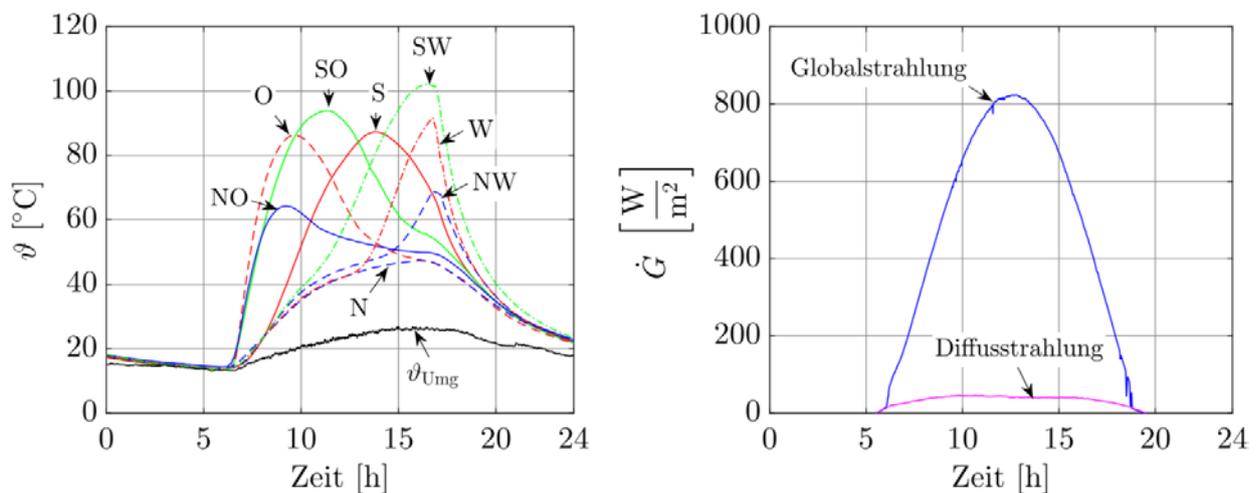


Abbildung 3.3: Exemplarischer Tagesgang der TWD-Absorbertemperatur entsprechend der azimuthalen Ausrichtung und der auftreffenden, solaren Einstrahlung (Global- und Diffusstrahlung in der Horizontalen) sowie der Umgebungstemperatur am Standort des Prototyps

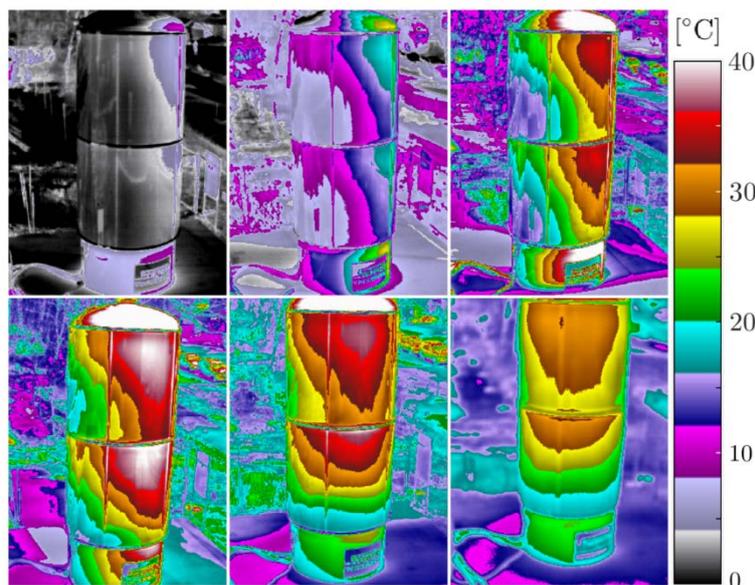


Abbildung 3.4: Thermografie-Aufnahmen der TWD-Oberfläche im fortschreitenden Tagesverlauf aus der Blickrichtung Süd-West (von l. o nach r. u.)

Ausrichtung am Prototyp im Realmaßstab. Exemplarische Thermografieaufnahmen der TWD-Oberflächentemperatur des Prototyps im Tagesgang zeigt Abbildung 3.4. Die Messergebnisse bestätigen die Hypothese aus den Laborversuchen, dass ein komplexer Wärme- und Stofftransport innerhalb der TWD vorliegt und dieser bei der Modellierung zu berücksichtigen ist. Für die analytische Beschreibung des thermischen Verhaltens eines Speichers mit TWD wurde ein parametrisches Mehrknoten-Modell entwickelt. Die analytischen Modellgleichungen umfassen abhängig vom zu modellierenden Speicher mehr als zehn Modellparameter, die nur z. T. aus Stoffdaten abgeleitet werden können. Deshalb wird ein Parameteridentifikationsverfahren angewandt, das die Parameterbestimmung unter Berücksichtigung der dynamischen Umgebungsbedingungen ermöglicht. Ergänzend wurde die Modellierung des thermischen Verhaltens der TWD mit künstlichen neuronalen Netzen untersucht, da diese für die Modellbildung keine Informationen über das erwartete thermische Verhalten erfordern. Beide Modellierungsarten konnten erfolgreich validiert werden. Eine Erweiterung des Warmwasserspeicher-Modells nach [3.14] in TRNSYS, das nun zusätzlich das thermische Verhalten einer TWD berücksichtigt, wurde erfolgreich realisiert. Mit den erreichten Ergebnissen besteht nun die Möglichkeit, das thermische Verhalten hocheffizienter, außenaufgestellter Warmwasserspeicher mit VWD und TWD zu modellieren und deren Effizienz unter Verwendung von Jahressimulationen anwendungsfallbezogen zu bewerten.

