JOANNEUM RESEARCH RESOURCES

Institut für
Wasser, Energie und Nachhaltigkeit

ENDBERICHT

ThermosTank
Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung eines marktfähigen Wasserwärmespeichers mit Vakuumisolation - Thermoskannenspeicher

S. GUNCZY, P. ENZINGER, K-P. FELBERBAUER, F. HALB,
J. PUCKER, R. STIGLBRUNNER ((JOANNEUM RESEARCH)
F. ALTENBURGER, C. FINK, R. HAUSNER (AEE INTEC)
W. PINK (PINK GMBH)

NEUE ENERGIEN 2020

Programmsteuerung

klima+ energie fonds

Programmabwicklung

FFG

Graz, im November 2012

FFG-Projekt Nr.: 825420
JOANNEUM RESEARCH Projekt Nr.: RES.04-09.GF.027-01
JOANNEUM RESEARCH Bericht Nr.: ENG-B-06/12
Endbericht 90 Seiten

ThermosTank

Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung eines marktfähigen Wasserwärmespeichers mit Vakuumisolation – Thermoskannenspeicher

S. GUNCZY, P. ENZINGER, K-P. FELBERBAUER, F. HALB, J. PUCKER, R. STIGLBRUNNER, (JOANNEUM RESEARCH)

F. ALTENBURGER, C. FINK, R. HAUSNER (AEE INTEC)
W. PINK (PINK GMBH)

NOVEMBER 2012

Projekt Nr.:	RES.04-09.GF.027-01
Bericht Nr.:	ENG-B-06/12
Freigegeben:	Graz, am 30. November 2012

R. Padinger
Forschungsgruppenleiter

S. Gunczy
Projektleiter

Projekttitel

ThermosTank
Grundlegende Untersuchungen zur Entwicklung eines marktfähigen Wasserwärmespeichers mit Vakuumisolation-Thermoskannenspeicher

Projektkonsortium

JOANNEUM RESEARCH Forschungsgesellschaft mbH
RESOURCES
Institut für Wasser, Energie und Nachhaltigkeit
Energieforschung
DI (FH) Stefan Gunczy

Peter Enzinger
DI (FH) DI Karl-Peter Felberbauer
Florian Halb
DI (FH) DI Johanna Pucker
DI Dr. Rudolf Stiglbrunner
Elisabethstraße 18/II
8010 Graz
Tel. +43/316/876-1318
Email: stefan.gunczy@joanneum.at
http://www.joanneum.at

AEE-Institut für Nachhaltige Technologien
DI Florian Altenburger
Ing. Christian Fink
DI Robert Hausner
Feldgasse 19
8200 Gleisdorf
Tel. +43/3112/5886-52
Email: f.altenburger@aee.at
http://www.aee-intec.at

Pink GmbH
DI (FH) Werner Pink
Bahnhofstraße 22
8665 Langenwang
Tel. +43/3854/3666
Email: w.pink@pink.co.at
http://www.pink.co.at

Dieses Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ durchgeführt.

Inhaltsverzeichnis

ZUSAMMENFASSUNG 5

SUMMARY 10

1 EINLEITUNG 14

1.1 AUFGABENSTELLUNG 14

1.2 SCHWERPUNKTE DES PROJEKTES 14

1.3 EINORDNUNG IN DAS PROGRAMM 15

1.4 VERWENDETE METHODEN 15

1.4.1 Grundlegende theoretische Voruntersuchungen 15

1.4.2 Planung und Auslegung einer Laborversion eines Thermoskannenspeichers 16

1.4.3 Bau einer Laborversion eines Thermoskannenspeichers 17

1.4.4 Messungen und Tests 17

1.4.5 Techno-ökonomische und ökologische Bewertung 18

1.5 AUFBAU DER ARBEIT 20

2 INHALTLICHE DARSTELLUNG 21

2.1 GRUNDLEGENDE THEORETISCHE VORUNTERSUCHUNGEN 21

2.2 PLANUNG UND BAU EINER LABORVERSION EINES THERMOSKANNENSPEICHERS 28

2.3 MESSUNGEN UND TESTS 28

2.4 TECHNO-ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG 33

2.4.1 Technische Bewertung 33

2.4.2 Ökonomische Bewertung 33

2.4.3 Ökologische Bewertung 34

3 ERGEBNISSE UND SCHLUSSFOLGERUNGEN 41

3.1 GRUNDLEGENDE THEORETISCHE VORUNTERSUCHUNGEN 41

3.1.1 Wärmeleitfähigkeit im Vakuum 41

3.1.2 Systemsimulationen 48

3.2 PLANUNG UND BAU EINER LABORVERSION EINES THERMOSKANNENSPEICHERS 54

3.3 MESSUNGEN UND TESTS 56

3.4 TECHNO-ÖKONOMISCHE UND ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG 60

3.4.1 Technische Bewertung 60

3.4.2 Ökonomische Bewertung 60

3.4.3 Ökologische Bewertung 64

3.5 SCHLUSSFOLGERUNGEN 73

4 AUSBLICK UND EMPFEHLUNGEN 74

5 LITERATURVERZEICHNIS 75

6 ANHANG 77

6.1 BERECHNUNG DER WÄRMELEITFÄHIGKEIT IM VAKUUM 77

6.1.1 Ermittlung der Verlustwärmeströme im Vakuum 77

6.1.2 Gesamte Wärmeleitfähigkeit im Vakuum 82

6.2 SYSTEMSIMULATIONEN 83

6.2.1 Referenzmodelle 83

6.2.2 Kennzahlen 84

6.3 ÖKOLOGISCHE BEWERTUNG 86

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Wärmeleitfähigkeit und Wärmeverluste für verschiedene Drücke und Vakuumdämmvarianten 27
Tabelle 2-2: Verwendete Messtechnik 31
Tabelle 2-3: Dämmstärke und Abmessungen der entsprechenden Testspeicher 33
Tabelle 2-4: Übersicht über die untersuchten Varianten für 1.000 L Speichervolumen 35
Tabelle 2-5: Übersicht über die untersuchten Varianten für 5.000 L Speichervolumen 35
Tabelle 2-6: Grunddaten Standardspeicher mit Weichschaumdämmung (3 bar, mit Schichtbeladerohren) 36
Tabelle 2-7: Grunddaten Thermoskannenspeicher (ThermosTank) (3 bar, mit Schichtbeladerohren) 37
Tabelle 2-8: Jahresenergiebilanzen für thermische Speicher mit Speichervolumen von 1.000 L, λ-Wert theoretisch, 10 bzw. 20 m² Solarkollektorfläche 38
Tabelle 2-9: Jahresenergiebilanzen für thermische Speicher mit Speichervolumen von 1.000 L, λ-Wert bestimmt aus Messergebnissen, 10 bzw. 20 m² Solarkollektorfläche 38
Tabelle 2-10: Jahresenergiebilanzen für thermische Speicher mit Speichervolumen von 5.000 L, λ-Wert theoretisch, 20 bzw. 40 m² Solarkollektorfläche 39
Tabelle 2-11: Wärmeleitfähigkeitswerte für Bestimmung der Jahresenergiebilanz 39
Tabelle 2-12: Grunddaten für verschiedene Heizkessel 40
Tabelle 3-1: Parameter für die Berechnung der gesamten Wärmeleitfähigkeit 42
Tabelle 3-2: Parameter für die Berechnung der gesamten Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung eines transparenten bzw. opaken Materials 44
Tabelle 3-3: Dämmstärken der unterschiedlichen Speichergrößen 52
Tabelle 3-4: Vergleich der unterschiedlichen Dammvarianten zwischen Literatur (Theorie) und die Messung am Versuchstand 60
Tabelle 3-5: Zusammenstellung der Daten aller betrachteten Varianten 64
Tabelle 6-1: Parameter der Systemsimulationen 83
Tabelle 6-2: Spezifische Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einem Gaskessel als Nachheizung 87
Tabelle 6-3: Spezifische Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einem Pelletkessel als Nachheizung 87
Tabelle 6-4: Spezifische Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einem Ölkessel als Nachheizung 87
Tabelle 6-5: Spezifischer kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einem Gaskessel als Nachheizung 88
Tabelle 6-6: Spezifischer kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einem Pelletkessel als Nachheizung 88
Tabelle 6-7: Spezifischer kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einem Ölkessel als Nachheizung 88
Tabelle 6-8: Einsparung der Treibhausgasemissionen durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Gaskessel 89
Tabelle 6-9: Einsparung der Treibhausgasemissionen durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Pelletkessel 89
Tabelle 6-10: Einsparung der Treibhausgasemissionen durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Ölkessel 89
Tabelle 6-11: Einsparung des kumulierten Energieaufwands durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Gaskessel 90
Tabelle 6-12: Einsparung des kumulierten Energieaufwands durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Pelletkessel 90
Tabelle 6-13: Einsparung des kumulierten Energieaufwands durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Ölkessel 90

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 0-1: 3D-Ansicht der Laborversion des Thermoskannenspeichers 7
Abbildung 1-1: Systemelement der ökologischen Bewertung 19
Abbildung 2-1: Schema Vakuumpufferspeicher der Firma Waukmann (Waukmann, 2010) 21
Abbildung 2-2: Schema Vakuumpufferspeicher der Firma Hummelsberger (Hummelsberger, 2010) 22
Abbildung 2-3: Schema Vakuumpufferspeicher der Firma KBW (KBW, 2010) 23
Abbildung 2-4: Wärmeleitfähigkeit im Spalt unter Verwendung von Strahlungsfolien (links) und eines opaken Schüttmaterials (rechts) (siehe auch Simmler et al., 2005) 25
Abbildung 2-5: Opakes Schüttmaterial HDK T30 der Firma Wacker Chemie AG 26
Abbildung 2-6: Hydraulischer Aufbau des Speichertestandes inkl. Wärme- und Kälteversorgung 29
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Anschlüsse für die Durchführung der Speichertests 30
Abbildung 2-8: Position der Temperaturfühler bei jedem der drei Testspeicher 31
Abbildung 2-9: Speicher am Teststand im Labor der AEE INTEC inklusive Beladestation (Links: Thermoskannenspeicher mit Schüttmaterial im Vakuumspalt, Mitte: Standardspeicher mit PU-Weichschaumdämmung, Rechts: Standardspeicher mit Vakuumisolationspaneelen - VIP's) 32
Abbildung 3-1: Gesamte Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Spaltbreiten 41
Abbildung 3-2: Gesamte Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung von Strahlungsfolien im Spalt 43
Abbildung 3-3: Totale Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung eines transparenten Schüttmaterials im Vakuumraum bei unterschiedlichen Emissionskoeffizienten des Innen- und Außenbehälters (links: εi/a =0,1; rechts: εi/a =0,5) 44
Abbildung 3-4: Gesamte Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung eines opaken Schüttmaterials 46
Abbildung 3-5: Gegenüberstellung der gesamten Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung von Strahlungsfolien (links) und dem opaken Schüttmaterial HDK N20 inkl. IR-Trüber (rechts) in Abhängigkeit vom Porendurchmesser 47
Abbildung 3-6: Jährliche Speicherverluste eines real gedämmten Speichers (Real), eines ideal gedämmten Speichers (Ideal) und eines Speichers mit Vakuumdämmung (Vakuum) in Abhängigkeit der Dämmstärke 49
Abbildung 3-7: Ermittlung der optimalen Dämmstärke anhand des Verlaufs der thermischen Verluste und des solaren Deckungsgrades bei einem Pufferspeicher mit einem Nenninhalt von 1 m³ (links) und 5 m³ (rechts) 51
Abbildung 3-8: Ermittlung der optimalen Dämmstärke anhand des Verlaufs der thermischen Verluste und des solaren Deckungsgrades bei einem Pufferspeicher mit einem Nenninhalt von 10 m³ (links) und 50 m³ (rechts) 51
Abbildung 3-9: Vergleich des solaren Deckungsgrades zwischen vakuumgedämmten Speichern, ideal (linkes) und real (rechts) gedämmter Speicher in Abhängigkeit der Kollektorfläche und des Speichervolumens für ein Niedrigenergiehaus 52
Abbildung 3-10: Vergleich des solaren Deckungsgrades zwischen vakuumgedämmten Speichern, ideal (links) und real (rechts) gedämmter Speicher in Abhängigkeit der Kollektorfläche und des Speichervolumens für ein Passivhaus 53
Abbildung 3-11: Aufriss der ausgewählten Konstruktionsvariante der Laborversion des Thermoskannenspeichers mit 1.000 L Speicherinhalt 54
Abbildung 3-12: 3D-Ansicht einer der ausgewählten Konstruktionsvariante der Laborversion des Thermoskannenspeichers mit 1.000 L Speicherinhalt 54
Abbildung 3-13: Befüllung des Thermoskannenspeichers am Technikum von JOANNEUM RESEARCH in Graz (rechtes Bild: Befüllöffnung an der Oberseite des Speichers, linkes Bild: Befüllvorgang mit Hilfe eines Rüttlers der Fa. Wacker) 55
Abbildung 3-14: Thermoskannenspeicher (links), Referenzspeicher: Standardspeicher mit PU-Weichschaumdämmung (mitte), Standardspeicher mit VIP`s (rechts) 56
Abbildung 3-15: Auskühlverhalten des vakuumgedämmten Testspeichers 57
Abbildung 3-16: Schichtungsverhalten des vakuumgedämmten Testspeichers beim Beladevorgang (links) und Entladevorgang (rechts) 58
Abbildung 3-17: Thermographie-Aufnahmen des vakuumgedämmten Speichers 59

Abbildung 3-18: Solarer Deckungsgrad beim Passivhaus in Abhängigkeit von Kollektorfläche und Speicher 61
Abbildung 3-19: Solarer Deckungsgrad beim Niedrigenergiehaus in Abhängigkeit von Kollektorfläche und Speicher 62
Abbildung 3-20: Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Entsorgung eines 1.000 L Standardspeichers mit Weichschaumdämmung (Standard PU) und eines 1.000 L Thermoskannenspeichers (Vakuum) 66
Abbildung 3-21: Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Entsorgung eines 5.000 L Standardspeichers mit Weichschaumdämmung (Standard PU) und eines 5.000 L Thermoskannenspeichers (Vakuum) 66
Abbildung 3-22: Kumulierter Energieaufwand für die Herstellung und Entsorgung eines 1.000 L Standardspeichers mit Weichschaumdämmung (Standard PU) und eines 1.000 L Thermoskannenspeichers (Vakuum) 67
Abbildung 3-23: Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (10 m²) in Kombination mit einem Ölkessel für 1.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch) 69
Abbildung 3-24: Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einem Ölkessel für 1.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch) 69
Abbildung 3-25: Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (10 m²) in Kombination mit einem Pelletkessel für 1.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch) 70
Abbildung 3-26: Kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (10 m²) in Kombination mit einem Ölkessel für 1.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch) 70
Abbildung 3-27: Kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (10 m²) in Kombination mit einem Pelletkessel für 1.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch) 71
Abbildung 3-28: Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (40 m²) in Kombination mit einem Ölkessel für 5.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch) 72
Abbildung 3-29: Kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (40 m²) in Kombination mit einem Ölkessel für 5.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch) 72
Abbildung 6-1: Modell einer teilsolaren Raumheizung in der Simulationsumgebung Polysun 5.4 84

Zusammenfassung

Ausgangssituation/Motivation

Thermische Energiespeicher sind eine wichtige Technologie für den Einsatz erneuerbarer Energieträger und zur Verbesserung der Energieeffizienz beim Ausgleich von Last- und bzw. oder Bedarfsspitzen. Durch eine Steigerung der Energieeffizienz thermischer Speicher erhöht sich auch die Energieeffizienz aller Umsetzungsverfahren mit erneuerbaren Energieträgern, bei denen Wärme gespeichert wird. Derzeit stellen thermische Wasserspeicher, also Warmwasserspeicher (300 bis 500 L), Pufferspeicher (800 bis 1.000 L) mit 5 bis 10 cm Wärmedämmung (üblicherweise Hart- und Weichschaumdämmung) den Standard bei der Speichertechnik zur Wärmebereitstellung von Ein- und Mehrfamilienhäusern dar. Diese weisen aber aufgrund der geringen Dämmstärke und besonders auch aufgrund der Ausführung der Rohrdurchführungen, der Passgenauigkeit der Dämmelemente (Kaminlüftungsspalte) und thermischer Zirkulations-Effekte in den Rohranschlüssen am Speicher relativ hohe Wärmeverluste auf, wodurch die Energieeffizienz des Gesamtsystems verringert wird. Eine Verbesserungsmöglichkeit stellen Speicher mit besserer Wärmedämmung wie z: B. Vakuumdämmung dar. Bei solchen Speichern sind die Wärmeverluste erheblich geringer sind da sie im Wesentlichen nur aufgrund von Wärmestrahlung wie z. B. bei einer Thermoskanne erfolgen. Eine weitere Verbesserung besteht in der Ausführung der Rohranschlüsse mit so genannten Zirkulationsbremsen. Derartige Speicher sind heute noch nicht am Markt. Im Sinne der Bestrebungen um größtmögliche Energieeffizienz besteht daher die Notwendigkeit derartige Speicher so rasch wie möglich zu entwickeln.

Inhalt und Ziele

Ziel des Projekts war die Erarbeitung von Wissen zur Konstruktion eines thermischen Wasserspeichers mit Vakuumdämmung (Thermoskannenspeicher), welcher hinsichtlich Effizienz, Kosten, Kapazität und Integrierbarkeit in die Gebäudetechnik bzw. in das Gebäude optimiert ist. Es wurde eine Laborversion eines Thermoskannenspeichers gebaut an welcher Messungen zur Beurteilung der Wärmeverluste durchgeführt wurden.

Die Teilziele im Projekt waren:

- Zusammenstellung marktrelevanter Vakuumdämmsysteme als Grundlage für die Planung und Auslegung der Laborversion
- Auswahl, Planung und Auslegung einer Laborversion eines Thermoskannenspeichers.
- Herstellung einer Laborversion des Thermoskannenspeichers, welche für die Durchführung grundlegender Versuche geeignet ist.

- Durchführung von Tests und Messungen zur Bewertung der technischen Eigenschaften des Thermoskannenspeichers sowie Erstellung von Vorschlägen für dessen optimale Ausführung.
- Beurteilung der technischen und ökonomischen Machbarkeit eines Prototyps basierend auf den Ergebnissen des getesteten Thermoskannenspeichers hinsichtlich Speichervolumina von 800 bis 3.000 L.
- Ökologischen Bewertung des Thermoskannenspeichers anhand einer Life-Cycle Analyse.

Die Arbeiten im Projekt wurden in sechs Arbeitspakete gegliedert:

- AP 1: Grundlegende theoretische Voruntersuchungen
- AP 2: Planung und Auslegung einer Laborversion eines Thermoskannenspeichers
- AP 3: Bau der Laborversion eines Thermoskannenspeichers
- AP 4: Messungen und Tests an der Laborversion zur Beurteilung der technischen Eigenschaften
- AP 5 Techno-ökonomische und ökologische Bewertung
- AP 6: Projektkoordination

Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse der durchgeführten theoretischen Voruntersuchungen zeigten, dass eine kostengünstige Herstellung eines Thermoskannenspeichers möglich ist und eine Langzeitstabilität des Vakuums bei einem Doppelmantelstahlkonstruktion bei etwa 1 mbar erwartet werden kann. Als einfachste und kostengünstigste Konstruktionsvariante zur Vermeidung der Strahlungsverluste ergab sich die Befüllung des Vakuumspalts mit einem Schüttmaterial (HDK T30 bzw. HDK N20). Des Weiteren konnten aus den Simulationen wichtige Erkenntnisse hinsichtlich des Einstzes von Schüttmaterial bei vakuumgedämmten Speichern gewonnen werden. Die Simulationsergebnisse zeigten, dass zum einen durch geringere erforderliche Dämmstärke der Raumbedarf für den Speicher entsprechend gering ist und zum anderen höhere solare Deckungsgrade bei gleicher Kollektorfläche im Vergleich zu herkömmlichen, mit PU-Weichschaum gedämmten, Speichen erzielt werden können.

Um die Mess- und Testergebnisse des Thermoskannenspeichers mit anderen Speichern vergleichen zu können wurden die Messungen und Tests gleichzeitig an drei gleich großen unmittelbar nebeneinander stehenden Speichern durchgeführt. Neben dem Thermoskannenspeicher war dies ein mit PU-Weichschaum und ein mit Vakuumisolationspaneelen gedämmter Speicher. Für alle Speicher wurde eine spezielle Schichtladeeinheit konstruiert und gebaut. Die Rohrdurchführung erfolgte ausschließlich durch den Behälterboden um die Wärmeverluste infolge von Wärmeleitung zu minimieren (siehe Abbildung 0-1).

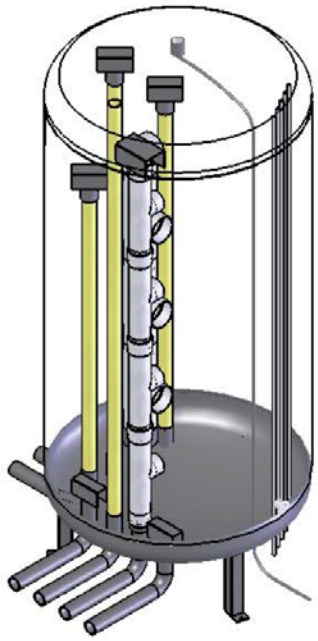

Abbildung 0-1: 3D-Ansicht der Laborversion des Thermoskannenspeichers

Anhand der durchgeführten Messungen an den Laborversionen konnte der theoretische Ansatz zur Berechnung der Wärmeleitfähigkeit der Vakuumdämmung bestätigt werden. Hinsichtlich der gemessenen thermischen Verluste des vakuumgedämmten, mit Schüttmaterial ausgestatteten Thermoskannenspeichers wurden geringfügige Abweichungen zu den theoretisch ermittelten Werten festgestellt. Ein Grund dafür ist, dass bei der Laborversion des Thermoskannenspeichers Schüttmaterial ohne IR-Trüber verwendet wurde, die durchgeführten Berechnungen aber mit IR-Trüber angestellt wurden. Daraus ergibt sich eine Verschlechterung der Wärmeleitfähigkeit von 0,003 auf 0,006 W/(m*K). Ein weiterer Grund für die Abweichungen liegt in der direkten Verbindung des Innen- und Außenmantels durch eine Schweißnaht welche zusätzliche Wärmeverluste durch Wärmeleitung verursacht. Um diese Verluste zu reduzieren wäre es erforderlich die gesamte Konstruktion des Speichers zu überdenken. Dabei sollte auch die Konstruktion des äußeren Speichermantels überdacht werden. Bezüglich dieser Thematik könnten neue, dünnere bzw. leichtere Materialien zum Einsatz kommen, um einerseits die Wärmeleitfähigkeit und andererseits das Gewicht des gesamten Thermoskannenspeichers zu minimieren.

Wie anhand von Thermographie-Aufnahmen ersichtlich wurde, konnte das Schüttmaterial aufgrund der schlechten Rieselfähigkeit nicht gleichmäßig im Vakuumspalt verteilt werden. Dies bewirke, dass an jenen Stellen des Vakuumspalts wo sich kein bzw. wenig Schüttmaterial befand eine verminderte Dämmwirkung gegeben war. Aus diesem Grund sollte in einem nächsten Projekt sowohl das verwendete als auch weitere alternative Schüttmaterialien intensiver untersucht bzw. weitere Recherchen in dieser Richtung angestellt werden. Entscheidend ist die Möglichkeit einer einfachen und vollständigen Einbringung. Grundsätzlich sind weitere Materialrecherchen und anschließende Tests

hinsichtlich Wärmeleitfähigkeit, Rieselfähigkeit, Stützwirkung und Einbringung von Schüttmaterialen zur Weiterentwicklung von Thermoskannenspeichern erforderlich. Diese Untersuchungen konnten aufgrund der Komplexität im gegenständlichen Projekt nicht durchgeführt werden, weshalb es als absolut notwendig erachtet wird, die angeführten Fragestellungen in einem bereits beantragten Folgeprojekt zu untersuchen.

Die Techno-ökonomische Bewertung zeigte, dass durch den Ersatz eines konventionellen Speichers durch einen Thermoskannenspeicher gleicher Größe, der solare Deckungsgrad steigt, bzw. bei gleichem solaren Deckungsgrad ein kleiner Thermoskannenspeicher eingesetzt werden kann. Für die ökonomischen Betrachtungen in diesen Fällen ist entscheidend ob die durch den höheren Solaren Deckungsgrad vermiedenen Brennstoffkosten die höheren Investitionskosten eines Thermoskannenspeichers ausgleichen können bzw. ob ein kleinerer Thermoskannenspeicher kostengünstiger als ein größerer konventioneller Speicher ist. Zusammenfassend wird festgestellt, dass bei Neuanlagen durch den Einsatz eines Thermoskannenspeichers anstelle eines konventionellen Speichers mit einer Reduktion der Investitionskosten zwischen 500 und 2.300 EURO zu rechnen ist.

Die Ergebnisse der ökologischen Bewertung zeigen, dass die Herstellung und Entsorgung eines Thermoskannenspeichers höhere Treibhausgasemissionen und einen höheren kumulierten Energieaufwand verursacht als ein Standard-PU-Speicher. Für einen 1.000 L Speicher sind die Treibhausgasemissionen des Thermoskannenspeichers ca. 75 % und der kumulierte Energieaufwand ca. 65 % höher. Der wesentliche Einflussfaktor ist der in etwa doppelt so hohe Stahlbedarf für die Doppelmantel-Konstruktion des Thermoskannenspeichers.

Bei der Untersuchung des gesamten Wärmebereitstellungssystems in das der thermische Speicher eingebunden ist, zeigte sich, dass die höheren Treibhausgasemissionen und der höhere kumulierte Energieaufwand des Thermoskannenspeichers durch die geringeren thermischen Verluste in der Betriebsphase kompensiert werden können.

Für alle untersuchten Systemvarianten (Variation von Speichervolumen, Solarkollektorfläche, Nachheizsystem) hat die Wärmebereitstellung mit einem Thermoskannenspeicher die gleichen oder niedrigere spezifische Treibhausgasemissionen (kg CO_2-Äq pro kWh $_{\text{Wärme aus dem Speicher}}$) als die Wärmebereitstellung mit einem Standard-PU-Speicher. Basiert die gesamte Wärmebereitstellung bereits vollständig auf erneuerbaren Energieträgern (Solaranlage in Kombination mit Pelletkessel) beträgt das Reduktionspotential für die Treibhausgasemissionen durch den Thermoskannenspeicher bis zu 6 % im Vergleich zu einem realen Standard-PU-Speicher. Basiert das Nachheizsystem auf fossilen Energieträgern (Gas- oder Ölkessel) liegt das Reduktionspotential für die Treibhausgasemissionen durch den Thermoskannenspeicher zwischen 5 % und 9 % im Vergleich zu einem realen Standard-PU-Speicher.

Beim kumulierten Energieaufwand kann durch den Thermoskannenspeicher, abhängig von Speichervolumen und Kollektorflächen, eine Einsparung zwischen 7 und 15 % erzielt werden.

Es wird empfohlen die während der Projektbearbeitung aufgetretenen Fragen näher zu untersuchen und die Entwicklung eines Prototypen anzustreben. In weiterer Folge sollte die Markteinführung eines vakuumgedämmten Wärmespeichers erfolgen.

Summary

Starting point/motivation

Thermal energy storages are an important technology for the use of renewable energy carriers and for increasing energy efficiency by balancing peak load and demand. An increased energy efficiency of thermal storages leads to an increased total energy efficiency of renewable energy systems, in which heat is stored. The current state of technology for the heat supply of single- and multi-family homes are thermal hot water storages (hot water storage tanks 300 to 500 L, buffer tanks 800 to 1000 L) with 5 to 10 cm thick heat insulation layer (usually rigid or flexible foam). These systems have comparable high heat losses due to a low insulation thickness, the design of pipe penetrations, fitting accuracy of insulation elements and thermal circulation effects in the pipe connections at the storage. A possible solution is to implement storages with better insulations, like vacuum insulations. For these storages heat losses are significant lower, because heat losses mainly occur due to thermal radiation (like in a thermos flask). Another improvement is the design of the pipe connections with so called circulation breaks. Today such storage systems are not available on the market. To reach higher energy efficiencies there is a necessity to develop such storage system as fast as possible.

Content and goal

The goal of the project was to develop knowledge for the construction of a thermal water storage tank with vacuum insulation (thermos flask storage), which is optimized in terms of efficiency, costs, capacity and integration into building technology. A lab version of the thermos flask storage was build. With this lab version measurements were performed to analyze thermal losses.

Sub-goals of the project were:

- Compiling of market relevant vacuum insulation system as a basis for the planning and design of a lab version
- Selection, planning and design layout of a lab version of a thermos flask storage
- Building of a lab version of the thermos flask storage, which is suitable for test runs
- Conduction tests and measurements to evaluate the technical characteristics of a thermos flask storage and to provide suggestions for an optimized design
- Evaluation of the technical and economic feasibility of prototypes with storage volumes from 800 to 3.000 L based on the test results
- Environmental assessment of the thermos flask storage using life-cycle-assessment (LCA)

The work was structured in 6 work packages:

- AP 1: Basic theoretical preliminary studies
- AP 2: Planning and design of a lab version of a thermos flask storage

- AP 3: Building of the lab version of a thermos flask storage
- AP 4: Measurements and tests at the lab version to assess the technical properties
- AP 5: Techno-economic and environmental assessment
- AP 6: Project coordination

Results and Conclusions

The results of the theoretical preliminary studies showed that a low-cost production of a thermos flask storage is possible. A long term stability of the vacuum at 1 mbar using a double-layer steel construction can be expected. The easiest and cheapest construction version to avoid thermal radiation losses was the filling of the vacuum gap with filling material (HDK T30 or HDK N20). With simulation important findings were gained concerning the use of filling material in vacuum insulated storages. The simulation results showed that due to thinner insulation the vacuum storage requires less space and that higher shares of solar contribution can be reached using the same solar panel area compared to conventional storage systems with flexible foam insulation.

To be able to compare the results from measurements and test of the thermos flask storage with other storage types the measurements and tests were performed at three storage tanks, which had the same volume and where positioned next to each other. The thermos flask storage was compared to a storage insulated with flexible foam and a storage insulated with vacuum insulation elements. For all storage systems a special layer charge unit was constructed. The pipes were connected at the floor of the tank to minimize heat losses from thermal conduction (Figure 0-1).

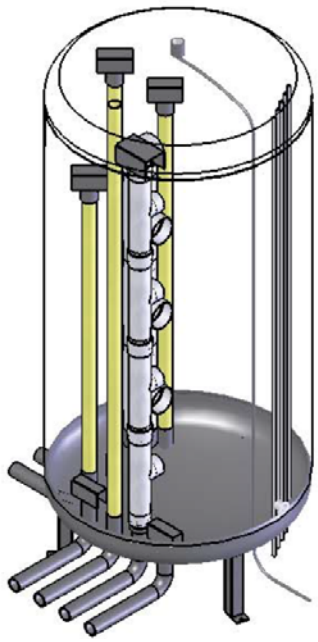

Figure 0-1: 3D-view of the lab version of the thermos flask storage

The measurements at the lab version confirmed the theoretical approach for calculation of the thermal conductivity of the vacuum insulation. For the measured thermal losses of the

thermos flask storage minor deviations compared to the theoretical calculated values were found. One explanation is that the lab version of the thermos flask storage had filling material without IR absorbers, whereas the calculations were performed for filling material with IR absorbers. Without IR absorbers the heat conductivity is decreased from 0.003 to 0.006 W/(m*K). Another reason for the deviation between measured and calculated values is the direct connection of the inner casing and the outer storage casing with a welding seam, which causes additional heat losses by thermal conduction. To reduce these losses the whole construction layout needs to be rearranged, with a focus on the outer casing. Thinner and lighter materials could be used to decrease the thermal conductivity and to decrease the weight of the storage.

Thermography showed that the filling material was not distributed evenly in the vacuum gap caused by bad flow ability of the material. This caused a lower insulation effect at spots with no or a low amount of filling material. Therefore the used as well as other filling materials should be further investigated. Essential is the suitability for easy and complete filling of the vacuum gap. Further material research and tests regarding thermal conductivity, flow ability, supporting effect and filling are necessary for further development of the thermos flask storage. Due to their complexity this investigations could not be carried out in this project. Therefore it is necessary to investigate these issues in a follow-up project.

The techno-economic assessment showed, that by replacing a conventional storage with a thermos flask storage of the same size the solar contribution increased or a smaller thermos flask storage could be used keeping the solar contribution constant. For the economic assessment it is critical if the avoided fuel costs due to a higher share of solar contribution are in the same range as the higher investment costs of thermos flask storage or if the smaller thermos flask storage is cheaper compared to larger conventional storage. For new plants investment costs can by reduced by 500 to 2.300 EUR using a thermos flask storage instead of a conventional storage.

The results of the environmental assessment showed for the construction and disposal of a thermos flask storage higher greenhouse gas (GHG) emissions and a higher cumulated primary energy demand compared to a conventional storage tank with PU-foam insulation. The GHG emissions of construction and disposal of a 1,000 L vacuum storage are approximately 75 % and the cumulated primary energy demand approximately 65 % higher. This is caused by the steel demand of the thermos flask storage (double casing construction), which is approximately twice as high as the steel demand of a conventional storage. The assessment of the total heating system including the thermal storage showed, that the higher GHG emissions and cumulated primary energy demand due to construction and disposal are compensated in the operation phase. For all investigated systems (variation of volume, solar panel area, complementary heating system) heat supply with a thermos flask storage had the same or lower specific GHG emissions (kg CO_2-eq per kWh $_{\text{heat output from the storage}}$) as the heat supply with a conventional storage. Is the total heat supply based on renewable energy carriers (solar panel in combination with a pellet boiler) the LCA showed a

potential to reduce GHG emissions up to 6 % using a thermos flask storage. Is the complementary heating system based on fossil energy carriers (natural gas or oil boiler) the thermos flask storage has GHG emission mitigation potential between 5 % and 9 % compared to a conventional storage. For the cumulated primary energy demand using the thermos flask a reduction of 7 % to 15 % can be reached.

It is recommended investigating further the described questions which occurred during the project to seek the development of a prototype. Subsequently market introduction of a vacuum insulated storage tank should take place.

1 Einleitung

1.1 Aufgabenstellung

Thermische Energiespeicher sind eine wichtige Technologie für den Einsatz erneuerbarer Energieträger und zur Erhöhung der Energieeffizienz beim Ausgleich von Last- und bzw. oder Bedarfsspitzen. Durch eine Steigerung der Energieeffizienz thermischer Speicher erhöht sich auch die Energieeffizienz aller Umsetzungsverfahren mit erneuerbaren Energieträgern, bei denen Wärme gespeichert wird.

Derzeit stellen thermische Wasserspeicher, also Warmwasserspeicher (300 bis 500 L), Pufferspeicher (800 bis 1.000 L) und Größere Pufferspeicher (1.500 bis 3.000 L) mit 5 cm bis 10 cm Wärmedämmung (üblicherweise Hart- und Weichschaumdämmung) den Standard bei der Speichertechnik zur Wärmeversorgung von Ein- und Mehrfamilienhäusern dar. Diese weisen aber derzeit aufgrund der geringen Dämmstärke und aufgrund der Ausführung der Rohrdurchführungen, der begrenzten Passgenauigkeit der Dämmelemente (Kaminlüftungsspalte) und thermischer Zirkulations-Effekte in den Rohranschlüssen am Speicher relativ hohe Wärmeverluste auf, was die Energieeffizienz des Gesamtsystems erheblich verringert.

Eine Verbesserungsmöglichkeit stellen Speicher mit Vakuumdämmung dar, bei welchen die Wärmeverluste erheblich geringer sind, da sie im Wesentlichen nur aufgrund von Wärmestrahlung wie z. B. bei einer Thermoskanne erfolgen. Auch im Bereich der Rohranschlüsse und daraus resultierend im Schichtungsverhalten, sind Verbesserungen möglich, zum Beispiel durch angepasste Ausgestaltung von Ein- und Ausströmöffnungen und den Einsatz von so genannten Leit- und Lenkblechen.

Solche Speicher sind derzeit nicht am Markt verfügbar und auch konkrete Entwicklungsarbeiten hierzu sind derzeit nicht bekannt.

Im Sinne der Bestrebungen um größtmögliche Energieeffizienz besteht daher die Notwendigkeit, derartige Thermoskannenspeicher so rasch wie möglich zu entwickeln.

1.2 Schwerpunkte des Projektes

Das gegenständliche Projekt beschäftigte sich mit der Entwicklung eines marktfähigen Speichers mit Vakuumdämmung und konstruktionsbedingter Zirkulationsbremsen an den Rohrdurchführungen, welcher hinsichtlich Effizienz, Kosten, Kapazität und der Integrierbarkeit in die Gebäudetechnik bzw. Gebäude optimiert ist („Thermoskannenspeicher“). Dazu wurde eine Laborversion eines Thermoskannenspeichers geplant und gebaut. Anschließend wurden Messungen und Tests zur Bewertung der technischen Eigenschaften durchgeführt. Abschließend erfolgte eine techno-ökonomische und ökologische Bewertung hinsichtlich des Einsatzes derartiger Speicher.

1.3 Einordnung in das Programm

Das Projekt wurde aus Mitteln des Klima- und Energiefonds gefördert und im Rahmen der 3. Ausschreibung des Programms „NEUE ENERGIEN 2020“ durchgeführt. Die Einordnung in das Programm erfolgte unter dem Themenpunkt 3.2.2 „Thermische Speicher“.

1.4 Verwendete Methoden

Basierend auf vorhandenem Wissen und Erfahrungen der Projektpartner wurden Lösungswege für die gegenständlichen Fragestellungen erarbeitet.

Zur schrittweisen Erreichung der Projektziele wurden sechs Arbeitspakete definiert:

- AP 1: Grundlegende theoretische Voruntersuchungen
- AP 2: Planung und Auslegung einer Laborversion eines Thermoskannenspeichers
- AP 3: Bau eines Thermoskannenspeichers als Laborversion
- AP 4: Messungen und Tests an der Laborversion zur Beurteilung der technischen Eigenschaften
- AP 5 Techno-ökonomische und ökologische Bewertung
- AP 6: Projektkoordination

In Folge werden die angewandten Lösungsansätze bzw. Methoden im Detail beschrieben.

1.4.1 Grundlegende theoretische Voruntersuchungen

Die grundlegenden theoretischen Voruntersuchungen wurden nach folgender Systematik durchgeführt:

1. Recherche zu Vakuumdämmung, Vakuumtechnik, Speichertechnik und die Einbindung in Gesamtsysteme.
   Untersucht wurden dazu:
   - Dämmsysteme basierend auf Vakuumtechnik
   - Dämmmaterialien welche für den Einsatz im Vakuum geeignet sind und Strahlungsschilder für die Verwendung im Vakuum
   - Speichervolumina von in der Praxis eingesetzten Speichern bzw. deren Geometrien (Breite/Höhenverhältnis, Kippmaß)
   - Anforderungen an den Speicher in Bezug auf Rohrdurchführungen hinsichtlich der Integration in hydraulische Schaltungen, insbesondere bei solaren Kombisystemen, Biomasse- und Wärmepumpenheizungen
2. Definition von Systemvarianten
   In diesem Schritt wurden 11 marktrelevante Vakuumdämm-Varianten betrachtet und für ausgewählte Varianten Systemsimulationen durchgeführt.

3. Ermittlung und Zusammenstellung der
   - Materialien und Werkstoffe für Außenmantel, Innenmantel, Durchführungen Dämmung, Strahlungsschilder etc.,
   - Mengen der oben angeführten Materialien und
   - Herstellungskosten

   für die einzelnen Systemvarianten.
4. Tabellarische Darstellung der Systemvarianten und Bewertung der relevanten Systemvarianten bezüglich
   - Qualität
     - Wärmeverluste [W/(m²*K)],
     - Langzeitstabilität des Vakuums (und Strahlungsschildkonstruktion)
     - Langzeitstabilität der eingesetzten Werkstoffe
   - Fertigungstechnik
   - Herstellungsosten
   - Marktchancen

Die Methodik zu der Berechnung der Wärmeleitfähigkeit im Vakuum ist im Anhang Kapitel 6.1 und zu den Systemsimulationen im Anhang Kapitel 6.2 detailliert beschrieben.

1.4.2 Planung und Auslegung einer Laborversion eines Thermoskannenspeichers

Um eine zukünftige wirtschaftliche Verwertung durch den Unternehmenspartner gewährleisten zu können, waren folgende Gesichtspunkte für die Planung und Auslegung zu beachten:

- Materialien (Hauptkriterien: Preis, Fertigungstechnik)
- Konstruktion (Hauptkriterien: Preis, Fertigungstechnik)
- Hydraulik Einbindung in ein Gesamtsystem
- Fertigungstechnik

Folgende Vorgangsweise wurde gewählt:

- Dimensionierung des Innenbehälters (Variationsrechnungen zur Bestimmung des Einflusses der Speichergeometrien - Breiten/Höhenverhältnis - auf die Wärmeverluste, Bestimmung des Speicherinhalts für die Laborversion)
- Dimensionierung der Vakuumdämmung (Breite des Vakuumspaltes, Druckbereich des Vakuums, Dämmmaterialien)
- Dimensionierung des Außenbehälters

- Konstruktion der Durchführungen (Bestimmung der Hydraulikanschlüsse basierend auf einer Integration in Modellhydraulikkonzepte, insbesondere für solare Kombisysteme, Biomasse- und Wärmepumpenheizungen, etc.)
  Finale Konstruktion und Überleitung zur Fertigung

1.4.3 Bau einer Laborversion eines Thermoskannenspeichers

Der Bau des Thermoskannenspeichers basierte auf den vorangegangenen Ergebnissen.

Es wurde folgende Vorgangsweise angewandt:

1. Herstellung des Thermoskannenspeichers bei der Fa. Pink
2. Lieferung an JOANNEUM RESEARCH
3. Herstellung der Vakuumdämmung im Technikum von JOANNEUM RESEARCH
    a. Evakuierung des Vakuumspaltes zum Test der Dichtigkeit,
    b. Befüllung des Vakuumspaltes mit Dämmmaterial,
    c. Evakuierung des befüllten Vakuumspaltes und
    d. Tests zur Vakuumstabilität
4. Lieferung an AEE INTEC
5. Herstellung des Vakuums im Thermoskannenspeicher durch JOANNEUM RESEARCH am Versuchsstand von AEE INTEC

Als Referenzspeicher wurde ein Speicher mit einer Weichschaumdämmung und ein Speicher mit einer speziell gefertigten Vakuumdämmung (Vakuumpaneele - VIP`s der Fa. va-Q-tec AG) verwendet.

1.4.4 Messungen und Tests

Die Messungen bezogen sich im Wesentlichen auf die Bestimmung der Wärmeverluste der Speicher. Diese erfolgten in Anlehnung an ÖNORM EN 12977 Teil 3 und 4. In dieser Norm ist festgehalten, dass die Speicher vor dem Beladevorgang auf 20 °C konditioniert werden müssen und anschließend mit einer Temperatur von 60 °C beladen werden. Nach erfolgter Beladung können die Speicher einerseits gleich wieder mit einer Temperatur von 20 °C entladen oder andererseits das Auskühlverhalten des Speichers ermittelt werden. Die in der ÖNORM EN 12977 vorgegebene Beladetemperatur wurde bei den vorliegenden Speichertest erhöht, um den realen Einsatz dieser Testspeicher als Pufferspeicher abzubilden. Hierfür wurden Beladungsvorgänge mit einer Temperatur von über 70 °C durchgeführt.

1.4.5 Techno-ökonomische und ökologische Bewertung

Es wurde eine techno-ökonomische Bewertung des Thermoskannenspeichers und eine ökologische Bewertung im Vergleich zu herkömmlichen Speichersystemen durchgeführt.

1.4.5.1 Techno-ökonomische Bewertung

Die ökonomische Bewertung erfolgte auf Basis der bei AEE INTEC durchgeführten Simulationsrechnungen (siehe Kapitel 6.2) und von den Projektpartnern angegebenen Investitionskosten für Speicher und Kollektoren. Die Betrachtungen sind auf eine neu zu errichtende Solaranlage auf einem Passivhaus (PH) bzw. Niedrigenergiehaus (NEH) ausgerichtet. Zur ökonomischen Bewertung werden die durch geringere erforderliche Kollektorflächen, vermiedenen und die durch den teureren Thermoskannenspeicher (ThermosTank) erhöhten Kosten gegenübergestellt.

1.4.5.2 Ökologische Bewertung

Zur Bestimmung des Einflusses des Thermoskannenspeichers im Vergleich zu herkömmlichen thermischen Energiespeichern hinsichtlich der Treibhausgasemissionen und des Energiebedarfes wird eine ökologische Bewertung durchgeführt. Die ökologische Bewertung wird in Anlehnung an die Methode der Lebenszyklusanalyse – auch als Ökobilanz bezeichnet – erstellt.

Laut EN ISO 14040:2006 „Umweltmanagement Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen“ bezieht sich eine Ökobilanz auf die Umweltaspekte und Umweltwirkungen (z.B. Nutzung von Ressourcen und die Umweltauswirkungen von Emissionen) im Laufe des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung (d.h. „von der Wiege bis zur Bahre“).

In der ökologischen Bewertung der thermischen Energiespeicher werden die in Abbildung 1-1 dargestellten Systemelemente berücksichtigt:

- Thermischer Energiespeicher
  - Herstellungsaufwand der Materialen, die im Wärmespeicher verbaut sind und Energieaufwand für die Fertigung des Speichers
  - Thermische Verluste, die beim Betrieb des Wärmespeichers auftreten
- Bereitstellung der Wärmeenergie, die gespeichert wird.

Die funktionelle Einheit der ökologischen Bewertung für den Vergleich der Energiespeichertechnologien sind Treibhausgas-Emissionen und Energiebedarf bezogen auf die nutzbare Wärmeenergie aus dem Speicher, z.B.:

- kg CO_2-Äq./MWh $_{\text{Wärme aus Speicher}}$
- kWh $_{\text{kumulierter Energieaufwand}}$/MWh $_{\text{Wärme aus Speicher}}$

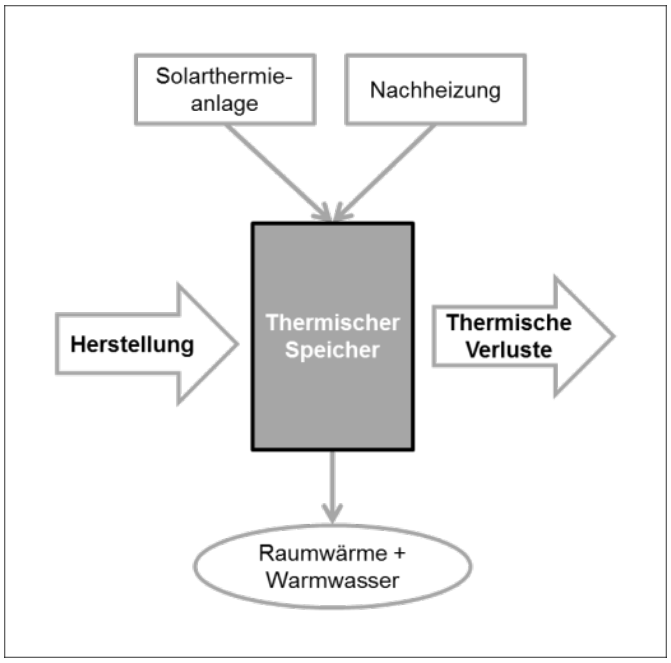

Abbildung 1-1: Systemelement der ökologischen Bewertung

In der ökologischen Bewertung für Thermische Speicher werden folgende Umweltwirkungen betrachtet:

Treibhausgasemissionen

Es werden die Treibhausgase Kohlendioxid (CO_2), Methan (CH_4) und Distickstoffmonoxid/Lachgas (N_2O) untersucht. Als Maß für die Treibhauswirkung dieser Gase wird das Treibhausgaspotential für den Zeitraum von 100 Jahren verwendet (GWP 100 - Global Warming Potential 100) Dafür werden folgende Äquivalenzfaktoren angewandt, mit denen die Treibhauswirkung eines Kilogramms CH_4 bzw. N_2O in die äquivalente CO_2-Menge umgerechnet wird (IPCC, 2007):

- 1 kg CO_2 = 1 kg CO_2-Äq.
- 1 kg CH_4 = 25 kg CO_2-Äq.
- 1 kg N_2O = 298 kg CO_2-Äq.

Die Treibhausgasemissionen werden unterteilt in die Anteile für die

- Herstellung des thermischen Speichers („Herstellung Pufferspeicher“)
- Bereitstellung der gespeicherten Wärme durch eine thermische Solaranlage („Wärmebereitstellung Solar“)
- Bereitstellung der gespeicherten Wärme durch ein Nachheizungssystem („Nachheizung“)

Kumulierter Energieaufwand

Der kumulierte Energieaufwand umfasst alle Energieeinsätze, die mit dem Bezug von Wärme aus den thermischen Energiespeichern verbunden sind. Der kumulierte Energieaufwand wird differenziert in

- fossile Energieträger (Rohöl, Steinkohle, Braunkohle, Erdgas, Kohleminengas, Torf)
- erneuerbare Energieträger (Sonne, Wind, Biomasse, Wasser)
- sonstige Energieträger (Kernkraft, Biomasse aus Urwald)

ausgewiesen.

Für fossile Energieträger und Biomasse wird der obere Heizwert zur Bestimmung des kumulierten Energieaufwand herangezogen (Hischier et al., 2010).

1.5 Aufbau der Arbeit

Die Arbeiten gliedern sich in folgende sechs Arbeitspakete (AP):

- AP 1: Grundlegende theoretische Voruntersuchungen
- AP 2: Planung und Auslegung einer Laborversion eines Thermoskannenspeichers
- AP 3: Bau eines Thermoskannenspeichers als Laborversion
- AP 4: Messungen und Tests an der Laborversion zur Beurteilung der technischen Eigenschaften
- AP 5 Techno-ökonomische und ökologische Bewertung
- AP 6: Projektkoordination

2 Inhaltliche Darstellung

In diesem Kapitel werden die Inhalte der Arbeiten dargestellt. Die angewandten Methoden sind in Kapitel 1.4 detailliert dargestellt.

2.1 Grundlegende theoretische Voruntersuchungen

Im Rahmen der theoretischen Voruntersuchungen wurden Recherchen und Vorüberlegungen zu den Themengebieten der Vakuumdämmung, Vakuumtechnik, Speichertechnik sowie der Einbindung in Gesamtsysteme durchgeführt.

Die Literaturrecherche ergab, dass in Österreich die Firma Waukmann einen vakuumgedämmten Pufferspeicher anbietet (siehe Abbildung 2-1). Der Homepage ist zu entnehmen, dass dieser bereits zum Patent angemeldet wurde. Die Firma Waukmann ist mittlerweile aufgelöst worden und in Liquidation getreten. Der Status des angemeldeten Patents konnte noch nicht gänzlich geklärt werden.

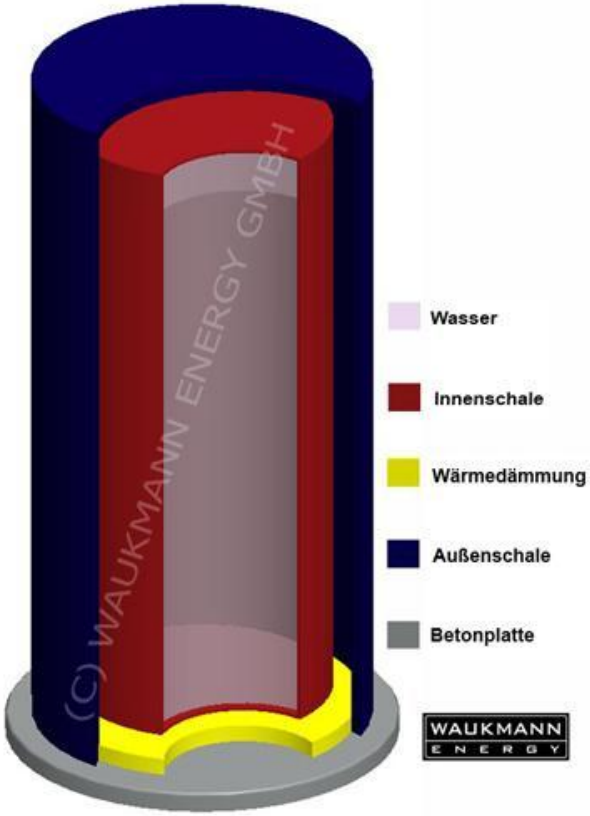

Abbildung 2-1: Schema Vakuumpufferspeicher der Firma Waukmann (Waukmann, 2010)

Des Weiteren gibt es in Deutschland zwei Anbieter von vakuumgedämmten Pufferspeichern (Firma Hummelsberger und Firma KBW Klaus Berndlmaier Wärmespeicher). Laut Auskunft der Firma Hummelsberger wird dessen Pufferspeicher (siehe Abbildung 2-2) mit einem Druckniveau von 0,05 – 0,10 mbar und einer mikroporösen Pulverdämmung, zwischen Innen- und Außenmantel, gefertigt. Dies ermöglicht eine Reduktion der Wärmeleitung (λ) um den Faktor 10 gegenüber herkömmlichen Wärmedämmungen und entspricht einem Wert von 0,004 W/(m*K). Die Firma Hummelsberger führt in Kooperation mit dem ZAE Bayern erste Wärmeverlustmessungen an einem Prototyp durch.

Abbildung 2-2: Schema Vakuumpufferspeicher der Firma Hummelsberger (Hummelsberger, 2010)

Beim Produkt der Firma KBW handelt es sich um einen Doppelmantelspeicher (siehe Abbildung 2-3), bei dem der innere Behälter wie gewöhnlich als Speicher für das Medium genutzt wird und der Luftraum zwischen dem äußeren und inneren Mantel evakuiert wird.

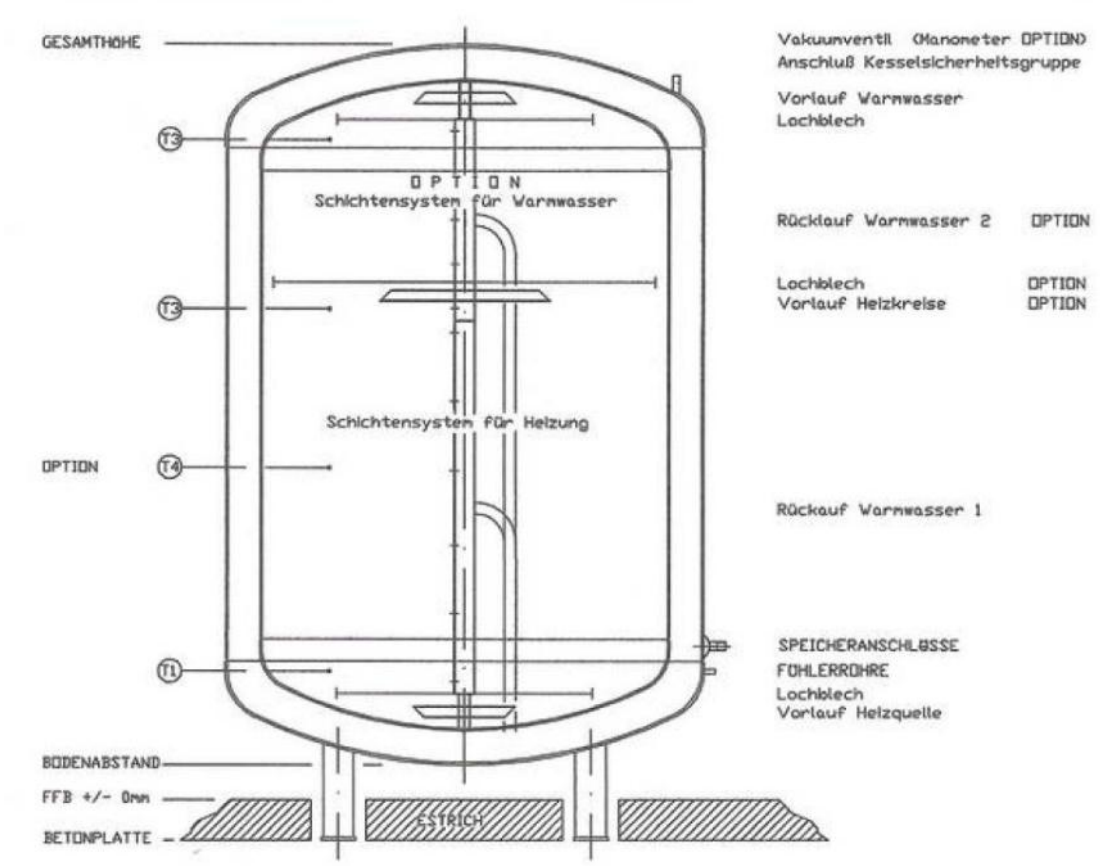

Abbildung 2-3: Schema Vakuumpufferspeicher der Firma KBW (KBW, 2010)

Eine Patentrecherche im Bereich von vakuumisolierten Wärmespeichern ergab, dass es in Deutschland unterschiedliche Bestrebungen im Bereich von vakuumgedämmten Wärmespeichern gibt. Des Weiteren wurden auch Patente für vakuumgedämmte Flüssiggasspeicher gefunden.

Im Rahmen der Voruntersuchungen wurde sowohl die Verwendung von Strahlungsfolien bzw. Schüttmaterialien als auch von geeigneten Materialien und geeigneten Druckniveaus (~10^3 – 10^{-4} mbar) untersucht.

Zuerst wurde der Einfluss des Abstandes zwischen Innen- und Außenmantel (Spaltbreite) des Speichers auf freie Konvektion zu untersucht. Die Berechnungen wurden für unterschiedliche Drücke und Spaltbreiten durchgeführt (Duffie & Beckmann, 2006). Durch diese Voruntersuchungen war es möglich, entsprechende statische Berechnungsmodelle zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit im Spalt zu entwickeln. Hierbei wurden unterschiedliche Ausführungen des evakuierten Spaltes hinsichtlich des Einsatzes von Strahlungsfolien bzw. geeigneter Schüttmaterialien untersucht.

Die thermischen Eigenschaften im Vakuum werden vom Strahlungsaustausch zwischen den umgebenden Flächen, der Festkörperwärmeleitung und der Gaskonvektion bestimmt (VDI

Wärmeatlas, 1994). Letztere hängt wesentlich von der mittleren freien Weglänge der eingeschlossenen Gasmoleküle ab. Die mittlere freie Weglänge gibt den durchschnittlichen Weg an, welchen ein Molekül ohne Wechselwirkung (Zusammenstoß bzw. Energieaustausch) mit anderen Molekülen zurücklegen kann. Je größer dieser Wert ist, desto geringer die vorhandenen Lufteinschlüsse und desto geringer die Gaskonvektion.

Für sämtliche Berechnungen wurden folgende Randbedingungen festgelegt:

- Speichertemperatur T_{innen}: 80 °C
- Raumtemperatur T_{amb}: 20 °C
- Emissionskoeffizienten Innen- und Außenbehälter ε_{innen}, ε_{aussen} jeweils 0,1

Bei der Verwendung von Strahlungsfolien wurde die Auswirkung unterschiedlicher Emissionskoeffizienten auf die thermischen Verluste detailliert betrachtet. Verwendet man beispielsweise Folien mit einem Emissionskoeffizienten von 0,05 verringern sich die thermischen Verluste im Vergleich zu Folien mit einem Emissionskoeffizienten von 0,30 um ein Vielfaches. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Tatsache, dass nicht das Emissionsverhalten der Behälteroberflächen (Innen- und Außenmantel) entscheidend ist sondern, dass die thermischen Verluste im Wesentlichen vom Emissionsverhalten der Strahlungsfolien bestimmt werden. Bei den weiteren Berechnungen wurden deshalb Folien mit einem Emissionskoeffizienten von 0,05 verwendet.

Anschließend wurden verschiedene Schüttmaterialien und deren thermische Eigenschaften untersucht. Hierbei wird zwischen opaken und transparenten Materialien unterschieden. Während bei transparenten Materialien, wie beispielsweise Silikagel, der Strahlungsanteil eine entscheidende Einflussgröße darstellt, wirkt sich dieser bei der Verwendung von opaken Materialien, wie z.B. Perlit, nicht als maßgeblicher Faktor auf die thermischen Verluste aus.

In Abbildung 2-4 ist das thermische Verhalten im Spalt unter Einsatz von Strahlungsfolien bzw. eines opaken Schüttmaterials dargestellt. Der betrachtete Druckbereich im Spalt liegt zwischen 10^{-4} und 10^{3} mbar womit man einen geeigneten Einsatzbereich der Materialien erhält.

Es ist festzustellen, dass sich bei der Verwendung von Strahlungsfolien erst bei sehr geringen Drücken (< 0,1 mbar) signifikante Verringerungen der Wärmeleitfähigkeit ergeben. Werden keine Strahlungsfolien verwendet, ist ein λ-Wert unter 0,016 W/(m*K) aufgrund des Strahlungsaustausches nicht zu erreichen (z. B. beträgt der λ-Wert einer Weichschaumdämmung 0,030 W/(m*K). Erst durch das Hinzufügen von Strahlungsfolien zur Unterbindung des Strahlungsaustausches ist ein signifikanter Rückgang der Wärmeleitfähigkeit festzustellen. Des Weiteren wird durch den Einsatz von Strahlungsfolien auch die Gaskonvektion der Moleküle unterbunden. Bei einem Druck von 10^{-3} mbar und der Verwendung von vier Folien ist es möglich einen λ-Wert von rund 0,003 W/(m*K) zu erreichen. Dies entspricht im Vergleich zu einer herkömmlichen Weich- bzw. Hartschaumdämmung einer Reduktion der Wärmeverlustleistung um den Faktor 10.

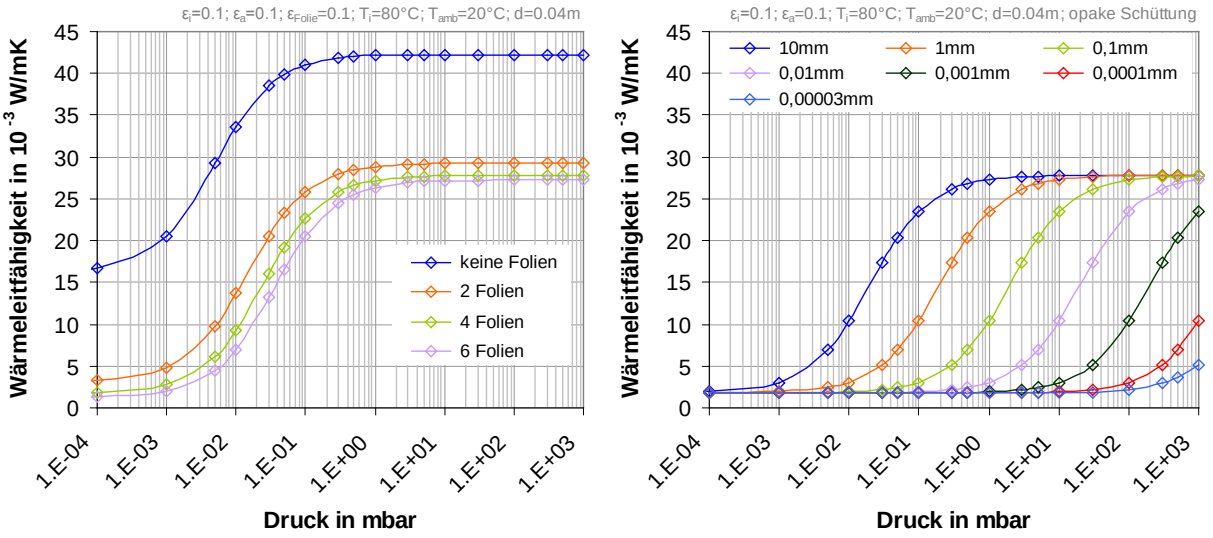

Abbildung 2-4: *Wärmeleitfähigkeit im Spalt unter Verwendung von Strahlungsfolien (links) und eines opaken Schüttmaterials (rechts) (siehe auch Simmler et al., 2005)*

Betrachtet man die Wärmeleitfähigkeit bei Verwendung eines opaken Schüttmaterials, wird deutlich, dass mit kleiner werdendem Porendurchmesser diese erheblich reduziert werden kann. Im Vergleich zum Einsatz von Strahlungsfolien kann in Abhängigkeit des Porendurchmessers bereits bei einem Druck von 10 mbar eine Wärmeleitfähigkeit von 0,003 W/(m*K) erzielt werden. Dies entspricht einem Druckunterschied von 10^4 mbar.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde entschieden die weiteren Berechnungen und Recherchen auf den Einsatz von opaken Schüttmaterialien zu konzentrieren. Im nächsten Schritt wurden Recherchen zu verfügbaren Schüttmaterialien durchgeführt. Im Rahmen dieser Recherche wurden Produkte der Firmen Wacker Chemie AG und KNAUF Perlite gefunden. Letztere waren jedoch nur mit Porendurchmessern von 1 bis 5 mm verfügbar und somit nicht geeignet. Die Firma Wacker Chemie AG produziert ein Schüttmaterial mit der Bezeichnung „HDK T30“ mit einem Porendurchmesser von rund 20 nm und einer Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von λ_{FK}=0,51 mW/(m*K) bei einer Dichte von 160 kg/m³ bzw. einer Festkörper-Wärmeleitfähigkeit von λ_{FK}=0,69 mW/(m*K) bei einer Dichte von 200 kg/m³ (siehe Abbildung 2-5).

Abbildung 2-5: Opakes Schüttmaterial HDK T30 der Firma Wacker Chemie AG

Die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit eines Speichers mit Vakuumdämmung ermöglicht die Durchführung von Jahressimulationen. Damit konnten einerseits die jährlichen Speicherverluste und andererseits bei Verwendung eines Solarsystems Änderungen im solaren Deckungsgrad untersucht werden. Für die durchgeführten Systemsimulationen wurde die Software Polysun (2010) verwendet, wobei mit einem λ-Wert von 0,003 W/(m*K) gerechnet wurde.

Um die jährlichen Speicherverluste zu simulieren und die Auswirkungen der unterschiedlichen Isolationsmaterialien vergleichen zu können wurde ein Referenzsystem definiert. Das Referenzsystem ist ein Einfamilienhaus mit einem jährlichen Energiebedarf von rund 11.300 kWh (für Warmwasser und Heizung). Die Wärmebereitstellung für die Warmwasserbereitung und eine teilsolare Raumheizung erfolgt mit einer Solaranlage mit einer Kollektorfläche von 20 m² und einem Pufferspeicher (inklusive Schichtladeeinheit) mit einem Nennvolumen von 1.000 L. Verbraucherseitig wird über ein Niedertemperaturheizsystem die benötigte Wärme an das Gebäude abgegeben. Die Erwärmung des Brauchwarmwassers erfolgt über ein Frischwassermodul.

Auf Basis dieses Referenzsystems wurde einerseits die Dämmstärke des Speichers und andererseits die Kollektorfläche bzw. das Nennvolumen des Pufferspeichers variiert.

Die bei einer Simulation ermittelten Speicherverluste stellen immer einen idealisierten Fall dar, welcher bei realen Anlagen aufgrund der nicht optimal ausgeführten Dämmung bzw. Vernachlässigung der Dämmung bei hydraulischen Anschlüssen, in der Praxis nicht erreicht werden kann. Aus diesem Grund wurde mit Korrekturfaktoren gerechnet um simulierte (ideale) Speicherverluste auf reale Verhältnisse zu übertragen (Heimrath, 2004). Betrachtet man beispielsweise einen realen Pufferspeicher mit einem Nennvolumen von 1.000 L, sind dessen thermische Verluste im Vergleich zum simulierten idealen Speicher um etwa 70 % höher.

Betrachtet man die Wärmeverluste bei einer Dämmstärke von 100 mm sind zwischen simulierten und realen Werten enorme Unterschiede zu erkennen. Diese sind bei realen

Anlagen im Wesentlichen auf die schlechte Dämmung der hydraulischen Anschlüsse und die nicht exakt am Speichermantel anliegende Dämmung zurückzuführen.

Anschließend wurden die unterschiedlichen Dämmqualitäten und -materialien (real, ideal und Vakuum) in das Referenzsystem integriert und hinsichtlich der Auswirkung auf den jährlichen solaren Deckungsgrad untersucht.

Es zeigt sich, dass der solare Deckungsgrad durch den Einsatz von Vakuumdämmung im Vergleich zu real gedämmten Speichern erheblich erhöht werden kann.

Aufbauend auf den durchgeführten Recherchen und Analysen wurden 4 marktrelevante Vakuumdämmvarianten ausgewählt und deren Materialien, Mengen und Kosten ermittelt. Diese wurden hinsichtlich folgender Kriterien:

- Qualität (z.B. Wärmeverluste)
- Fertigungstechnik,
- Kosten,
- und Marktchancen

bewertet.

In Tabelle 2-1 sind für 11 Varianten und zwei verschiedenen Drücke die gesamte Wärmeleifähigkeit sowie die Wärmeverluste dargestellt.

Tabelle 2-1: Wärmeleitfähigkeit und Wärmeverluste für verschiedene Drücke und Vakuumdämmvarianten

Thermoskannenspeicher		Druck	ges. Wärme-leitfähigkeit	Wärmeverluste	
Var.	**Bezeichnung**	**mbar**	**W / m*K**	**W/m²K**	**W/m²**
1	ohne Layer	10	0.0341	1.70	102.3
2	2 Layer	10	0.0275	1.38	82.6
3	4 Layer	10	0.0268	1.34	80.3
4	6 Layer	10	0.0264	1.32	79.3
5	ohne Layer	0.001	0.0105	0.52	31.5
6	2 Layer	0.001	0.0024	0.12	7.3
7	4 Layer	0.001	0.0014	0.07	4.2
8	6 Layer	0.001	0.0010	0.05	2.9
9	transparentes Füllmaterial (Lit.)	10	0.0049	0.25	14.7
10	opakes Füllmaterial (Lit.)	10	0.0024	0.12	7.3
11	Füllmaterial HDK T30	10	0.0027	0.14	8.2

Langzeitstabilität Vakuum

Aufgrund der bisherigen Erfahrungen im Bereich der Vakuumtechnik und Untersuchungen im Projekt zeigte sich, dass bei einem Vakuum von rund 1 mbar und der Verwendung und

Fertigung der eingesetzten Materialen eine praxistaugliche Langzeitstabilität des Vakuums erwartet werden kann.

Fertigungstechnik

Die Fertigungstechnik ist bei allen Varianten grundsätzlich ähnlich zu bewerten. Die Einbringung des Füllmaterials kann mit einem Rüttler erfolgen. Die Evakuierung erfolgt über eine herkömmliche Vakuumpumpe.

Marktchancen

Die Marktchancen der einzelnen Varianten sind aufgrund der Einsparung von Kollektorfläche im Vergleich zu herkömmlichen Pufferspeichern als gut einzustufen.

Kosten

Für das Füllmaterial Kieselsäure HDK T30 oder HDK N20 ergeben sich zusätzliche Materialkosten zu einem Standard Pufferspeicher der Fa. Pink in der Höhe von ca. 190 EURO exkl. Außenhülle. Die Gesamtkosten sind in der ökonomischen Bewertung (siehe Kapitel 2.4.1) zusammengestellt.

2.2 Planung und Bau einer Laborversion eines Thermoskannenspeichers

Die Planung und Auslegung der Laborversion des Thermoskannenspeichers erfolgte auf Basis der Ergebnisse der Voruntersuchungen. Die Ergebnisse dazu sind in Kapitel 3.2 dargestellt.

2.3 Messungen und Tests

Am Versuchsstand von AEE INTEC wurden am Thermoskannenspeicher bei verschiedenen Versuchsbedingungen (Szenarien) Tests und Messungen zur Bestimmung der Wärmeverluste durchgeführt. Um die theoretisch ermittelten Werte validieren zu können, war ein Versuchsaufbau für die Bestimmung sämtlicher Speicherparameter notwendig. Der hydraulische Aufbau für den Speicherteststand ist Abbildung 2-6 dargestellt.

Als Wärmequelle bei der Beladung dienten insgesamt drei Speicher mit einem Gesamtinhalt von 1.900 L (2 x 300 L, 1 x 1.300 L). Hierbei wurde ein 300 L Speicher auf die gewünschte Beladetemperatur konditioniert, um mögliche Schwankungen bei der Temperaturregelung auszugleichen. Die Regelung hierfür erfolgte über eine drehzahlgeregelte Pumpe im Primärkreis, wodurch eine konstante Temperatur im Sekundärkreis (Speicher mit konditionierter Beladetemperatur) erzielt wurde. Die anderen beiden Speicher wurden auf ein

höheres Temperaturniveau gebracht, um die benötigte Momentanleistung bei der Beladung der Testspeicher sicherzustellen. Für die Erwärmung der insgesamt 1.900 L dienten drei Elektro-Patronen mit einer Gesamtleistung von 8 kW und eine Luft-Wasser Wärmepumpe mit einer Heizleistung von max. 7,8 kW.

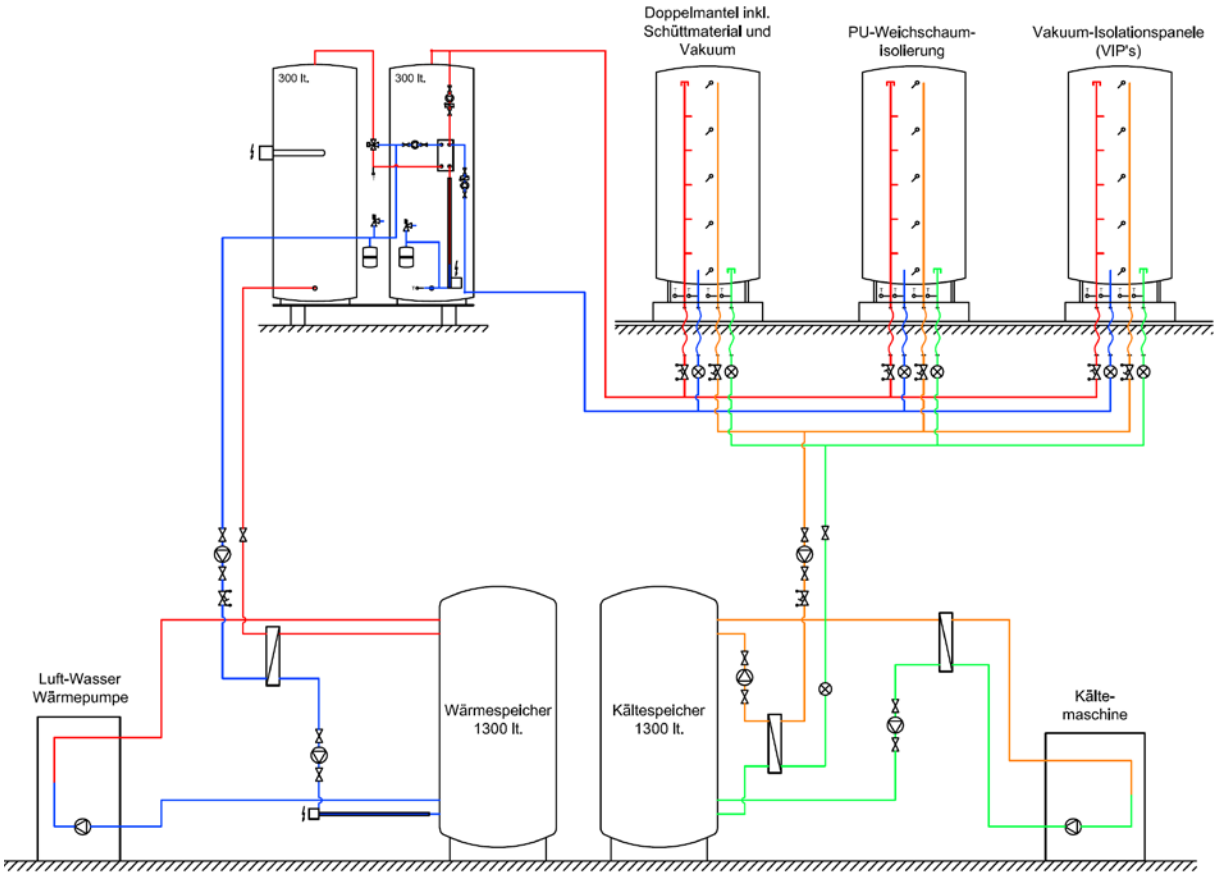

Abbildung 2-6: Hydraulischer Aufbau des Speicherteststandes inkl. Wärme- und Kälteversorgung

Für das Entladen der Testspeicher wurde mittels einer Kältemaschine mit einer max. Leistung von 8,2 kW ein 1.300 L Pufferspeicher auf ein Temperaturniveau von etwa 10 °C konditioniert. Die definierte Entladetemperatur im Sekundärkreis von rund 20 °C wurde über eine drehzahlgeregelte Pumpe im Primärkreis gewährleistet.

Generell wurden bei allen drei Testspeichern sämtliche hydraulische Anschlüsse von unten in den Speicher geführt, um die thermischen Verluste so gering wie möglich zu halten (siehe Abbildung 2-7). Des Weiteren wurden alle hydraulischen Anschlüsse gedämmt, damit die Wärmeverluste an den Anschlüssen möglichst keinen Einfluss auf die Untersuchungen der jeweiligen Speicherdämmungstypen haben.

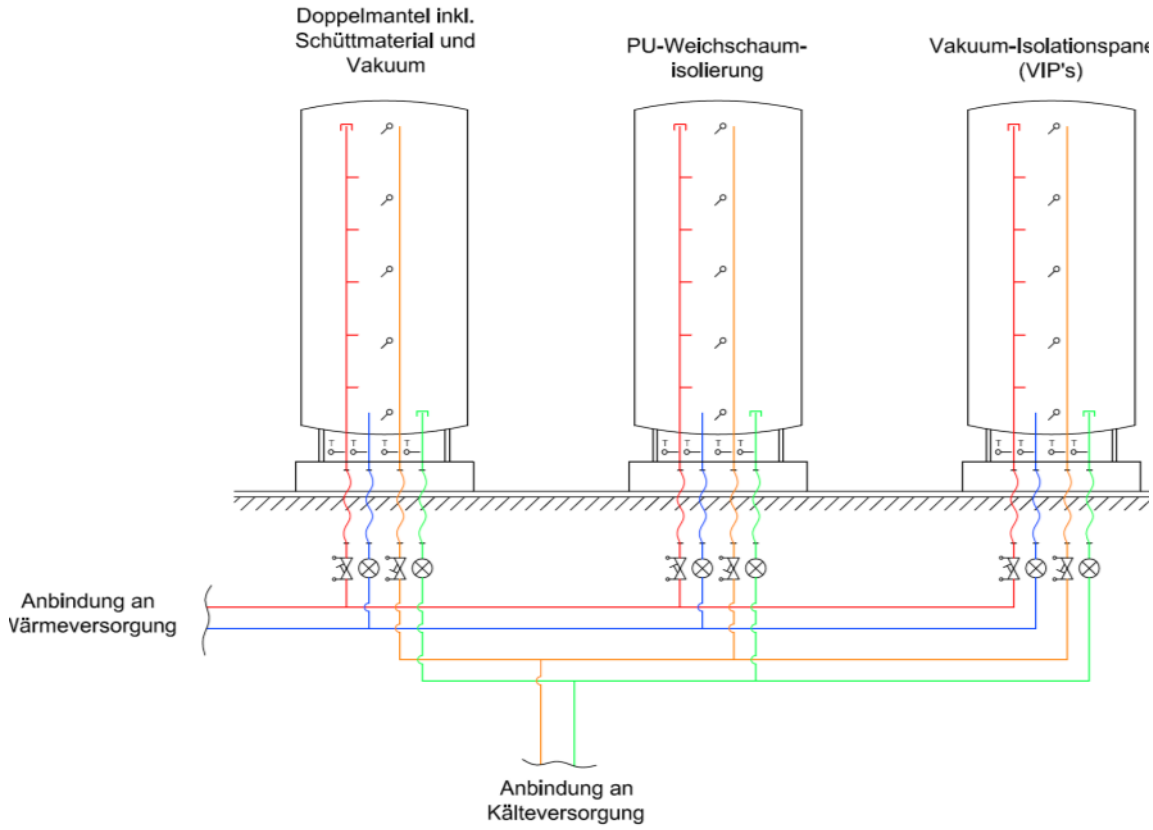

Abbildung 2-7: Schematische Darstellung der Anschlüsse für die Durchführung der Speichertests

Der konditionierte Vorlauf der Wärmeversorgung wurde über eine Schichtladelanze in den Speicher eingebracht, während der Rücklauf aus dem untersten Teil des Speichers entnommen wurde. Dadurch ist gewährleistet, dass einerseits der Speicher von oben nach unten durchgeladen wird und andererseits die hydraulischen Anschlüsse möglichst geringe Wärmeverluste aufweisen. Die Entnahme des warmen Mediums erfolgte im oberen Bereich des Speichers, während im unteren Bereich konditioniertes 20 °C kaltes Medium eingebracht wurde.

Für die Ermittlung der entsprechenden Temperaturen in der jeweiligen Schicht der Speicher, sind diese mit jeweils 5 Temperatursensoren ausgestattet. Die Einbringung der Sensoren erfolgte durch eigens vorgesehene Fühlerrohre durch den Boden der Speicher. Die Position des jeweiligen Temperaturfühlers ist der Abbildung 2-8 zu entnehmen, welche für jeden der drei Testspeicher gleich ist. In den darauffolgenden Auswertungen wird der oberste Temperaturfühler mit dem Index „Up“ und der unterste Fühler mit „Low“ bezeichnet. Ausgehend vom Speicherdeckel werden nach unten hin die Indizes 2 bis 4 verwendet.

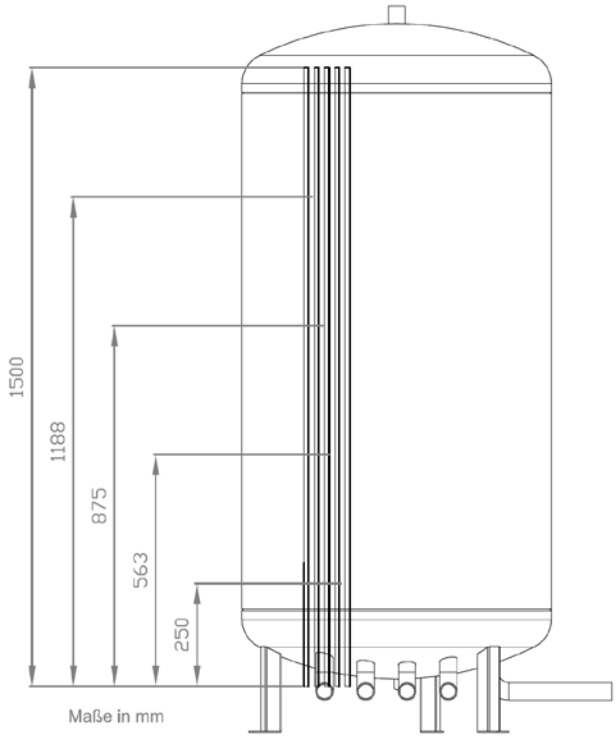

Abbildung 2-8: Position der Temperaturfühler bei jedem der drei Testspeicher

Die Wärme- und Kälteversorgung eines einzelnen Speichers ist jeweils mit einem eigenen Wärmemengenzähler versehen. Dieser gibt die Temperatur im Vor- bzw. Rücklauf und den dazugehörigen Volumenstrom aus. Dadurch wird einerseits die Momentanleistung bestimmt und andererseits die eingebrachte bzw. die entnommene Wärmemenge ermittelt. In der Tabelle 2-2 ist der Messbereich sowie die entsprechende Genauigkeit der verwendeten Messgeräte angeführt.

Tabelle 2-2: Verwendete Messtechnik

Messgröße	Hersteller	Produkt	Messbereich	Genauigkeit
Speichertemperatur	-	PT 100	-50…200 °C	Klasse A
Durchfluss	Techem	ultra S3	6…1200 l/h	Klasse 2
Temperatur			5…130 °C	
Durchfluss	Techem	ultra S II	15…3000 l/h	Klasse 2
Temperatur			5…130 °C	

Die drei Testspeicher wurden parallel vermessen, um für jeden Speicher annähernd gleiche Randbedingungen gewährleisten zu können.

In Anlehnung an ÖNORM EN 12977 (ÖNORM, 2006 und ÖNORM, 2011) wurden die notwendigen Parameter zur Ermittlung der tatsächlichen Wärmeleitfähigkeit der unter-

schiedlichen Speicher-Dämmmaterialien bestimmt. Generell ist in dieser Norm festgehalten, dass alle Speicher mit einer Temperatur von 60 °C beladen werden, bis auch der Rücklauf aus dem Speicher dieselbe Temperatur aufweist. In diesem Fall wird keine Energie mehr benötigt um den jeweiligen Speicher zu beladen und der Speicher ist über den gesamten Bereich konditioniert. Im Anschluss daran können die Speicher wieder mit einer konstanten Temperatur von 20 °C entladen werden, bis auch in diesem Fall die Rücklauftemperatur aus dem Speicher 20 °C beträgt und somit keine Energieentnahme mehr stattfindet. Generell wurden die Speicher vor jedem Beladevorgang auf eine konstante Temperatur von 20 °C konditioniert. Grundsätzlich wurden entsprechende Versuche auch mit höheren Temperaturniveaus bei der Beladung durchgeführt.

Des Weiteren wurde das Auskühlverhaltens der Speicher nach dem Beladevorgang bestimmt. Hierfür wurden die Speicher auf eine definierte Temperatur erwärmt und anschließend der Temperaturabfall in den Speichern aufgezeichnet.

Im Wesentlichen dienten diese Untersuchungen der Bestimmung der stationären und dynamischen Wärmeverluste des jeweiligen Speichers. Mit den vorliegenden Daten kann der entsprechende Wärmeverlustkoeffizient (U-Wert) für die einzelnen Ausführungen der Dämmung bestimmt werden um dadurch wiederum auf die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit des Materials zu schließen. Abbildung 2-9 zeigt den Versuchsaufbau der unterschiedlichen Speicherdämmungen im Labor der AEE INTEC.

Abbildung 2-9: Speicher am Teststand im Labor der AEE INTEC inklusive Beladestation (Links: Thermoskannenspeicher mit Schüttmaterial im Vakuumspalt, Mitte: Standardspeicher mit PU-Weichschaumdämmung, Rechts: Standardspeicher mit Vakuumisolationspaneelen - VIP's)

In Ergänzung zur messtechnischen Erfassung von Temperaturen und Wärmemengen wurden zur Visualisierung der thermischen Verluste Thermographie-Aufnahmen durchgeführt. Dabei wurden die jeweiligen Oberflächentemperaturen der unterschiedlichen Dämmvarianten bestimmt. Des Weiteren dienen diese Aufnahmen dazu, mögliche Schwachpunkte aufzuzeigen und in weiterer Folge gegebenenfalls zu verbessern. In der Tabelle 2-3 sind die Dämmmaterialien und die dazugehörigen Abmessungen der entsprechenden Testspeicher angeführt.

Tabelle 2-3: Dämmstärke und Abmessungen der entsprechenden Testspeicher

Dämmvariante	Dämmstärke	Abmessungen inkl. Isolierung	
		Durchmesser	Höhe
Schüttmatieral im Vakuumraum	17 mm	79 cm	172 cm
PU-Weichschaumdämmung	100 mm	95 cm	182 cm
Vakuumisolationspaneele (VIP's)	20 mm	79 cm	179 cm

2.4 Techno-ökonomische und ökologische Bewertung

2.4.1 Technische Bewertung

Ziel der Bewertung war es eine objektive technische Betrachtung zu den Ergebnissen des Projekts zu erhalten. Die technische Bewertung erfolgte auf Basis der durchgeführten Untersuchungen im Projekt und der Expertise des Projektkonsortiums. Der Thermoskannenspeicher (ThermosTank) wurde in technischer Hinsicht mit konventionellen Speichern verglichen und die technischen Vor- und Nachteile dargestellt.

2.4.2 Ökonomische Bewertung

Auf Basis der bei AEE INTEC durchgeführten Simulationsrechnungen (siehe Kapitel 2.1) und von den Projektpartnern angegebenen Investitionskosten für Speicher und Kollektoren wurde eine ökonomische Bewertung durchgeführt. Die Betrachtungen sind auf eine neu zu errichtende Solaranlage auf einem Passivhaus (PH) bzw. Niedrigenergiehaus (NEH) ausgerichtet. Zur ökonomischen Bewertung werden die durch geringere erforderliche Kollektorflächen, vermiedenen und die durch den teureren Thermoskannenspeicher (ThermosTank) erhöhten Kosten gegenübergestellt.

Sowohl für ein Passivhaus als auch ein Niedrigenergiehaus wurden jeweils folgende vier Varianten betrachtet:

- Variante 1: Standardspeicher mit PU-Weichschaumdämmung 1 m³, Kollektorfläche 20 m²

- Variante 2: Standardspeicher mit PU-Weichschaumdämmung 5 m³, Kollektorfläche 40 m²
- Variante 1a: ThermosTank 1 m³, in etwa gleicher solarer Deckungsgrad mit reduzierter Kollektorfläche
- Variante 2a: ThermosTank 5 m³, in etwa gleicher solarer Deckungsgrad mit reduzierter Kollektorfläche
- Variante 2b: ThermosTank 1 m³, in etwa gleicher solarer Deckungsgrad mit unveränderter Kollektorfläche von 40 m²

2.4.3 Ökologische Bewertung

2.4.3.1 Untersuchte Systeme

Die ökologische Bewertung der Betriebsphase basiert auf Jahresenergiebilanzen, die ein Ergebnis der Simulation aus Kapitel 2.1 sind. In der Simulation wurde ein Einfamilienhaus mit Niedrigenergiestandard mit einem jährlichen Energiebedarf von rund 11.300 kWh für Warmwasserbereitung und Heizung betrachtet. Die Wärmebereitstellung erfolgt über eine Solarthermieanlage in Kombination mit einer Nachheizung.

Für die ökologische Bewertung wurden für diesen Fall verschiedene Speichertypen mit verschiedenen Wärmeleitfähigkeitswerten (λ-Werte), zwei verschiedene Speichervolumina, unterschiedliche Kollektorflächen und verschiedene Nachheizungssysteme untersucht:

<u>Speichertypen</u>

- Thermoskannenspeicher mit einer Spaltbreite des evakuierten Bereichs von 17 mm und Füllmaterial HDK T30 (Bezeichnung: „Vakuum“)
- Speicher mit Weichschaumdämmung und idealen Speicherverlusten bestimmt auf Basis der Simulationsergebnisse (Bezeichnung: „Standard PU ideal“)
- Speicher mit Weichschaumdämmung und realen Speicherverlusten bestimmt durch Anpassung der Simulationsergebnisse mittels Korrekturfaktoren auf reale Verhältnisse (Bezeichnung: „Standard PU real“)

Der messtechnisch untersuchte Speicher mit Vakuumisolationspaneelen wurde im Rahmen der ökologischen Bewertung nicht betrachtet weil die Messergebnisse für diesen Speichertyp höhere Wärmeverluste als für den Thermoskannenspeicher zeigten und Weiters keine Daten zur Materialzusammensetzung und dem Herstellungsprozess der Vakuumisolationspaneelen vorlagen.

<u>Wärmeleitfähigkeitswerte (λ-Werte)</u>

- Thermischer Speicher mit Wärmeleitfähigkeitswert auf Basis von Literaturdaten und Berechnungsmodellen zur Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit im Vakuum-Spalt („λ-Wert theoretisch“)

- Thermischer Speicher mit Wärmeleitfähigkeitswert auf Basis von Messungen an einem 675 L Standardspeicher und einem 675 L Thermoskannen-Versuchsspeicher und Umrechnung dieser Werte für ein Speichervolumen für 1.000 L („λ-Wert Messung“)

Für Details zur Bestimmung der Wärmeleitfähigkeitswerte siehe auch Kapitel 6.1.

Speichervolumen

- 1.000 L
- 5.000 L

Kollektorfläche

- 10 m² (für 1.000 L Speichervolumen)
- 20 m² (für 1.000 L Speichervolumen und 5.000 L Speichervolumen)
- 40 m² (für 5.000 L Speichervolumen)

Nachheizung

- Pelletkessel
- Gaskessel
- Ölkessel

Tabelle 2-4 und Tabelle 2-5 geben einen Überblick über die untersuchten Varianten für ein Speichervolumen von 1.000 L und 5.000 L.

Tabelle 2-4: Übersicht über die untersuchten Varianten für 1.000 L Speichervolumen

Speicher-Typ	λ-Wert theoretisch[1)]	λ-Wert Messung[2)]	Solarthermieanlage			Nachheizung		
			10 m²	20 m²	40 m²	Pellet	Gas	Heizöl
Vakuum	x	x	x	x	-	x	x	x
Standard PU - ideal	x	x	x	x	-	x	x	x
Standard PU - real	x	x	x	x	-	x	x	x

[1)] λ-Wert auf Basis von Literaturwerten (Standard) bzw. berechnet (Vakuum)

[2)] λ-Wert auf Basis von Messungen für 675 L bestimmt und umgerechnet auf 1000 L

Tabelle 2-5: Übersicht über die untersuchten Varianten für 5.000 L Speichervolumen

Speicher-Typ	λ-Wert theoretisch[1)]	λ-Wert Messung	Solarthermieanlage			Nachheizung		
			10 m²	20 m²	40 m²	Pellet	Gas	Heizöl
Vakuum	x	-	-	x	x	x	x	x
Standard PU - ideal	x	-	-	x	x	x	x	x
Standard PU - real	x	-	-	x	x	x	x	x

[1)] λ-Wert auf Basis von Literaturwerten (Standard) bzw. berechnet (Vakuum)

2.4.3.2 Grunddaten

Die Datenbasis für die ökologische Bewertung setzt sich wie folgt zusammen:

- projektspezifische Daten zu thermischen Speichern (z.B. Speicherverluste, eingesetzte Materialen zur Herstellung der Speicher)
- Datenbank GEMIS – Globales Emissions-Modell integrierte Systeme, Version 4.6. (Öko-Institut 2010) für Daten zu Emissionen und Ressourcenbedarf der Energiebereitstellung
- Datenbank ecoinvent – database ecoinvent data v2.2 (2010) (Swiss Centre for Life Cycle Inventories 2010) für Daten zu Emissionen und Ressourcenbedarf zur Bereitstellung der Materialien und Verarbeitungsprozessen bei der Speicherproduktion

Für die Herstellung der thermischen Energiespeicher wurde die Gewinnung des eingesetzten Materials und die Produktion des Speichers berücksichtigt. Der Energieaufwand für die Speicherproduktion wurde anhand der Länge der Schweißnähte und der elektrischen Energie für den Betrieb einer Pumpe zu evakuieren beim Vakuum-Speicher abgeschätzt. Die Grunddaten sind in Tabelle 2-6 und Tabelle 2-7 dargestellt.

Tabelle 2-6: *Grunddaten Standardspeicher mit Weichschaumdämmung (3 bar, mit Schichtbeladerohren)*

Standard PU	**Einheit**	**1.000 Liter**	**5.000 Liter**
Durchmesser	[mm]	790	1.600
Höhe	[mm]	2.200	2.900
Stahl S235JR	[kg]	180	560
PP-Rohre	[kg]	5	6
Lack	[kg]	1,5	4
PU-Schaum	[kg]	11	29
PVC-Hülle	[kg]	2,5	5
Schweißnaht	[m]	3,5	14

Tabelle 2-7: *Grunddaten Thermoskannenspeicher (ThermosTank) (3 bar, mit Schichtbeladerohren)*

ThermosTank	Einheit	1.000 Liter	5.000 Liter
Durchmesser	[mm]	790	1.600
Höhe	[mm]	2.200	2.900
Stahl S235JR	[kg]	360	1.120
PP-Rohre	[kg]	5	6
Lack	[kg]	1,5	4
Pyrogenic Silica	[kg]	12	40
Schweißnaht	[m]	7	28
Evakuieren	[kWh]	32	87

In Tabelle 2-8 bis Tabelle 2-10 sind die Jahresenergiebilanzen für die untersuchten Wärmebereitstellungssysteme dargestellt. Input-Daten für die Jahresenergiebilanzen sind Literaturdaten und Berechnungen bestimmter Wärmeleitfähigkeitswerte (λ-Werte theoretisch) und durchgeführter Messungen bestimmter Wärmeleitfähigkeitswerte (λ-Werte Messung) (Tabelle 2-11). Für den „Standard PU real" wurden die Ergebnisse des idealen Falls („Standard PU ideal") mit einem Korrekturfaktor von 0,8 angepasst.

Tabelle 2-8: *Jahresenergiebilanzen für thermische Speicher mit Speichervolumen von 1.000 L, λ-Wert theoretisch, 10 bzw. 20 m² Solarkollektorfläche*

Energiebilanz	Einheit	Standard PU ideal 1.000 L	Standard PU real 1.000 L	ThermosTank 1.000 L	Standard PU ideal 1.000 L	Standard PU real 1.000 L	ThermosTank 1.000 L
Kollektorfläche	[m²]	10	10	10	20	20	20
Solarenergie an Speicher	[kWh/a]	4.376	4.513	3.962	5.927	6.344	4.977
Nachheizung an Speicher	[kWh/a]	8.615	9.044	8.064	7.552	7.819	7.161
Gesamtwärmebedarf	[kWh/a]	11.061	11.063	11.054	11.053	11.054	11.051
Wärmeverluste	[kWh/a]	1.930	2.494	972	2.426	3.109	1.087

Tabelle 2-9: *Jahresenergiebilanzen für thermische Speicher mit Speichervolumen von 1.000 L, λ-Wert bestimmt aus Messergebnissen, 10 bzw. 20 m² Solarkollektorfläche*

Energiebilanz	Einheit	Standard PU ideal 1.000 L	Standard PU real 1.000 L	ThermosTank 1.000 L	Standard PU ideal 1.000 L	Standard PU real 1.000 L	ThermosTank 1.000 L
Kollektorfläche	[m²]	10	10	10	20	20	20
Solarenergie an Speicher	[kWh/a]	4.352	4.592	4.281	5.680	6.362	5.517
Nachheizung an Speicher	[kWh/a]	8.178	8.719	8.093	7.170	7.527	7.107
Gesamtwärmebedarf	[kWh/a]	10.953	10.954	10.953	10.936	10.940	10.935
Wärmeverluste	[kWh/a]	1.577	2.357	1.421	1.914	2.949	1.689

Tabelle 2-10: *Jahresenergiebilanzen für thermische Speicher mit Speichervolumen von 5.000 L, λ-Wert theoretisch, 20 bzw. 40 m² Solarkollektorfläche*

Energiebilanz	Einheit	Standard PU ideal 5.000 L	Standard PU real 5.000 L	ThermosTank 5.000 L	Standard PU ideal 5.000 L	Standard PU real 5.000 L	ThermosTank 5.000 L
Kollektorfläche	[m²]	20	20	20	40	40	40
Solarenergie an Speicher	[kWh/a]	6.643	7.020	5.714	8.691	9.353	7.342
Nachheizung an Speicher	[kWh/a]	7.360	7.688	6.916	5.856	6.124	5.480
Gesamtwärmebedarf	[kWh/a]	11.017	11.085	11.073	11.063	11.067	11.062
Wärmeverluste	[kWh/a]	2.986	3.623	1.557	3.484	4.410	1.760

Tabelle 2-11: *Wärmeleitfähigkeitswerte für Bestimmung der Jahresenergiebilanz*

Wärmeleitfähigkeits-wert	Einheit	Standard PU ideal	ThermosTank
λ-Wert theoretisch	[W/(m*K)]	0,040	0,003
λ-Wert Messung	[W/(m*K)]	0,040	0,008

Nicht die gesamte benötigte Wärme für Heizung und Warmwasser kann über die Solaranlage bereitgestellt werden. Der verbleibende Wärmebedarf wird über einen Heizkessel bereitgestellt. In der ökologischen Bewertung wurden drei verschiedene Arten von Heizkesseln untersucht: Pelletkessel, Ölkessel, Gaskessel. Tabelle 2-12 zeigt die Grunddaten für diese Systeme.

Tabelle 2-12: Grunddaten für verschiedene Heizkessel

Wärmeerzeugung	**Nutzungs-grad [%]**	**Leistung [kW]**	**Hilfsstrom [$kWh_{el}/kWh_{Wärme}$]**	**Treibhausgas-emissionen[2)] [g CO_2-Äq./$kWh_{Wärme}$]**
Gaskessel (Brennwertkessel)	104%[1)]	15	0,02	259
Pelletkessel	85%	15	0,04	59
Heizölkessel	96%	15	0,02	319

[1)] bezogen auf den Heizwert von Erdgas

[2)] Werte für die gesamte Prozesskette (Rohstoffbereitstellung bis Wärmeerzeugung)

3 Ergebnisse und Schlussfolgerungen

3.1 Grundlegende theoretische Voruntersuchungen

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der theoretischen Voruntersuchungen dargestellt.

3.1.1 Wärmeleitfähigkeit im Vakuum

Anhand der in Kapitel 6.1.1 detailliert behandelten Berechnungsansätze ist es möglich, Ergebnisse durch Variation verschiedener Parameter zu visualisieren. In einem ersten Schritt wird der Vakuumraum mit Strahlungsfolien versehen, um dadurch die Wärmestrahlungsverluste zu minimieren. Des Weiteren werden unterschiedliche Schüttmaterialien getestet.

Bevor mit entsprechenden Materialien gerechnet wird, muss der Einfluss der Spaltbreite untersucht werden. Abbildung 3-1 zeigt den Verlauf der totalen Wärmeleitfähigkeit in Abhängigkeit der Spaltbreite und des Druckniveaus.

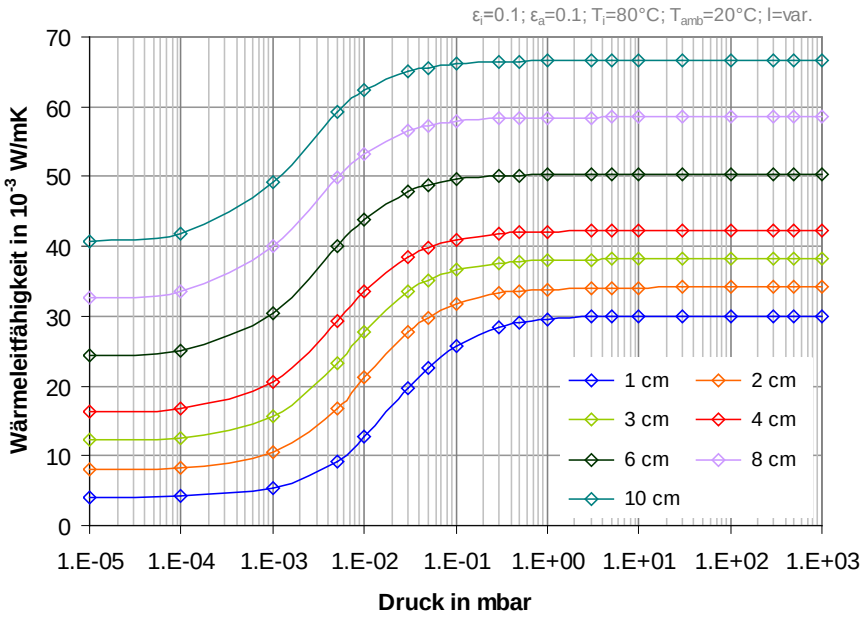

Abbildung 3-1: Gesamte Wärmeleitfähigkeit bei unterschiedlichen Spaltbreiten

Deutlich zu erkennen ist die immer schlechter werdende Wärmeleitfähigkeit mit zunehmender Spaltbreite. Der in der Literatur vielmals zitierte Faktor 10 zwischen der Wärmeleitfähigkeit einer herkömmlichen Schaumdämmung und einer Vakuumdämmung wird in diesem Fall erst bei einem sehr geringem Druck (< 10^{-6} bar) und einer Spaltbreite von maximal 1 cm erreicht.

Aufgrund des hier vorliegenden Hochvakuums muss eine äußerst stabile Konstruktion des Speichers gegeben sein, um ein Zusammendrücken der Speicherhülle zu verhindern. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Langzeitstabilität des Vakuums. Hierbei stellen die vorhandenen Leckagen eine besondere Herausforderung dar. Sollten derartige Leckagen

nicht verhindert werden können müsste zusätzlich eine Vakuumpumpe installiert werden, welche in regelmäßigen Abständen für die Aufrechterhaltung des Hochvakuums sorgt.

Würde man einen Druck von etwa 10 mbar herstellen, können geringere Wärmeleitfähigkeiten als 0,03 W/(m*K) nicht erzielt werden. Diese Wärmeleitfähigkeit entspricht in etwa jener von handelsüblicher Hart- bzw. Weichschaumdämmung, wodurch sich der höhere technische Aufwand für eine Vakuumdämmung nicht vertreten lässt. Infolge dieser Erkenntnisse ist eine sinnvolle Anwendung von Vakuum nur in Verbindung mit einem entsprechenden Materialeinsatz (Strahlungsfolien bzw. Schüttmaterial) im Vakuumraum möglich.

Durch die Wahl einer geringen Spaltbreite wird einerseits eine geringe totale Wärmeleitfähigkeit erzielt und andererseits der Materialeinsatz für die Fertigung des Speichers reduziert. In den weiteren Berechnungen wird daher mit einer Spaltbreite von 2 cm gerechnet.

Um den technischen Aufwand für die Herstellung des Vakuums in einem angemessenen Rahmen zu halten und dessen Langzeitstabilität zu gewährleisten, wird ein Druckniveau von rund 10 mbar für die weiteren Berechnungen angesetzt.

3.1.1.1 Verwendung von Strahlungsfolien

Wie bereits erwähnt, können für die Reduzierung der thermischen Verluste im Vakuum Strahlungsfolien verwendet werden. Im Wesentlichen vermindert der Einsatz solcher Folien den Strahlungsaustausch zwischen den einzelnen Oberflächen.

In der Tabelle 3-1 sind sämtliche Parameter für die Berechnung der totalen Wärmeleitfähigkeit im Vakuum aufgelistet.

Tabelle 3-1: Parameter für die Berechnung der gesamten Wärmeleitfähigkeit

Parameter	ε_i	ε_a	ε_F	T_i	T_a	l
Einheit	-	-	-	°C	°C	m
Wert	0.1	0.1	0.05	80	20	0.02

Wie sich die aufgelisteten Parameter auf den Einsatz von Strahlungsfolien auswirken, wird in der Abbildung 3-2 veranschaulicht. Die gesamte Wärmeleitfähigkeit im Vakuum wird für einen Druckbereich von 10^{-5} bis 10^{3} mbar dargestellt.

Allgemein ist festzustellen, dass sich unter Verwendung von Strahlungsfolien erst bei sehr geringen Drücken von kleiner 0,1 mbar signifikante Verminderungen der gesamten Wärmeleitfähigkeit im Vakuum ergeben. Werden keine Strahlungsfolien verwendet, ist ein niedrigerer Wert als 0,008 W/(m*K) nicht zu erreichen (Weich- bzw. Hartschaum hat bspw. 0,035 W/(m*K)), was sich durch den bestehenden Strahlungsaustausch erklären lässt. Erst

durch das Hinzufügen von Folien zur Unterbindung des Strahlungsaustausches kann ein gravierender Rückgang der gesamten Wärmeleitfähigkeit festgestellt werden. Weiters wird durch den Einsatz von Folien auch die Gaskonvektion der frei beweglichen Moleküle unterbunden. Bei einem Druck von 10^{-3} mbar und der Verwendung von mindestens zwei Folien ist es möglich eine gesamte Wärmeleitfähigkeit von rund 0,003 W/(m*K) zu erreichen. Dies entspricht im Vergleich zu einer herkömmlichen Weich- bzw. Hartschaumdämmung einer Reduzierung der Wärmeverluste um den Faktor 10.

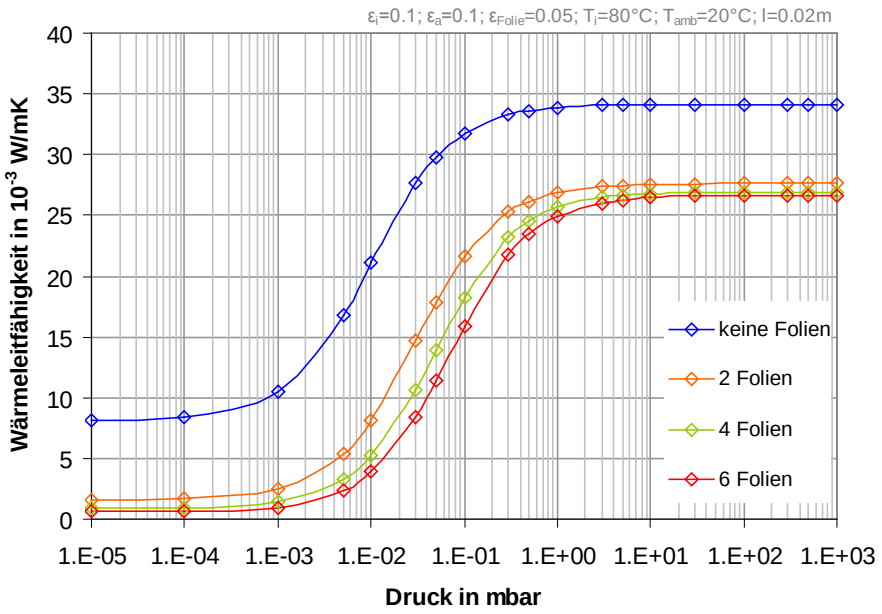

Abbildung 3-2: Gesamte Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung von Strahlungsfolien im Spalt

Grundsätzlich geht aus Abbildung 3-2 hervor, dass durch die Verwendung von Strahlungsfolien sich die gesamte Wärmeleitfähigkeit signifikant reduzieren lässt. Bei Druckniveaus ≥ 1 mbar spricht der technische Aufwand gegen das Hinzufügen weiterer Folien um die gesamte Wärmeleitfähigkeit weiter zu verringern. Erst bei Druckniveaus ≤ 0,1 mbar kann der Einsatz mehrerer Strahlungsfolien die gesamte Wärmeleitfähigkeit weiter reduzieren. Hierbei ist allerdings ein beträchtlicher Arbeitsaufwand zum Einbau der Folien notwendig. Des Weiteren ist es bei so einem niedrigen Druck schwieriger die Langzeitstabilität des Vakuums sicherzustellen.

Bei Untersuchungen des Einsatzes von Vakuumdämmungen zur Dämmung von Rohrleitungen (Weber, 2001 und Jason, 2007) und Gebäuden (Simmler et al., 2005) sind ähnliche Ergebnisse erzielt worden.

3.1.1.2 Verwendung von Schüttmaterialien

In diesem Abschnitt werden diverse Schüttmaterialien und deren thermische Eigenschaften untersucht. Hierbei gilt es zwischen opaken und transparenten Materialien zu unterscheiden. Während bei transparenten Materialien wie bspw. Silikagel der Strahlungsanteil eine

entscheidende Einflussgröße darstellt, wirkt sich dieser bei der Verwendung eines opaken Materials wie bspw. Perlit nicht als maßgeblicher Faktor auf die thermischen Verluste aus. Diverse Parameter für die Berechnung der gesamten Wärmeleitfähigkeit sind in der Tabelle 3-2 aufgelistet.

Tabelle 3-2: *Parameter für die Berechnung der gesamten Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung eines transparenten bzw. opaken Materials*

Parameter	Einheit	transparentes Material	opakes Material
Emissionskoeffizient ε_i	-	0.1	
Emissionskoeffizient ε_a	-	0.1	
Temperatur T_i	°C	80	
Temperatur T_a	°C	20	
Festkörperwärmeleitung λ_{FK}	mW/mK	0.38	0.35
Extinktionskoeffizient E	1/m	1860	12420

Werte für die Festkörperwärmeleitfähigkeit und den Extinktionskoeffizienten sind Mittelwerte aus materialspezifischen Tabellen, welche dem VDI Wärmeatlas (1996) entnommen sind.

Wird ein transparentes Schüttmaterial verwendet, gewinnt der Verlustwärmestrom durch Strahlung zwischen Innen- und Außenbehälter an Bedeutung. In der Abbildung 3-3 wird die gesamte Wärmeleitfähigkeit bei niedrigen ($\varepsilon_{i/a}$=0,1) und hohen ($\varepsilon_{i/a}$=0,5) Emissionskoeffizienten gegenübergestellt.

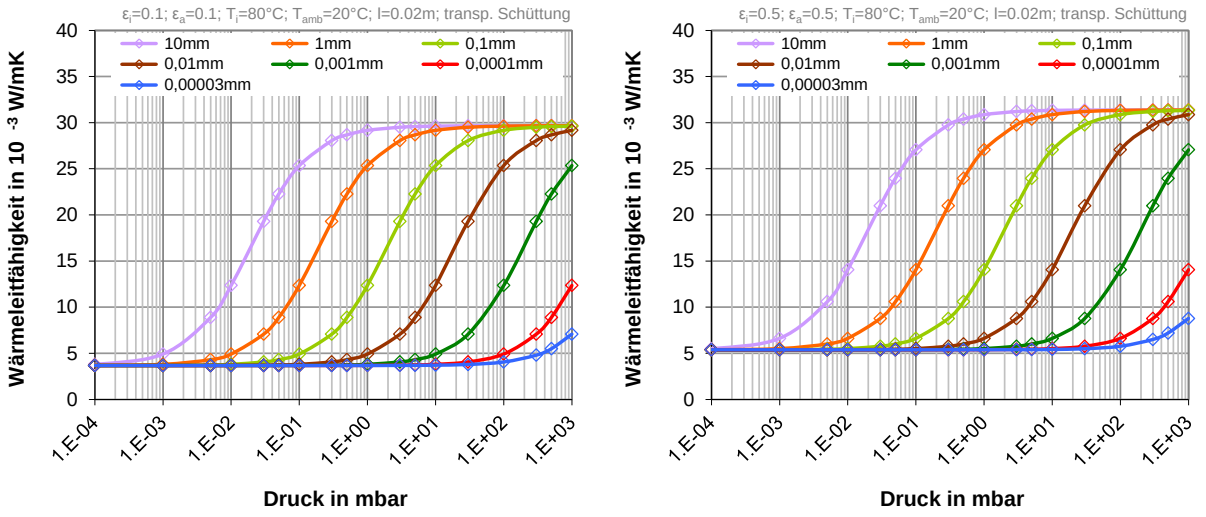

Abbildung 3-3: *Totale Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung eines transparenten Schüttmaterials im Vakuumraum bei unterschiedlichen Emissionskoeffizienten des Innen- und Außenbehälters (links: εi/a =0,1; rechts: εi/a =0,5)*

Es ist deutlich zu erkennen, dass die gesamte Wärmeleitfähigkeit bei höheren Emissionskoeffizienten der beiden Oberflächen schlechtere Werte erzielt, wodurch das

Erreichen einer gesamten Wärmeleitfähigkeit kleiner 0,005 W/(m*K) nicht möglich ist. Dies bedeutet, dass Oberflächen mit möglichst geringen Emissionskoeffizienten zu wählen sind. Erst durch diese Maßnahme ist eine gesamte Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,004 W/(m*K) bei entsprechendem Porendurchmesser zu erreichen, welche in etwa um den Faktor 10 kleiner ist als bei konventionellen Dämmmaterialien.

Ein weiterer wichtiger und ausschlaggebender Faktor zur Minimierung der Verlustwärmeströme ist der Einfluss der Porendurchmesser des Schüttmaterials. Durch Verwendung eines sehr grobkörnigen Materials zeigt sich ein ähnlicher Verlauf der gesamten Wärmeleitfähigkeit wie beim Einsatz von Strahlungsfolien. Auch hier ist es erst bei sehr geringen Druckniveaus möglich, entsprechende Werte um den Bereich von 0,004 W/(m*K) zu erreichen. Es ist daher essentiell, ein geeignetes Material mit möglichst kleinem Porendurchmesser (< 1 µm) zu wählen um dadurch bereits bei dem geforderten Druck von 10 mbar einen akzeptablen Wert zu erreichen.

Aufgrund der Verwendung eines transparenten Schüttmaterials lässt sich der Strahlungsaustausch zwischen Innen- und Außenbehälter nur bis zu einem bestimmten Grad unterbinden. Folglich führt dies dazu, dass es in Abhängigkeit des Emissionsverhaltens der beiden Oberflächen zu einem „Off-Set“ der gesamten Wärmeleitfähigkeit kommt. Um diesen Effekt des transparenten Schüttmaterials einzudämmen, könnte bspw. ein Trübungsmittel eingesetzt werden, welches für langwellige Strahlung undurchlässig ist.

Des Weiteren kann anstelle eines transparenten Schüttmaterials ein opakes Material wie z.B. Perlit verwendet werden. Diese Materialien besitzen sehr große Extinktionskoeffizienten, welche ausschlaggebend für die Abschwächung der langwelligen Strahlung sind. In Abbildung 3-4 sind die Ergebnisse für die gesamte Wärmeleitfähigkeit unter Einsatz eines opaken Schüttmaterials dargestellt.

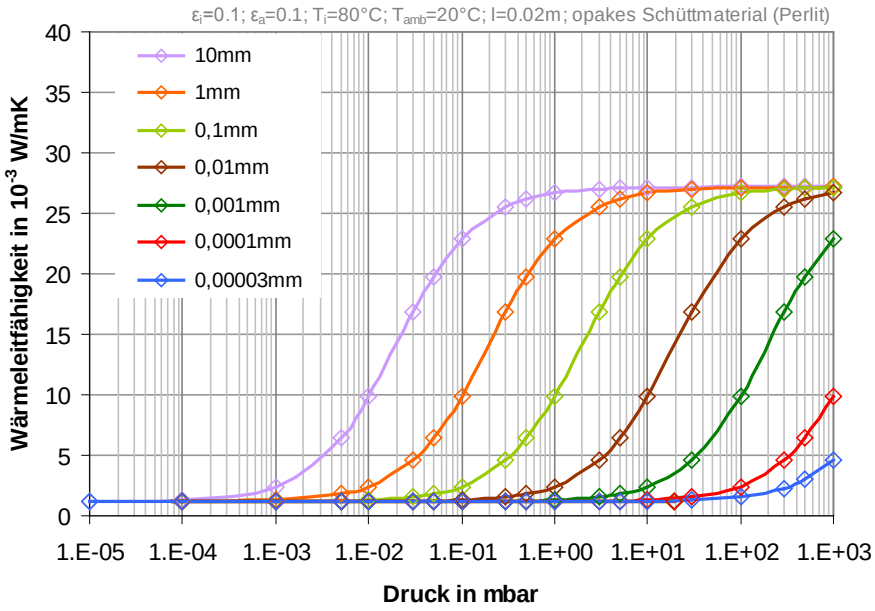

Abbildung 3-4: Gesamte Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung eines opaken Schüttmaterials

Durch die Verwendung eines opaken Schüttmaterials wird der Strahlungsaustausch zwischen den beiden Oberflächen weitestgehend unterbunden. Bereits bei großen Porendurchmessern (> 1 mm) ist die totale Wärmeleitfähigkeit niedriger als bei einem transparentem Material. Aufgrund der hohen Undurchlässigkeit der langwelligen Strahlung wirken sich in diesem Fall höhere Emissionskoeffizienten des Innen- und Außenbehälters nicht negativ auf die gesamte Wärmeleitfähigkeit aus.

Gleichbedeutend wie bei transparenten Materialien ist auch hier, dass der Porendurchmesser in einem Bereich von < 1 µm liegen sollte. Ist dies nicht der Fall, muss das Druckniveau entsprechend reduziert werden, was wiederum einen höheren technischen Aufwand bei der Herstellung des Vakuums und bei der Langzeitstabilität bedeutet. Wesentliches Ziel ist daher einen möglichst kleinen Porendurchmesser zu wählen. Von Vorteil wäre ein feinkörniges Material im Nanometer Bereich, welches einen hohen Extinktionskoeffizienten und eine möglichst geringe Festkörperwärmeleitfähigkeit aufweist.

3.1.1.3 Strahlungsfolien vs. Schüttmaterial

Bisher wurden lediglich Mittelwerte für diverse Parameter von Schüttmaterialien aus der Literatur herangezogen, wodurch große Abweichungen im Vergleich zu einem handelsüblichen Material auftreten können. Aus diesem Grund war es notwendig, eine Recherche hinsichtlich geeigneter Schüttmaterialien durchzuführen und die gesamte Wärmeleitfähigkeit explizit berechnen zu können. Abbildung 3-5 zeigt die Ergebnisse unter Verwendung von Strahlungsfolien (links) bzw. mit dem handelsüblichen Schüttmaterial HDK N20 inklusive Infrarottrüber (IR-Trüber) der Firma Wacker Chemie AG (rechts) im direkten Vergleich. Der wesentliche Vorteil des IR-Trübers besteht darin, dass durch eine spezielle Behandlung des

Schüttmaterials der Strahlungsaustausch zwischen Innen- und Außenbehälter weitestgehend reduziert wird.

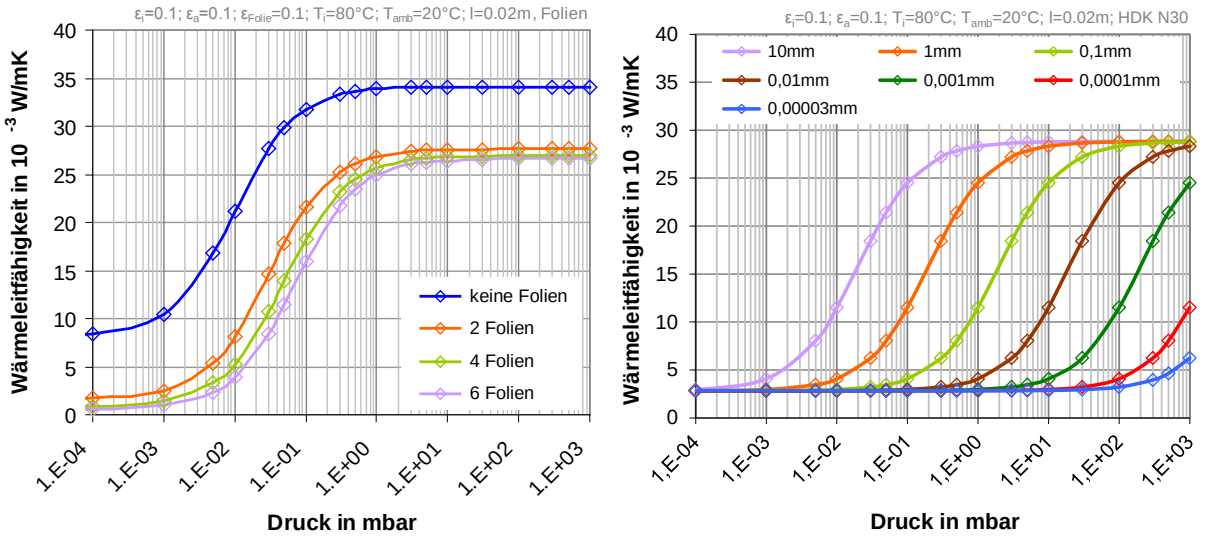

Abbildung 3-5: *Gegenüberstellung der gesamten Wärmeleitfähigkeit unter Verwendung von Strahlungsfolien (links) und dem opaken Schüttmaterial HDK N20 inkl. IR-Trüber (rechts) in Abhängigkeit vom Porendurchmesser*

Wird der Vakuumspalt ohne Strahlungsfolien bzw. Schüttung ausgeführt, ist bei einem angestrebten Druck von 10 mbar keine Änderung der Wärmeleitfähigkeit ersichtlich. Erst durch das Hinzufügen von Folien zur Unterbindung des Strahlungsaustausches kann eine gravierende Reduktion der gesamten Wärmeleitfähigkeit erreicht werden.

Verwendet man handelsübliches Schüttmaterial, wird die gesamte Wärmeleitfähigkeit mit kleiner werdendem Porendurchmesser reduziert. Im Vergleich zum Einsatz von Strahlungsfolien können ab einem Porendurchmesser von < 1 µm und einem Druck von 10 mbar eine gesamte Wärmeleitfähigkeit unter 0,004 W/(m*K) erreicht werden. Selbst bei Porendurchmessern > 10 µm werden bei gleichem Druck bessere Ergebnisse erzielt als mit Strahlungsfolien. Ähnliche Ergebnisse haben auch Weber (2001) und Simmler et al. (2005) publiziert. Infolgedessen steht nach diesen Untersuchungen der Einsatz eines Schüttmaterials mit möglichst kleinem Porendurchmesser für die weiteren Projektarbeiten im Vordergrund.

Durch die Ermittlung der Wärmeleitfähigkeit eines Speichers ist es möglich, Jahressimulationen durchzuführen. Damit können einerseits die jährlichen Speicherverluste und andererseits, bei Verwendung eines Solarsystems, Änderungen des solaren Deckungsgrades untersucht werden. Für die folgenden Systemsimulationen wurde die Software Polysun (2010) verwendet. Es wird mit einer gesamten Wärmeleitfähigkeit von 0,003 W/(m*K) und einer Spaltbreite von 17 mm gerechnet. Eine Spaltbreite von 17 mm ermöglicht die Verwendung von Standardböden bei der Produktion.

3.1.2 Systemsimulationen

Für das Referenzsystem werden die jährlichen Speicherverluste für unterschiedliche Dämmmaterialien und Dämmstärken untersucht. Ziel ist die Ermittlung des optimalen Dämmmaterials und der optimalen Dämmstärke. Anschließend erfolgt eine Parametervariation hinsichtlich Kollektorfläche und Speichervolumen.

3.1.2.1 Speicherverluste und spezifischer Solarertrag (Referenzmodell)

Speicherverluste stellen bei einer Simulation immer einen idealisierten Fall dar, welcher bei realen Anlagen aufgrund der schlechter ausgeführten Dämmung bzw. Vernachlässigung der Dämmung von hydraulischen Anschlüssen, nur selten vorzufinden ist. Aus diesem Grund wurden bereits in Heimrath (2004) Korrekturfaktoren bestimmt, um simulierte ideale Speicherverluste auf reale Verhältnisse überführen zu können. Für einen Pufferspeicher mit einem Nennvolumen von 1 m³ sind in der Praxis bspw. mit etwa 80 % höheren thermischen Verlusten zu rechnen als bei einem ideal simulierten System. Mit zunehmendem Speichervolumen werden die Korrekturfaktoren kleiner.

Für das Referenzsystem werden diese Korrekturwerte berücksichtigt um eine Gegenüberstellung zwischen idealen, realen und vakuumgedämmten Speichern zu erhalten. In Abbildung 3-6 sind die Ergebnisse der Simulationen dargestellt. Es werden sowohl die jährlichen Speicherverluste als auch der solare Deckungsgrad in Abhängigkeit der Dämmstärke unter Verwendung eines Pufferspeichers mit einem Nennvolumen von 1 m³ berechnet.

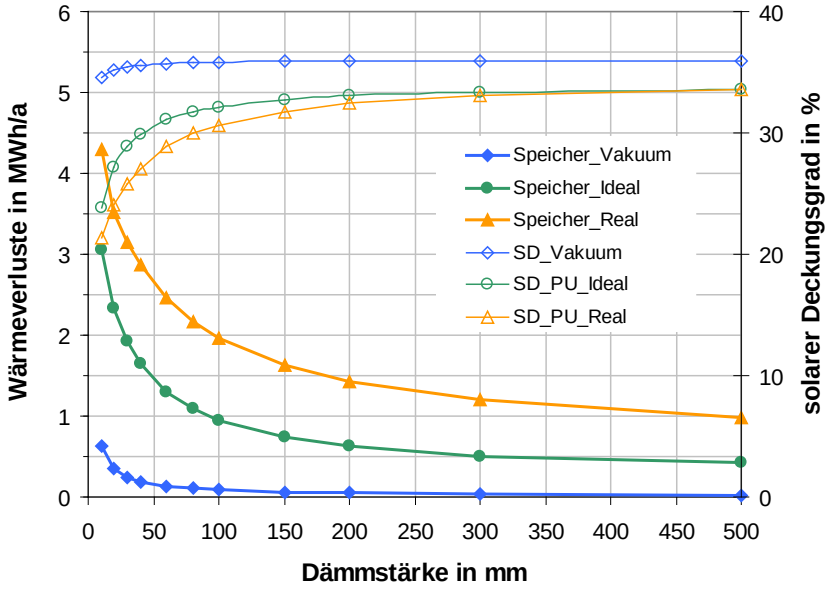

Abbildung 3-6: *Jährliche Speicherverluste eines real gedämmten Speichers (Real), eines ideal gedämmten Speichers (Ideal) und eines Speichers mit Vakuumdämmung (Vakuum) in Abhängigkeit der Dämmstärke*

Handelsübliche Pufferspeicher mit einem Nennvolumen von 1 m³ sind üblicherweise mit einer Dämmung von 80 mm versehen. Bei dieser Dämmstärke sind enorme Unterschiede zwischen simulierten und realen Werten zu erkennen. Dies ist bei realen Anlagen im Wesentlichen auf die nicht exakt am Speichermantel anliegende Dämmung zurückzuführen (Kamineffekt). Um genügend Energie für Brauchwarmwasser und Raumwärme zur Verfügung zu stellen, müssen die Verluste des Speichers von etwa 1.100 kWh pro Jahr bei einem ideal gedämmten Speicher und von rund 2.050 kWh pro Jahr bei einem real gedämmten Speicher von der Solaranlage bzw. der Nachheizung abgedeckt werden.

Verwendet man anstelle einer herkömmlichen Hart- bzw. Weichschaumdämmung eine Vakuumdämmung, ist eine wesentlich geringere Dämmstärke als 80 mm erforderlich. Abbildung 3-6 zeigt, dass sich die jährlichen Verluste einer Vakuumdämmung ab einer Dämmstärke von etwa 30 mm nicht mehr signifikant ändern. In diesem Fall gilt es zwischen dem technischen Einsatz und dem ökonomischen Nutzen abzuwiegen. Aus konstruktiven und ökonomischen Gründen wird im gegenständlichen Projekt die Vakuumdämmung mit einer Dicke von 17 mm ausgeführt. Bei dieser Anwendung betragen die jährlichen Speicherverluste etwa 450 kWh. Dies entspricht im Vergleich zu einem real gedämmten Speicher in etwa einer Verminderung von rund 80 %. Generell ist zu sagen, dass durch eine Verringerung der Dämmstärke bei realen bzw. ideal gedämmten Speichern die jährlichen Speicherverluste exponentiell ansteigen.

Durch geringe Dämmstärken entstehen bei einem real gedämmten Speicher sehr hohe Verluste, wodurch der solare Deckungsgrad bei einer Dämmstärke von 40 mm lediglich bei rund 26 % liegt. Erst bei einer Dämmstärke von 80 mm erreicht der solare Deckungsgrad etwa 30 %. Betrachtet man einen ideal gedämmten Speicher würde man bei einer

Dämmstärke von 40 mm einen solaren Deckungsgrad von 30 % erreichen und bei 80 mm Dämmung eine Steigerung des solaren Deckungsgrades auf etwa 32 % erreichen. Deutlich zu erkennen ist, dass infolge einer besseren Dämmqualität die Unterschiede zwischen 40 und 80 mm Dämmstärke geringer werden.

Wird der Speicher mit einer Vakuumdämmung versehen, beträgt der solare Deckungsgrad bei einer Dämmstärke von 17 mm etwa 34%. Dieser kann durch eine Erhöhung der Dämmstärke nicht wesentlich gesteigert werden. Dies bedeutet, dass bei einem 1 m³ Pufferspeicher eine Dämmstärke von 17 mm in Verbindung mit einer Vakuumdämmung ausreichend ist. Für größere Volumina ist die Ermittlung der optimalen Dämmstärke explizit durchzuführen (siehe Kapitel 3.1.2.2).

3.1.2.2 Einfluss der Dämmstärke auf die thermischen Verluste

Auf Basis des Referenzsystems (Kapitel 6.2.1) werden für alle verwendeten Speichervolumina Parametervariationen hinsichtlich Dämmstärke und Kollektorfläche durchgeführt, um ein Optimum zwischen den thermischen Verlusten und dem solaren Deckungsgrades zu erhalten. Zu Beginn werden für sämtliche Speichervolumina die thermischen Verluste in Abhängigkeit der Dämmstärke ermittelt. Im Anschluss erfolgt die Berechnung des solaren Deckungsgrades je nach Speichervolumen mit einer Dämmstärke von 5 – 50 mm. In Abbildung 3-7 und Abbildung 3-8 sind die erwähnten Parametervariationen für das jeweilige Speichervolumen dargestellt.

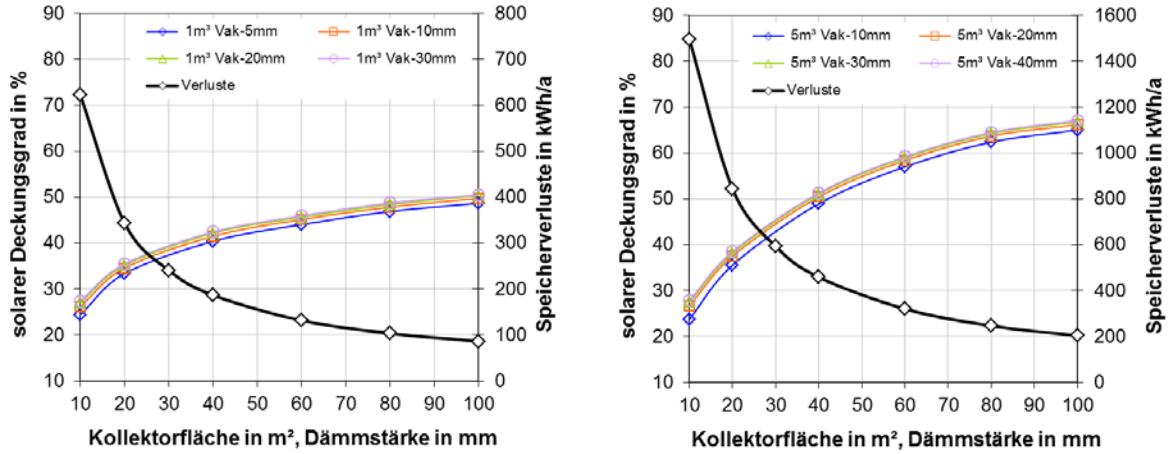

Abbildung 3-7: *Ermittlung der optimalen Dämmstärke anhand des Verlaufs der thermischen Verluste und des solaren Deckungsgrades bei einem Pufferspeicher mit einem Nenninhalt von 1 m³ (links) und 5 m³ (rechts)*

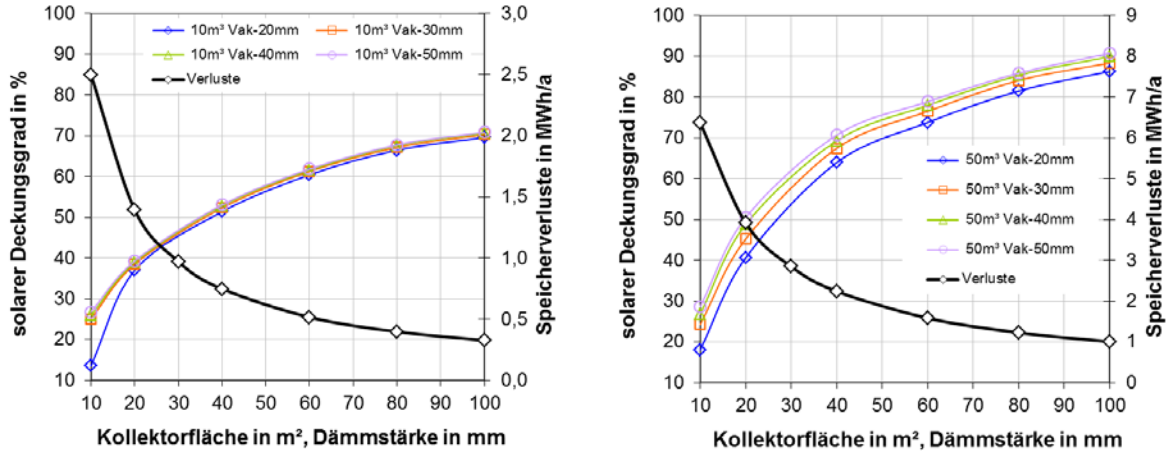

Abbildung 3-8: Ermittlung der optimalen Dämmstärke anhand des Verlaufs der thermischen Verluste und des solaren Deckungsgrades bei einem Pufferspeicher mit einem Nenninhalt von 10 m³ (links) und 50 m³ (rechts)

Aufgrund dieser Darstellungen sind in der Tabelle 3-3 die für die weiteren Berechnungen ausgewählten Dämmstärken der unterschiedlichen Speichervolumina und Dämmmaterialien angeführt.

3.1.2.3 Systemkonfigurationen

Als Maßgebende Kennzahl für die Bewertung eines Solarsystems dient der solare Deckungsgrad. Dieser wird für unterschiedliche Speichervolumina und Ausführungsvarianten der Dämmqualität ermittelt. Sämtliche Berechnungen basieren auf dem Referenzmodell, welches bereits in Kapitel 6.2.1 ausführlich erläutert wurde. Aufbauend auf diesem Modell werden einerseits Speichervolumina von 1, 5, 10 und 50 m³ betrachtet und andererseits die Kollektorfläche von 10 bis 100 m² variiert. Hinsichtlich der Dämmqualität erfolgen die Berechnungen mit herkömmlicher Hart- bzw. Weichschaumdämmung und mit einer Vakuumdämmung. Bei der herkömmlichen Dämmung wird wiederum zwischen ideal und real

gedämmten Speichern unterschieden. In der Tabelle 3-3 sind für die verwendeten Speichervolumina die Dämmstärken für konventionelle Weichschaumdämmung und für Vakuumdämmung angeführt.

Tabelle 3-3: *Dämmstärken der unterschiedlichen Speichergrößen*

Speichervolumen	**1 m³**	**5 m³**	**10 m³**	**50 m³**
Dämmstärke herkömmliche Isolierung	80 mm	150 mm	300 mm	500 mm
Dämmstärke Vakuumisolierung	17 mm	20 mm	30 mm	40 mm

Abbildung 3-9 zeigt den Verlauf des solaren Deckungsgrades für einen idealen, realen und vakuumgedämmten Speicher für ein Niedrigenergiehaus.

Bei einem Nennvolumen von 1 m³ wird deutlich, dass durch den Einsatz einer Vakuumdämmung höhere solare Deckungsgrade als mit ideal und real gedämmten Speichern zu erzielen sind. Bei einer im Einfamilienhaus üblichen Dimensionierung der Solaranlage mit 20 m² Kollektorfläche und einem Speichervolumen von 1 m³ kann bei Verwendung eines herkömmlich gedämmten Speichers im idealen Fall ein solarer Deckungsgrad von etwa 32 % erreicht werden, während real nur in etwa ein Wert von 28 % zu erreichen ist. Verwendet man beim gleichen System hingegen einen Speicher mit Vakuumdämmung, wird ein solarer Deckungsgrad von rund 35 % erreicht. Dies entspricht einer Steigerung von beinahe 25 %. Legt man das Augenmerk dagegen auf die benötigte Kollektorfläche, wird bei derselben solaren Deckung (28 %) lediglich die halbe Kollektorfläche benötigt.

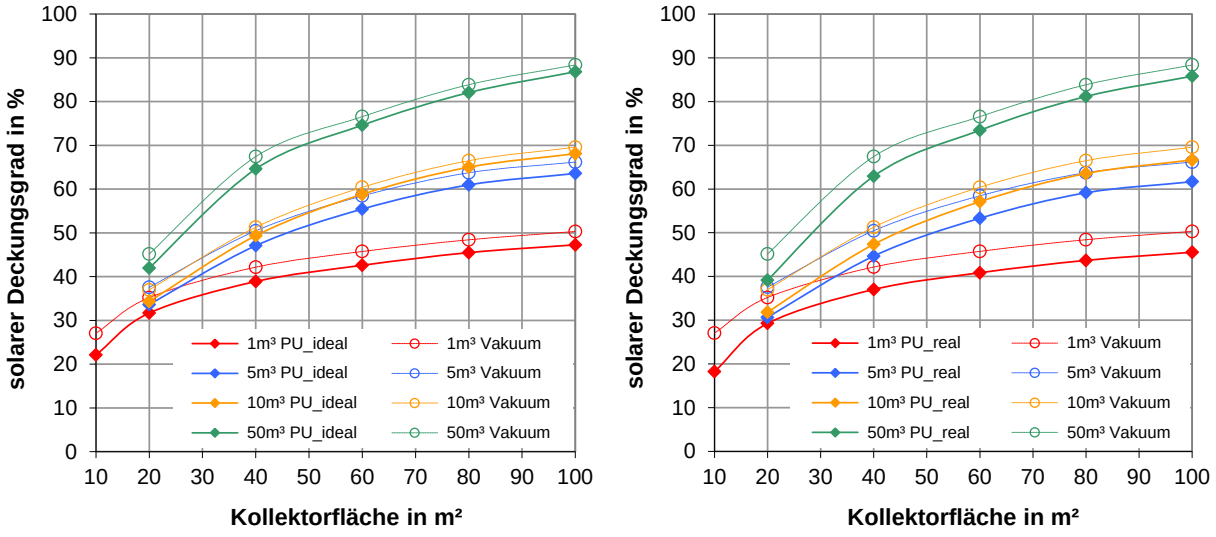

Abbildung 3-9: *Vergleich des solaren Deckungsgrades zwischen vakuumgedämmten Speichern, ideal (linkes) und real (rechts) gedämmter Speicher in Abhängigkeit der Kollektorfläche und des Speichervolumens für ein Niedrigenergiehaus*

Durch die Verwendung einer Vakuumdämmung wird der solare Deckungsgrad im Vergleich zu ideal und real gedämmten Speichern erhöht. Soll bei einem Niedrigenergiehaus ein

solarer Deckungsgrad von 40 % erreicht werden, ist bei der Verwendung eines herkömmlich real gedämmten Speichers eine Kollektorfläche von 32 m² notwendig. Würde man das Speichervolumen gleich belassen und lediglich eine Vakuumdämmung verwenden, ist bei gleichem solaren Deckungsgrad eine Verminderung der Kollektorfläche von nahezu 10 m² auf ca. 22 m² möglich.

Bei einem Speichervolumen von 10 m³ sind die Unterschiede zwischen herkömmlicher Hart- bzw. Weichschaumdämmung und Vakuumdämmung nicht mehr so stark ausgeprägt. Dies ist im Wesentlichen auf die sorgfältigere Anbringung der Dämmung und auf eine größere Dämmstärke des Speichers zurückzuführen (siehe Tabelle 3-3).

In der Abbildung 3-10 sind sämtliche Ergebnisse für ein Passivhaus dargestellt.

Es ist festzustellen, dass bereits bei einer Kollektorfläche von 20 m² und einem Speichervolumen von 1 m³ solare Deckungsgrade ≥ 50 % erreicht werden. Verwendet man bei dieser Anlagenkonfiguration einen vakuumgedämmten Speicher, können bei gleichbleibendem solaren Deckungsgrad (50 %) Kollektorflächen von 7 m² (ideal) bzw. 10 m² (real) eingespart werden.

Beim Passivhaus wird unter Verwendung eines herkömmlich gedämmten idealen bzw. realen Speichers mit einem Nenninhalt von 50 m³ und einer Kollektorfläche von 60 m², theoretisch eine vollständige solare Deckung erreicht. Ersetzt man die konventionelle Dämmung durch eine Vakuumdämmung, würde man einen solaren Deckungsgrad von 100 % bereits mit einer Kollektorfläche von 40 m² erreichen.

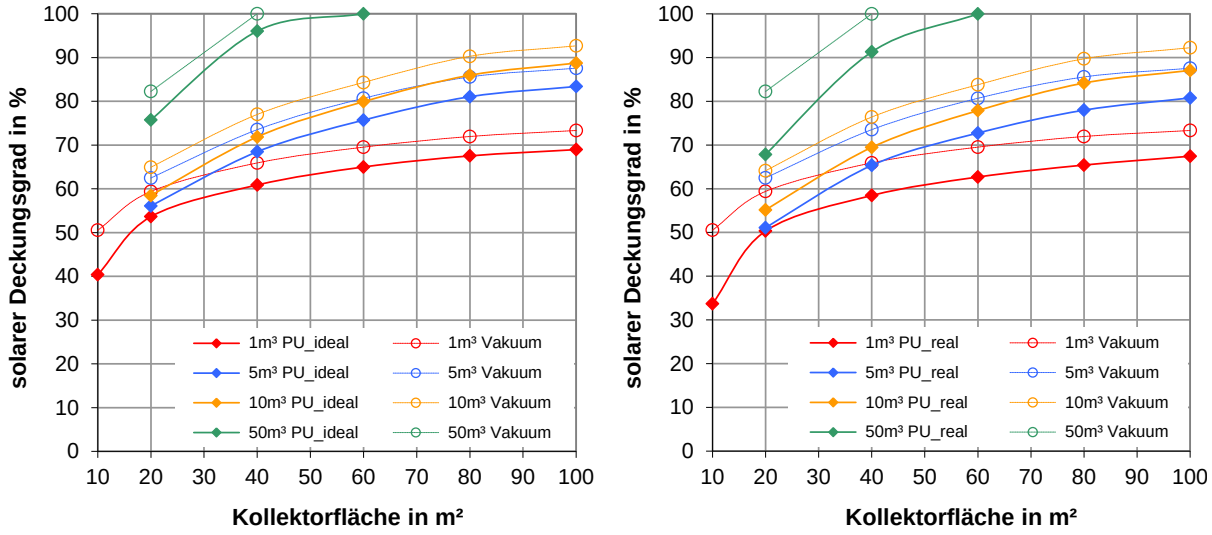

Abbildung 3-10: *Vergleich des solaren Deckungsgrades zwischen vakuumgedämmten Speichern, ideal (links) und real (rechts) gedämmter Speicher in Abhängigkeit der Kollektorfläche und des Speichervolumens für ein Passivhaus*

Wird bei einem Speichervolumen von 5 m³ eine Vakuumdämmung verwendet, sind geringfügig höhere solare Deckungsgrade zu erwarten als mit einem konventionell gedämmten 10 m³ Speicher.

3.2 Planung und Bau einer Laborversion eines Thermoskannenspeichers

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Planung und Auslegung des Thermoskannenspeichers dargestellt.

Abbildung 3-11 und Abbildung 3-12 zeigt die ausgewählte Konstruktionsvariante der Laborversion des Thermoskannenspeichers im Aufriss und in einer 3D-Ansicht inklusive der Anschlüsse und Schichtladeeinheiten im Inneren des Speichers.

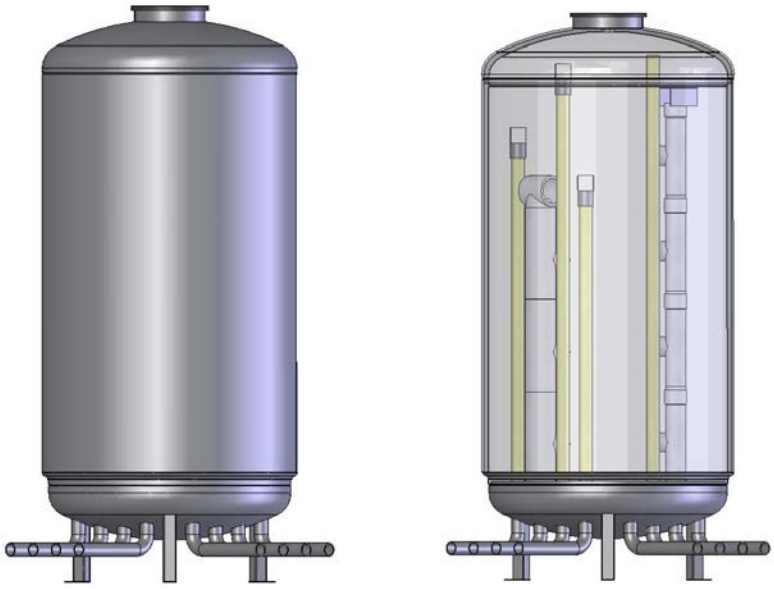

Abbildung 3-11: Aufriss der ausgewählten Konstruktionsvariante der Laborversion des Thermoskannenspeichers mit 1.000 L Speicherinhalt

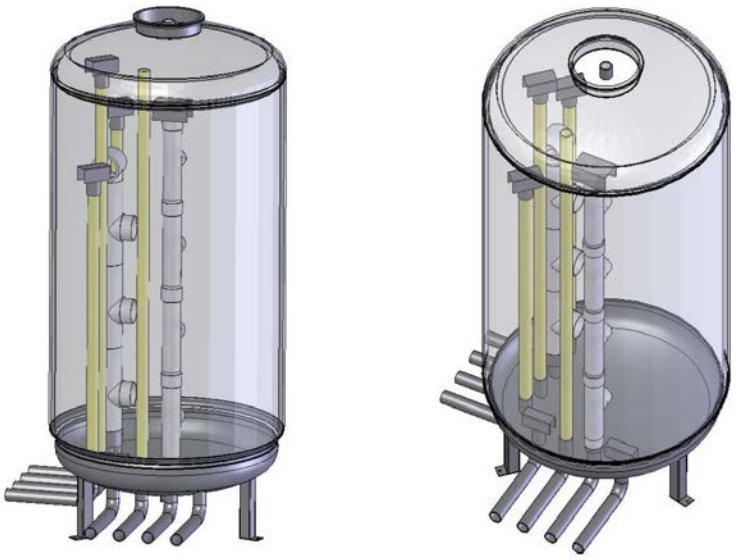

Abbildung 3-12: 3D-Ansicht einer der ausgewählten Konstruktionsvariante der Laborversion des Thermoskannenspeichers mit 1.000 L Speicherinhalt

Der Bau der Laborversionen des Speichers erfolgte mit 675 L Speicherinhalt bei der Fa. Pink. Die Ausstattung des Speichers mit der Vakuumdämmung erfolgte bei JOANNEUM RESEARCH. Dazu wurde der Spalt zwischen Innen- und Außenbehälter (Vakuumspalt) mit dem Füllmaterial HDK T30 befüllt (siehe Abbildung 3-13).

Abbildung 3-13: *Befüllung des Thermoskannenspeichers am Technikum von JOANNEUM RESEARCH in Graz (rechtes Bild: Befüllöffnung an der Oberseite des Speichers, linkes Bild: Befüllvorgang mit Hilfe eines Rüttlers der Fa. Wacker)*

Als Referenzspeicher wurden zwei idente Standardspeicher mit einer PU-Weichschaumdämmung bzw. einer speziell gefertigten Vakuumdämmung (VIP`s) der Fa. va-Q-tec AG verwendet (siehe Abbildung 3-14).

Abbildung 3-14: Thermoskannenspeicher (links), Referenzspeicher: Standardspeicher mit PU-Weichschaumdämmung (mitte), Standardspeicher mit VIP`s (rechts)

Basierend auf den theoretisch ermittelten Werten (siehe Kapitel 3.1) wurden die Laborversionen mit einem Nenninhalt von 675 L gefertigt. Der konventionell gedämmte Speicher mit PU-Weichschaumdämmung soll hierbei den idealen Fall aus den Simulationen repräsentieren und weist eine Dämmstärke von 100 mm auf. Der Standardspeicher mit VIP's wurde zum direkten Vergleich unterschiedlich ausgeführter Vakuumdämmungen herangezogen. Bei den VIP's handelt es sich um insgesamt 9 vorgebogene Paneele, welche direkt auf den Speichermantel angebracht wurden. Ein Nachteil bei dieser Dämmvariante sind die Zwischenräume zwischen den Paneelen, welche zu erhöhten Wärmeverlusten führen. Die Dämmstärke der verwendeten VIP's beträgt 20 mm. Diese drei unterschiedlichen Ausführungsformen der Speicherdämmung wurden messtechnisch untersucht.

3.3 Messungen und Tests

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der Messungen und Tests an den drei Speichern dargestellt.

In der Abbildung 3-15 ist das Auskühlverhalten des vakuumgedämmten Testspeichers mit dem Schüttmaterial HDK T30 dargestellt. Durch die Ermittlung der thermischen Verluste ist es möglich, auf die vorhandene Wärmeleitfähigkeit des Dämmmaterials rückzuschließen.

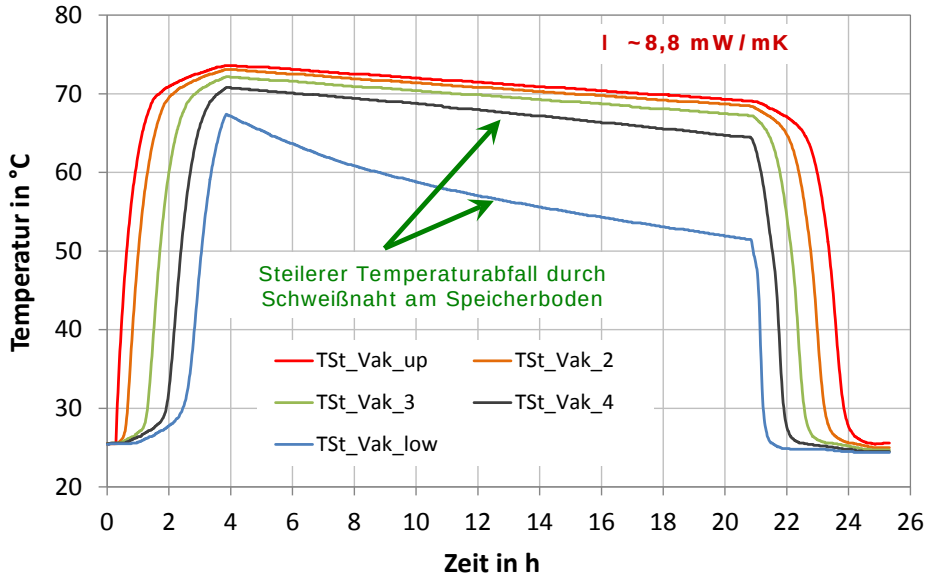

Abbildung 3-15: Auskühlverhalten des vakuumgedämmten Testspeichers

Wie in Abbildung 3-15 ersichtlich, erfolgt ein rascher Abfall der untersten Speichertemperatur (TSt_Vak_Low. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in diesem Bereich der Innen- und Außenmantel des vakuumgedämmten Speichers mit einer Schweißnaht direkt miteinander verbunden sind. Aufgrund dieser Verbindung wird durch Wärmeleitung Energie aus dem Speicher entzogen und an die Umgebung abgeführt. Des Weiteren ist auch die nächst höhere Temperaturschicht (TSt_Vak_4) geringfügig von diesem Effekt betroffen, wie anhand des Temperaturabfalls zu erkennen ist. Auf die oberen Schichten des vakuumgedämmten Speichers hat die Schweißnaht zwischen Innen- und Außenmantel einen geringeren Einfluss.

Von der obersten Temperaturschicht (TSt_Vak_up) bis zur mittleren Schicht (TSt_Vak_3) ist ein gleichmäßiger Temperaturabfall im Speicher vorhanden. Um die tatsächliche Wärmeleitfähigkeit der Dämmung zu ermitteln, werden nur die oberen drei Schichten des vakuumgedämmten Speichers berücksichtigt. Dieser Bereich des Testspeichers wird deshalb herangezogen, da hier der Einfluss der Schweißnaht im unteren Bereich des Speichers sehr gering ist. Aufgrund von Naturzirkulation und Wärmeleitung entlang der inneren Speicherwand kann der Einfluss der Schweißnaht nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Beim durchgeführten Auskühlversuch wird eine Wärmeleitfähigkeit von etwa 8,8 mW/(m*K) ermittelt. Die gemessene Wärmeleitfähigkeit ist deutlich höher als theoretisch berechnete (siehe Tabelle 3-4).

Aufgrund von Lieferengpässen des Materials HDK N20 der Firma Wacker Chemie AG, welches für die theoretisch ermittelten Werte herangezogen wurde, musste beim

vakuumgedämmten Testspeicher das Schüttmaterial HDK T30 verwendet werden. Der Unterschied der beiden Materialien besteht darin, dass bei HDK N20 ein IR-Trüber zur Unterbindung des Strahlungsaustausches eingesetzt wird und bei HDK T30 nicht. Aufgrund dieser Tatsache, verschlechtert sich durch den Einsatz von HDK T30 die theoretische Wärmeleitfähigkeit von 0,003 W/(m*K) (HDK N20) auf 0,006 W/(m*K). Für die Untersuchungen der grundsätzlichen Wirkungsweise eines Schüttmaterials im Vakuum stellt dies allerdings keine Probleme dar.

Ein weiterer Punkt bei den Untersuchungen war das Schichtungsverhalten beim Be- und Entladen, welches in der Abbildung 3-16 dargestellt ist.

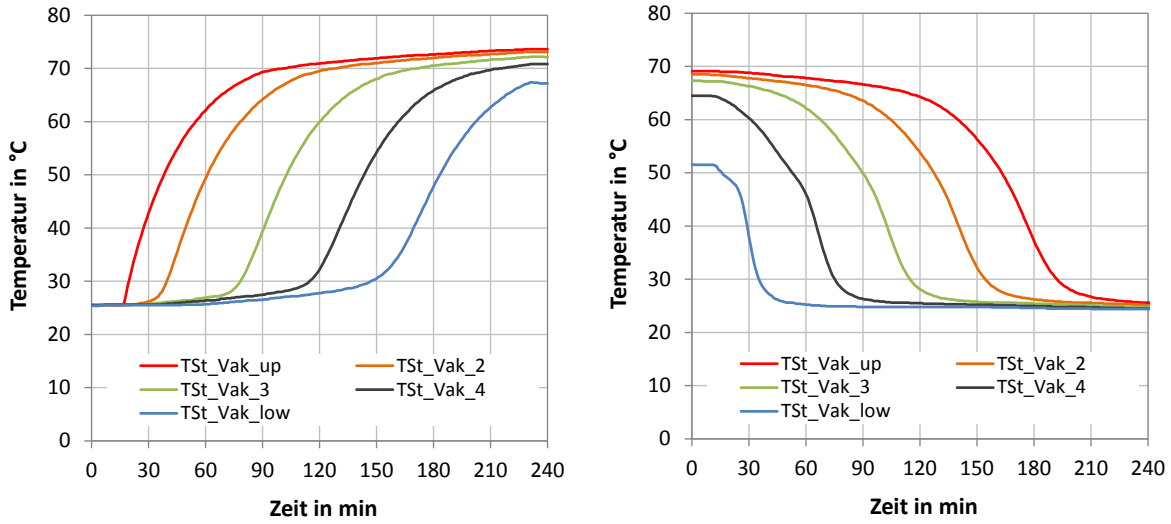

Abbildung 3-16: Schichtungsverhalten des vakuumgedämmten Testspeichers beim Beladevorgang (links) und Entladevorgang (rechts)

Durch die Verwendung einer Schichtladelanze wird gewährleistet, dass sich der vakuumgedämmte Speicher von oben nach unten erwärmt (Abbildung 3-16, links). Erst wenn die oberste Schicht (TSt_Vak_up) die entsprechende Temperatur erreicht hat, beginnt sich die Schicht darunter (TSt_Vak_2) zu erwärmen. Dies erfolgt Schicht für Schicht, bis der Speicher komplett durchgeladen ist, d.h. wenn die Ein- und Austrittstemperatur des Speichers gleich groß ist.

Der Temperaturabfall der sich zwischen den beiden Grafiken in Abbildung 3-15 beim Be- und Entladen ergibt, ist auf das Auskühlverhalten des vakuumgedämmten Speichers zurückzuführen und wurde bereits durch Abbildung 3-15 dargestellt. Wie aus Abbildung 3-16 (rechts) hervorgeht, wird zuerst warmes Medium aus dem oberen Bereich des Speichers entnommen. Die oberen Schichten werden nicht durchmischt, wodurch ein entsprechend hohes Temperaturniveau während des Entladungsvorganges bestehen bleibt. Während die Entnahme an der obersten Stelle des Speichers stattfindet, wird im unteren Bereich des Speichers kaltes Medium nachgespeist. Deutlich zu erkennen ist, dass die hohen Temperaturen im oberen Bereich des Speichers beinahe 2,5 h erhalten bleiben, ehe die

letzten Energiemengen auf hohem Temperaturniveau aus dem vakuumgedämmten Speicher entnommen werden.

Um Problemstellen des vakuumgedämmten Testspeichers mit Schüttmaterial identifizieren zu können, wurden Aufnahmen mit einer Thermographiekamera durchgeführt und in Abbildung 3-17 dargestellt. Generell werden durch den roten Farbverlauf hohe Oberflächentemperaturen (max. 50 °C) visualisiert, während die Farbe Blau geringe Temperaturen (min. 25 °C) wiedergibt. Sämtliche Bereiche in Weiß zeigen ein Temperaturniveau von rund 35 °C.

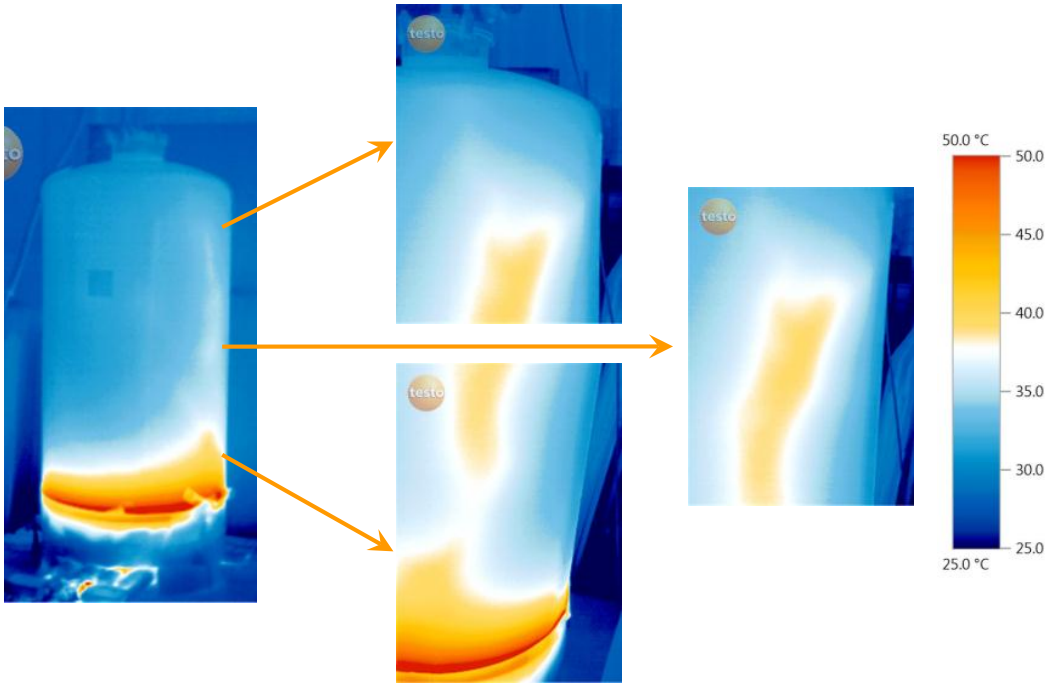

Abbildung 3-17: Thermographie-Aufnahmen des vakuumgedämmten Speichers

Wie ersichtlich verursacht die Schweißnaht zwischen Innen- und Außenmantel des vakuumgedämmten Speichers sehr hohe Wärmeverluste und dadurch auch hohe Oberflächentemperaturen. Des Weiteren wird im Außenmantel die abstrahlende Oberfläche zusätzlich noch durch die Wärmeleitung im Stahlmantel vergrößert. Dies ist deutlich durch den Rot-Orangen Bereich im unteren Teil des Testspeichers zu erkennen. In diesem Bereich liegen die Oberflächentemperaturen zwischen 40 und 50 °C. Direkt an der Schweißnaht herrscht folglich die höchste Temperatur, welche mit größerer Entfernung zur Schweißnaht abnimmt.

Neben dem Problem der thermischen Verluste durch die Schweißnaht ist auch eine erhöhte Oberflächentemperatur über die Höhe des Außenmantels zu erkennen (Abbildung 3-17, links). Anhand der Detailaufnahme ist zu erkennen, dass in diesen Bereichen Oberflächentemperaturen von 35 bis etwa 40 °C erreicht werden. Aufgrund dieser hohen Temperaturen resultieren entsprechende thermische Verluste. Ein Grund hierfür kann eine ungleichmäßige Verteilung des Schüttmaterials sein, wodurch die thermischen Verluste infolge des Strahlungsaustausches zwischen Innen- und Außenmantel ansteigen. Wie sich

die erwähnten Schwachstellen des vakuumgedämmten Testspeichers auf die Wärmeleitfähigkeit auswirken ist der Tabelle 3-4 zu entnehmen.

Tabelle 3-4: *Vergleich der unterschiedlichen Dammvarianten zwischen Literatur (Theorie) und die Messung am Versuchstand*

Dämmmaterial		Schüttung	Standard	VIP's
Theorie	[mW/m*K]	6,0	35-45	3,5
Messung	[mW/m*K]	8 – 10	39 – 44	9 – 11

3.4 Techno-ökonomische und ökologische Bewertung

3.4.1 Technische Bewertung

Im Vergleich zu konventionellen Speichern hat ein ThermosTank in technischer Hinsicht folgende technische Vor- und Nachteile:

Technische Vorteile:

- Kleinere Bauweise bei gleichem Speichervolumen (durch geringere Dämmstärke)
- Geringere Wärmeverluste bei gleichem Speichervolumen und gleichen Abmessungen
- bessere Dämmung durch Vermeidung der sogenannten Kaminwirkung bei konventioneller Dämmung
- Keine konventionellen (u. U. umweltbelastende) Dämmstoffe erforderlich
- vorgefertigtes Produkt daher gleichbleibende Qualität der Dämmung

Technische Nachteile:

- Aufwendigere Herstellung
- Höhere Wandstärken (wegen statischer Beanspruchung durch den Umgebungsluftdruck)
- Eventuell Dichtigkeit (Die Beständigkeit des Vakuums muss über viele Jahre gewährleistet sein. Dazu liegen derzeit für den ThermosTank noch keine Langzeiterfahrungen vor, eventuell ist eine periodische Wiederherstellung des Vakuums erforderlich)

3.4.2 Ökonomische Bewertung

In diesem Kapitel sind die Ergebnisse der ökonomischen Bewertung für ausgewählte Szenarien dargestellt.

Für das Passivhaus sind dies folgende Szenarien:

- Variante PH 1: PU-Speicher 1 m³, Kollektorfläche 20 m²: Solarer Deckungsgrad ca. 50 %
- Variante PH 2: PU-Speicher 5 m³, Kollektorfläche 40 m²: Solarer Deckungsgrad ca. 65 %
- Variante PH 1a: ThermosTank 1 m³, reduzierte Kollektorfläche von 20 auf 10 m² (siehe Abbildung 3-18): Solarer Deckungsgrad ca. 51 %, Reduktion der Investitionskosten um ca. 1.600 EURO
- Variante PH 2a: ThermosTank 5 m³, reduzierte Kollektorfläche von 40 auf 24 m² (siehe Abbildung 3-18): Solarer Deckungsgrad ca. 65 % Reduktion der Investitionskosten um ca. 2.300 EURO
- Variante PH 2b: ThermosTank 1 m³, Kollektorfläche unverändert 40 m²: Solarer Deckungsgrad ca. 65 % (siehe Abbildung 3-18), Reduktion der Investitionskosten um ca. 1.800 EURO

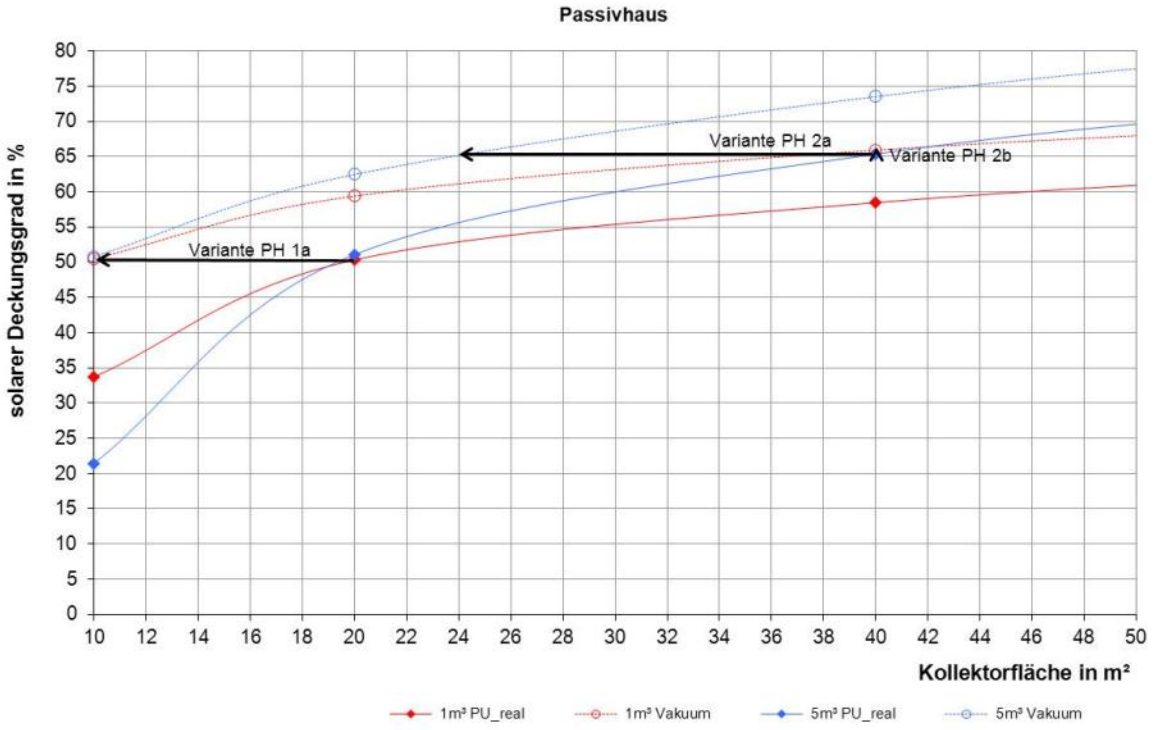

Abbildung 3-18: Solarer Deckungsgrad beim Passivhaus in Abhängigkeit von Kollektorfläche und Speicher

Für das Niedrigenergiehaus sind dies folgende Szenarien:

- Variante NEH 1: PU-Speicher 1 m³, Kollektorfläche 20 m²: Solarer Deckungsgrad ca. 29 %
- Variante NEH 2: PU-Speicher 5 m³, Kollektorfläche 40 m²: Solarer Deckungsgrad ca. 45 %

- Variante NEH 1a: ThermosTank 1 m³, reduzierte Kollektorfläche von 20 auf 12 m² (siehe Abbildung 3-19): Solarer Deckungsgrad ca. 29 %, Reduktion der Investitionskosten um ca. 1.000 EURO
- Variante NEH 2a: ThermosTank 5 m³, reduzierte Kollektorfläche von 40 auf 30 m² (siehe Abbildung 3-19): Solarer Deckungsgrad ca. 45 %, Reduktion der Investitionskosten um ca. 500 EURO
- Variante NEH 2b: ThermosTank 1 m³, Kollektorfläche unverändert 40 m²: Solarer Deckungsgrad ca. 42 % (siehe Abbildung 3-19), Reduktion der Investitionskosten um ca. 1.800 EURO

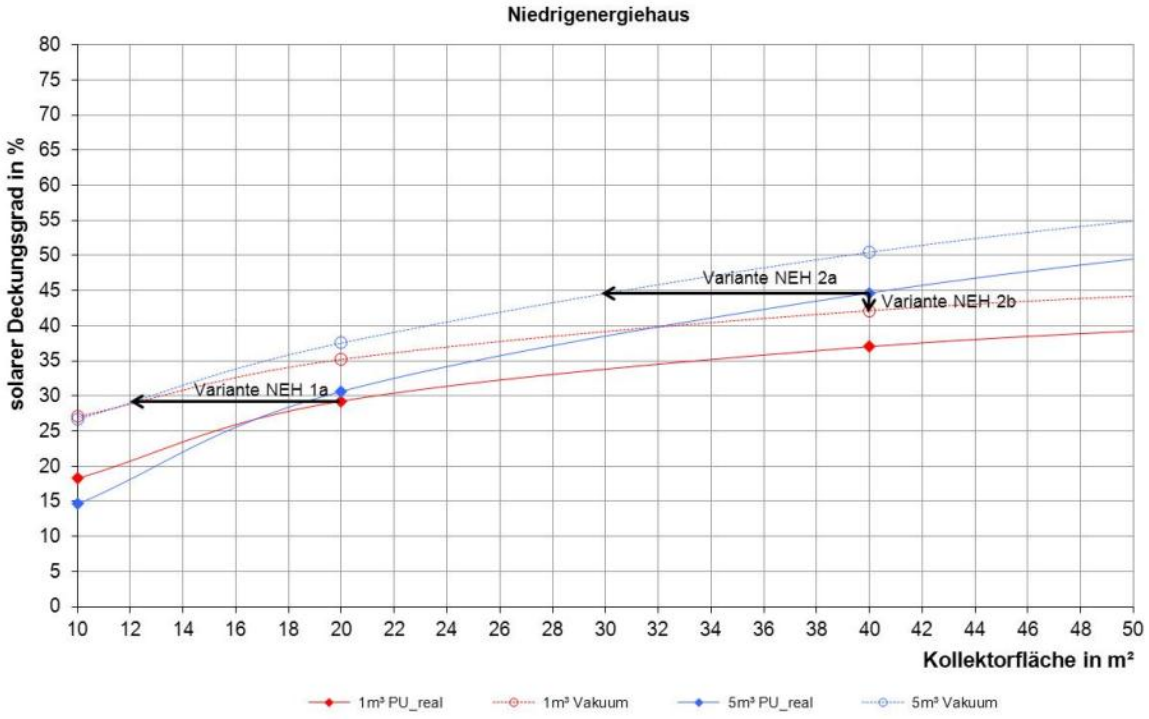

Abbildung 3-19: Solarer Deckungsgrad beim Niedrigenergiehaus in Abhängigkeit von Kollektorfläche und Speicher

Folgende Investitionskosten werden angenommen:

Speicher:

- PU-Speicher 1 m³: EURO 1.600,-
- PU-Speicher 5 m³: EURO 4.800,-
- TT-Speicher 1 m³: EURO 3.000,-
- TT-Speicher 5 m³: EURO 7.300,-

Kollektoren inklusive Montage:

- Kollektor pro m²: EURO 300,-

Die vorgenommenen ökonomischen Betrachtungen sind deshalb auf Neuanlagen beschränkt weil bei bestehenden Anlagen bzw. bei einer Erneuerung / Nachrüstung bestehender Anlagen die Rahmenbedingungen so unterschiedlich sind, dass ein objektiver Vergleich nicht möglich ist. Beispielsweise sind hier einige Möglichkeiten davon angeführt:

a) nur die Kollektoren sind zu erneuern, erweitern bzw. reduzieren;
b) nur der Speicher ist zu erneuern und durch einen gleichen, größeren oder kleineren zu ersetzen bzw. anstatt des zu ersetzenden Speichers einen anderen Speicher (z.B. ThermosTank) zu verwenden;
c) die gesamten bzw. von Teile der Warmwasser- und Raumwärmeversorgung sind zu erneuern (z. B. Umstellung von Öl- auf Pelletfeuerung).

Wie leicht zu erkennen ist ergeben sich alleine aus den oben angeführten Beispielen eine Vielzahl von Möglichkeiten welche jede für sich einer ökonomischen Betrachtung unterzogen werden müsste.

Generell kann gesagt werden, dass wenn nur der Speicher getauscht wird und dieser durch einen ThermosTank gleicher Größe ersetzt wird, der solare Deckungsgrad steigt, bzw. bei gleichem solaren Deckungsgrad ein kleiner ThermosTank eingesetzt werden kann. Für ökonomische Betrachtungen in diesen Fällen ist entscheidend ob die durch den höheren Solaren Deckungsgrad vermiedenen Brennstoffkosten die höheren Investitionskosten eines ThermosTanks ausgleichen werden können bzw. ob ein kleinerer ThermosTank kostengünstiger als ein größerer konventioneller Speicher ist.

Zusammenfassend wird festgestellt, dass bei Neuanlagen durch den Einsatz eines ThermosTanks anstelle eines konventionellen Speichers mit einer Reduktion der Investitionskosten zwischen 500 EURO (Variante NEH 2a) und 2.300 EURO (Variante PH 2a) zu rechnen ist. Die Daten aller betrachteten Varianten sind in Tabelle 3-5 enthalten.

Tabelle 3-5: Zusammenstellung der Daten aller betrachteten Varianten

Investitionskosten

Speicher	€
PU 1 m³	1.600
PU 5 m³	4.800
TT 1 m³	3.000
TT 5 m³	7.300
Kollektor	€/m²
Kollektor incl. Montage	300

Passivhaus

	Koll. (m²)	Speicher	SD (%)
Variante PH 1	20	PU 1 m³	50
Variante PH 2	40	PU 5 m³	65
Reduktion Kollektorfläche	auf m²	Speicher	delta m²
Variante PH 1a	10	TT 1 m³	-10
Variante PH 2a	24	TT 5 m³	-16
Variante PH 2b	40	TT 1 m³	0
delta Investitionskosten	Koll. (€)	Spei. (€]	**Gesamt (€)**
Variante PH 1a	-3.000	1.400	**-1.600**
Variante PH 2a	-4.800	2.500	**-2.300**
Variante PH 2b	0	-1.800	**-1.800**

Niedrigenergiehaus

	Koll. (m²)	Speicher	SD (%)
Variante NEH 1	20	PU 1 m³	29
Variante NEH 2	40	PU 5 m³	45
Reduktion Kollektorfläche	auf m²	Speicher	delta m²
Variante NEH 1a	12	TT 1 m³	-8
Variante NEH 2a	30	TT 5 m³	-10
Variante PH 2b	40	TT 1 m³	0
delta Investitionskosten	Koll. (€)	Spei. (€]	**Gesamt (€)**
Variante NEH 1a	-2.400	1.400	**-1.000**
Variante NEH 2a	-3.000	2.500	**-500**
Variante NEH 2b	0	-1.800	**-1.800**

3.4.3 Ökologische Bewertung

In diesem Abschnitt sind Ergebnisse der ökologischen Bewertung für ausgewählte Wärmebereitstellungsvarianten dargestellt. Die Bewertung erfolgte hinsichtlich der THG-Emissionen für thermische Speicher. Die gesammelten Ergebnisse sind im ANHANG Kapitel 6.3 angeführt.

3.4.3.1 Speicherherstellung und -entsorgung

In Abbildung 3-20 sind die Treibhausgasemissionen die mit der Herstellung und Entsorgung eines 1.000 L Standardspeichers mit Weichschaumdämmung (Standard PU) und eines 1.000 L Thermoskannenspeichers (Vakuum) verbunden sind ersichtlich.

Bei beiden Systemen hat der eingesetzte Stahl den größten Beitrag an den gesamten Treibhausgasemissionen. Beim Standard PU-Speicher fallen 81 % der gesamten Treibhausgasemissionen auf den eingesetzten Stahl, beim Vakuum-Speicher 93 %. Insgesamt sind Treibhausgasemissionen für die Herstellung des Thermoskannenspeichers mit 665 kg CO_2-Äq. ca. 1,7-mal so hoch wie die Treibhausgasemissionen des Standardspeichers mit 380 kg CO_2-Äq. Die höheren Treibhausgasemissionen des Thermoskannenspeichers entstehen durch den doppelt so hohen Stahleinsatz für die Doppelmantel-Konstruktion. Abbildung 3-21 zeigt die Treibhausgasemissionen der Herstellung für ein Speichervolumen von 5.000 L. Die spezifischen Treibhausgasemissionen verringern sich durch das größere Speichervolumen von 0,38 kg/L bei 1.000 L auf 0,23 kg/L bei 5.000 L Speicher für den Standard PU-Speicher und von 0,67 kg/L bei 1.000 L auf 0,41 kg/L bei 5.000 L für den Vakuum-Speicher.

In Abbildung 3-22 ist das Ergebnis für den kumulierten Energieaufwand des Standard PU-Speichers und des Vakuum-Speichers für ein Speichervolumen von 1.000 L dargestellt. Die Ergebnisse für den kumulierten Energieaufwand sind analog zu den Ergebnissen für die Treibhausgasemissionen. Auf Grund des höheren Stahleinsatzes ist der kumulierte Energieaufwand des Thermoskannenspeichers um 1.230 kWh höher. Der fossile Anteil am kumulierten Energieaufwand beträgt für beide Speicher-Typen 84 %.

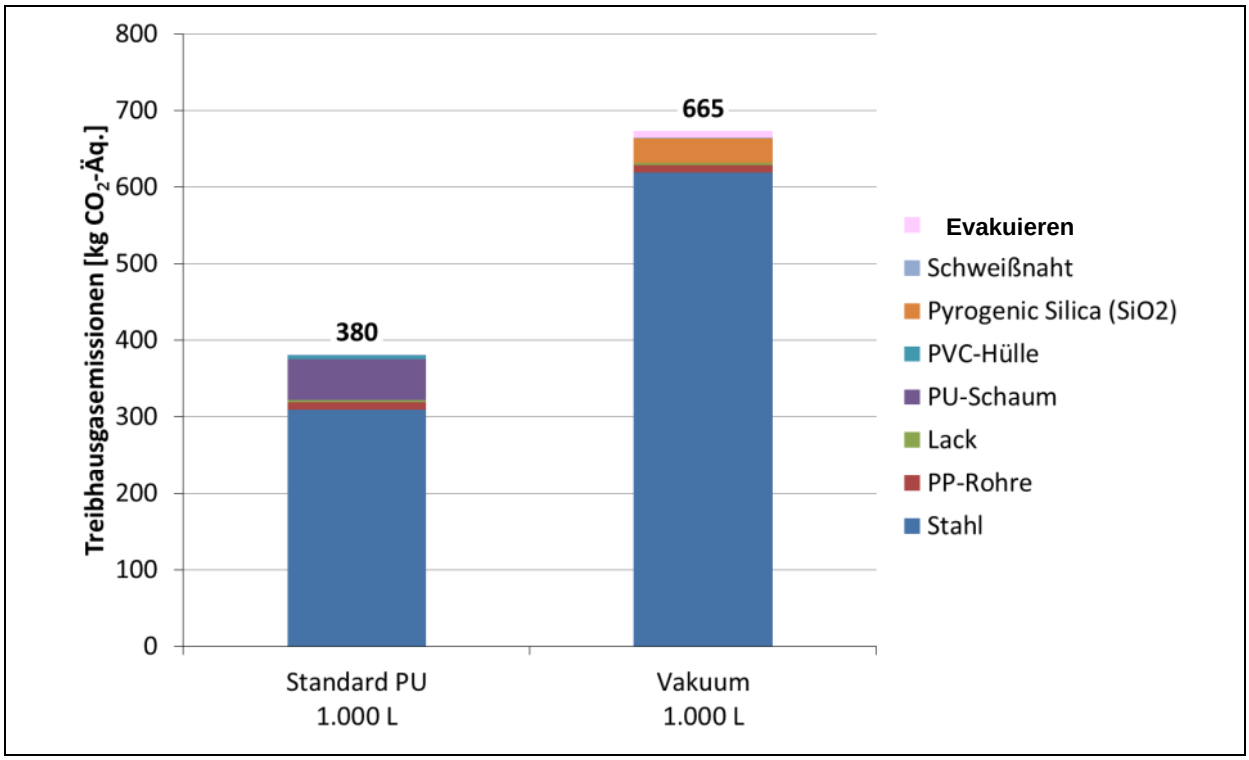

Abbildung 3-20: *Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Entsorgung eines 1.000 L Standardspeichers mit Weichschaumdämmung (Standard PU) und eines 1.000 L Thermoskannenspeichers (Vakuum)*

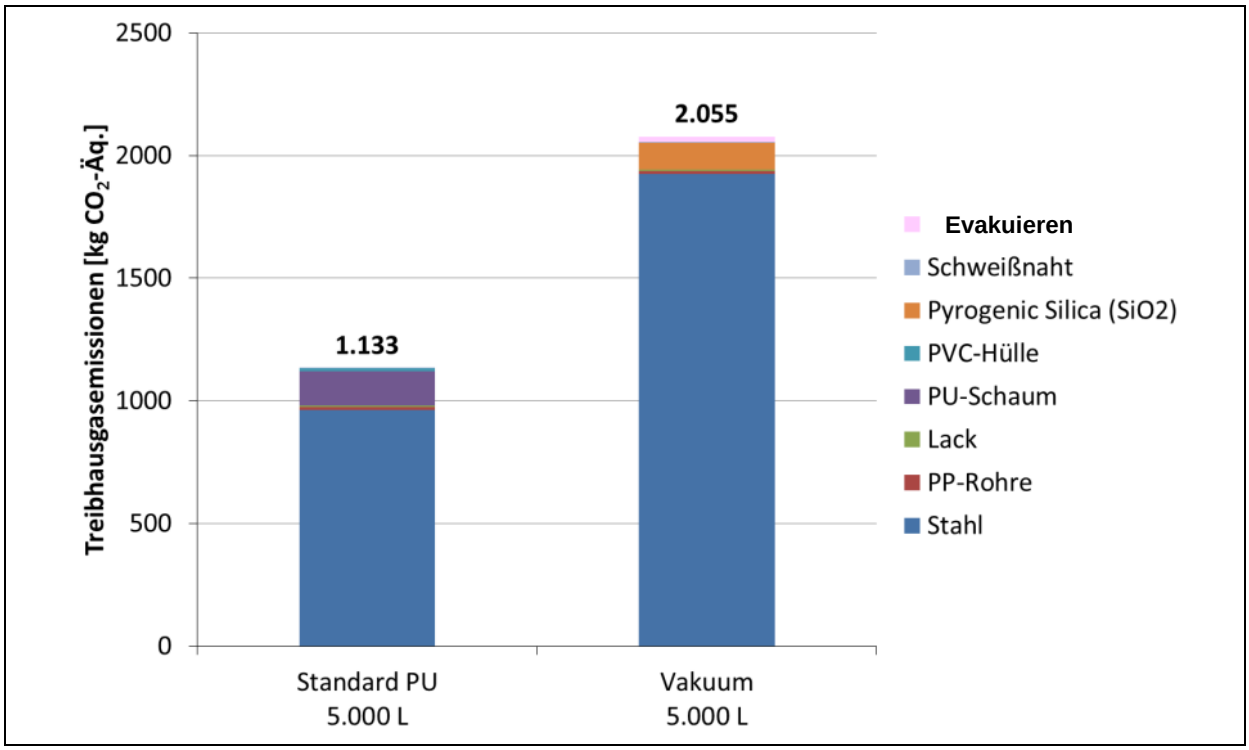

Abbildung 3-21: *Treibhausgasemissionen für die Herstellung und Entsorgung eines 5.000 L Standardspeichers mit Weichschaumdämmung (Standard PU) und eines 5.000 L Thermoskannenspeichers (Vakuum)*

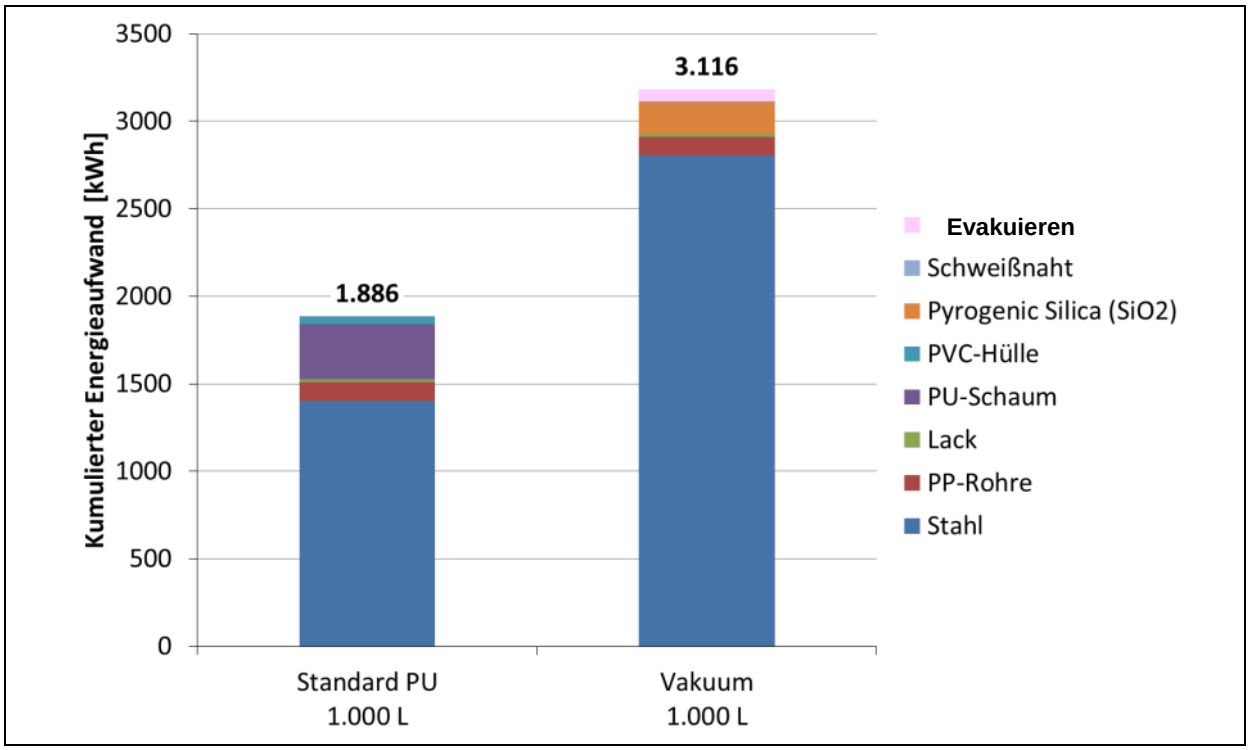

Abbildung 3-22: Kumulierter Energieaufwand für die Herstellung und Entsorgung eines 1.000 L Standardspeichers mit Weichschaumdämmung (Standard PU) und eines 1.000 L Thermoskannenspeichers (Vakuum)

3.4.3.2 Wärmebereitstellung

Für eine vollständige ökologische Bewertung der thermischen Speicher wird das gesamte Wärmebereitstellungssystem betrachtet, in das der thermische Speicher eingebunden ist.

Die hier dargestellten Ergebnisse beziehen sich auf theoretische λ-Werte der Speicher, die auf Basis von Literaturdaten und Berechnung bestimmt wurden. Die auf Basis der Messungen (siehe Kapitel 3.3) an den Laborversionen bestimmten λ-Werte decken sich mit den theoretischen λ-Werte für Standard-PU-Speicher. Beim Thermoskannenspeicher konnten die theoretischen Werte in den praktischen Versuchen bei der entwickelten Laborversion noch nicht erreicht werden. Für die ökologische Bewertung erscheint es jedoch sinnvoller das zukünftige Potential eines marktreifen Produkts zu bewerten, weshalb von den theoretischen λ-Werten ausgegangen wird.

Abbildung 3-23 zeigt die Treibhausgasemissionen für die Bereitstellung von 1 kWh Nutzwärme aus einer Solaranlage in Kombination mit einem Ölkessel für einen idealen, einen realen 1.000 L Standard-PU-Speicher und einen 5.000 L Vakuumspeicher.

Für die Wärmebereitstellung mit einem realen Standard-PU-Speicher betragen die Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung 266 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$, mit einem ideal Standard-PU-Speicher 256 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$ und einem Thermoskannenspeicher 241 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$. Im Vergleich zum realen Standard-PU-Speicher reduzieren sich

die Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung durch den Einsatz des Thermoskannenspeichers um ca. 9 %.

Den größten Anteil an den Treibhausgasemissionen hat die - neben der Solaranlage zusätzlich benötigte - Wärmeerzeugung mit dem Ölkessel. Das Nachheizsystem Öl macht zwischen ca. 97 % der gesamten Treibhausgasemissionen aus. Die Herstellung und Entsorgung des Speichers macht in allen drei Fällen nur einen sehr geringen Anteil an den Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung aus.

Wird die Wärme ausschließlich mit einem Ölkessel erzeugt, erhöhen sich die Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung auf 393 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$ für den realen Standard-PU-Speicher, auf 376 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$ für den idealen Standard-PU-Speicher und auf 350 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$ für den Thermoskannenspeicher (Abbildung 3-24). Die Einsparung des Thermoskannenspeichers beträgt 11 % im Vergleich zum realen Standard-PU-Speicher.

Abbildung 3-25 zeigt die Treibhausgasemissionen für die Gleiche Solarkombianlage wie zuvor (1000 L Speicher, 10 m² Solarkollektorfläche) jedoch wird an Stelle des Ölkessels ein Pelletkessel für die Nachheizung verwendet. Die Treibhausgasemissionen reduzieren sich dadurch auf 53 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$ für den realen und idealen Standard-PU-Speicher, und auf 51 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$ für den Thermoskannenspeicher. Auch bei 100 %-iger Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energieträgern ist der Anteil der Herstellung und Entsorgung der thermischen Speicher an den gesamten Treibhausgasemissionen gering. Für den Thermoskannenspeicher beträgt der Anteil 5 %, für den realen und den idealen Standard-PU-Speicher 3 %.

In Abbildung 3-26 ist der kumulierte Energieaufwand für die Bereitstellung von 1 kWh Nutzwärme aus einer Solaranlage in Kombination mit einem Ölkessel für 1.000 L Standard-PU-Speicher und 1.000 L Vakuumspeicher dargestellt.

Der kumulierte Energieaufwand für den realen Standard-PU-Speicher beträgt 1,5 $kWh/kWh_{Nutzwärme}$, für den idealen Standard-PU-Speicher 1,4 $kWh/kWh_{Nutzwärme}$ und für den Thermoskannenspeicher 1,3 $kWh/kWh_{Nutzwärme}$. In etwa 70 % des gesamten kumulierten Energieaufwands stammt aus fossilen Energieträgern. Der Anteil der Speicherherstellung und –entsorgung am gesamten kumulierten Energieaufwand beträgt 0,5 % für den realen und idealen Standard-PU-Speicher und 0,9 % für den Thermoskannenspeicher.

Wird für die Nachheizung ein Pelletkessel an Stelle eines Ölkessels eingesetzt erhöht sich der gesamte kumulierte Energieaufwand um 0,2 $kWh/kWh_{Nutzwärme}$ (Abbildung 3-26). Der Anteil fossiler Energieträger am kumulierten Energieaufwand reduziert sich jedoch auf 11 %.