3.4 Zusammenfassung und Ausblick

Umfangreiche Forschungsarbeiten am IGTE befassen sich mit der Entwicklung hocheffizienter, außenaufgestellter Warmwasserspeicher zur Langzeitwärmespeicherung. Die bis jetzt nicht ausreichend berücksichtigten Unterschiede zwischen Innen- und Außenaufstellung bei der Modellierung und die noch nicht untersuchte Kombination

der beiden innovativen Wärmedämmtechnologien Vakuumwärmedämmung und transparente Wärmedämmung sowie Forschungen zu innovativen Wärmedämmstoffen bilden hierbei die zentralen Arbeitsbereiche. Mehrere Versuchsspeicher wurden entwickelt, gefertigt und systematisch im Labor-, Technikums- und Realmaßstab untersucht. Aufbauend auf diesen experimentellen Untersuchungen konnte eine Modellierung des thermischen Verhaltens von großvolumigen Warmwasserspeichern erarbeitet werden, die die Einflüsse der im Vergleich zu gebäudeintegrierten Speichern dynamischen Umgebungsbedingungen berücksichtigt. Notwendige Erweiterungen eines numerischen Warmwasserspeichersmodells wurden für die Simulationsumgebung TRNSYS umgesetzt. Durch die neu entwickelte Modellierung ist nun eine anwendungsfallbezogene Bewertung außenaufgestellter Warmwasserspeicher mit Vakuumwärmedämmung und transparenter Wärmedämmung möglich.

Zukünftige Arbeiten werden sich u.a. mit der Demonstration der Technologie vakuumwärmedämmter, außenaufgestellter Warmwasserspeicher für die Anwendung in Mehrfamilienhäusern und Quartieren befassen.

4. Literatur

- [1.1] VDI-Wärmeatlas: Verein Deutscher Ingenieure - Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen (hrsg): Wärmeleitfähigkeit von Dämmstoffen in Abhängigkeit von Temperatur und Feuchtegehalt, S. 677 - 685. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg 2013
- [2.1] Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Instituto de Energía Solar, „ AMADEUS Konzept,“ 20. März 2017. [Online]. Available: www.amadeus-project.eu/project.html.
- [2.2] A. Datas, „Hybrid thermionic-photovoltaic converter,“ Applied Physics Letters, Nr. 108, 2016.
- [2.3] A. Datas et al., „Molten silicon as the basis of a new generation of CSP systems,“ Energy, Bd. 107, pp. 542-549, 2016.
- [2.4] A. Datas et al., „AMADEUS: Next generation materials and solid state devices for ultra high temperature energy storage and conversion,“ AIP Conference Proceedings, Bd. 2033, 2018.
- [2.5] SGL Carbon, „Sigratherm GFA,“ Produktdatenblatt, Wiesbaden, Germany, 2018
- [2.6] SGL Carbon, „Sigratherm MFA,“ Produktdatenblatt, Wiesbaden, Germany, 2018.
- [2.7] Zircar Zirconia, Inc., „ZYFB-3, ZYFB-6 & FBD,“ Produktdatenblatt, New York, USA, 2018.
- [2.8] M.E. SCHUPP Industriekeramik GmbH, „Ultraboard & UltraVac,“ Produktdatenblatt, Aachen, Germany, 2018.
- [2.9] Zircar Ceramics, „Alumina Mat,“ 2017. [Online]. Available: www.zircarceramics.com/pages/flexible. [Zugriff am 13. 10. 2017].

- [2.10] CONTHERM Wärmedämmsysteme GmbH, „CONTHERM CTM 1600,“ Produktdatenblatt, Neuenstein, Germany, 2018.
- [2.11] Morgan Advanced Materials, „WDS Ultra,“ Produktdatenblatt, Windsor, England, 2018.
- [2.12] SGL CARBON, „Angebot,“ in Angebot an die Universität Stuttgart, Bonn, Germany, Quote nr. 14342309, 08.06.2017.
- [2.13] Zircar Zirconia, Inc., „Quote,“ in Angebot an die Universität Stuttgart, Florida, NewYork, USA, 3.04.2017.
- [2.14] M.E.SCHUPP Industriekeramik GmbH & Co. KG, „Angebot,“ in Angebot an die Universität Stuttgart, 01.08.2017.
- [2.15] Zircar Ceramics, „Quote,“ in Angebot an die Universität Stuttgart, Florida, NY, USA, Quote nr. Q201707-025, 13.07.2017.
- [2.16] Conterm Wärmedämmsysteme GmbH, „Angebot,“ in Angebot an die Universität Stuttgart, Neuenstein, Germany, Angebot Nr. AN1700243, 20.07.2017.
- [2.17] Morgen Advanced Materials, Thermal Ceramics, „Angebot,“ in Angebot an die Universität Stuttgart, Reinbeck, Germany, 9.11.2015.
- [2.18] bausep GmbH, „bausep,“ 2018. [Online]. Available: www.bausep.de. [Zugriff am 28. 11. 2018].
- [2.19] S. Lang et al., „Thermal insulation of an ultra-high temperature thermal energy store for concentrated solar power,“ AIP Conference Proceedings, Bd. 2033, pp. 090020-1 - 090020-9, 2018.
- [3.1] Innovationen für die Energiewende - 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung, Herausgeber: Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Stand: September 2018.
- [3.2] Gerschitzka M., et al.: Transparente Wärmedämmung für Langzeit-Wärmespeicher zur Außenaufstellung. Konferenzbeitrag: 11th International Conference on Solar Heating and Cooling, Gleisdorf Solar 2014, Österreich
- [3.3] Wright, J. L., Sullivan, H. F.: Natural Convection in Sealed Glazing Units: A Review. ASHRAE Transactions, Vol. 95, Pt. 1., (1989), pp. 592-603
- [3.4] Korpela, S. A., Lee, A. F.: Heat Transfer Trough a Double Pane Window. Journal of Heat Transfer, Vol. 104, (1989), pp. 539-544
- [3.5] Sprengard C., Spitzner M. H.: Optimierung der energetischen Eigenschaften und der Wirtschaftlichkeit von VIP-Paneelen durch die optimale Kombination von Kie-selsäure-, Mineralfaser- und EPS-Dämmstoff. Veröffentlichung Forschungsinitiative ZukunftBau, F2776. Fraunhofer IRB Verlag, ISBN: 978-3-8167-8521-7, 2011
- [3.6] Beikircher, T., Demharter, M.: Heat Transport in Evacuated Perlite Powders for Super-Insulated Long-Term Storages up to 300 °C. Journal of Heat Transfer, May 2013, Vol.135, pp. 051301-1-051301-11

- [3.7] Gerschitzka M., et al.: Entwicklung großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Dämmung zur Außenaufstellung (Fkz. 0325992A+B). Abschlussbericht, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik, Universität Stuttgart. Abschlussbericht. 2016
- [3.8] Beikircher T., Buttinger F., Demharter M., Herzog F., Konrad M., Reuß M.: Superisolierter Heißwasser-Langzeitwärmespeicher (Fkz: 0325964A). ZAE Bayern. Forschungsbericht. 2013
- [3.9] Alam, M., Singh, H., Limbachiya, M. C.: Vacuum Insulation Panels (VIPs) for building construction industry - A review of the contemporary developments and future directions. Applied Energy 88 (2011) 3592-3602
- [3.10] Alam, M., Singh, H., Brunner, S., Naziris, C.: Experimental characterisation and evaluation of the thermo-physical properties of expanded perlite - Fumed silica composite for effective vacuum insulation panel (VIP) core. Energy and Buildings 69 (2014) 442-450
- [3.11] Alam M.: Development of vacuum insulation panel with low cost core material. Dissertation. 2015. Brunel University London, Department of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering
- [3.12] Gerschitzka M., et al.: Development of a high-efficient long-term thermal energy store for outdoor installation. Proceedings of 9th International Renewable Energy Storage Conference IRES 2015, Düsseldorf, Deutschland
- [3.13] Lang, S., et al.: Thermal conductivity of vacuum insulation materials for thermal energy stores in solar thermal systems. Energy Procedia, 91 (2016) 172-181
- [3.14] Drück H.: Mathematische Modellierung und experimentelle Prüfung von Warm-wasserspeichern für Solaranlagen. Dissertation. Shaker-Verlag, Aachen, 2007. ISBN: 978-3-8322-6215-0

Danksagung

Die Forschungsvorhaben CROW (Erweiterung und Optimierung der solaren Nahwärmeversorgung Hirtenwiesen II in Crailsheim und begleitende Forschungsarbeiten zu solarer Nahwärme und saisonaler Wärmespeicher, FKZ: 0325869B) und StoEx (Entwicklung großvolumiger, preiswerter Warmwasserspeicher mit hocheffizienter Dämmung zur Außenaufstellung, Fkz: 0325992A+B) werden bzw. wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages über den Projektträger Jülich (PTJ) gefördert.

Das Forschungsvorhaben AMADEUS wird im Programm Horizon 2020, als FET-OPEN action durch die Europäische Union unter dem Grant Agreement 737054 gefördert. Die Autoren danken für die gewährte Unterstützung und übernehmen die alleinige Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung.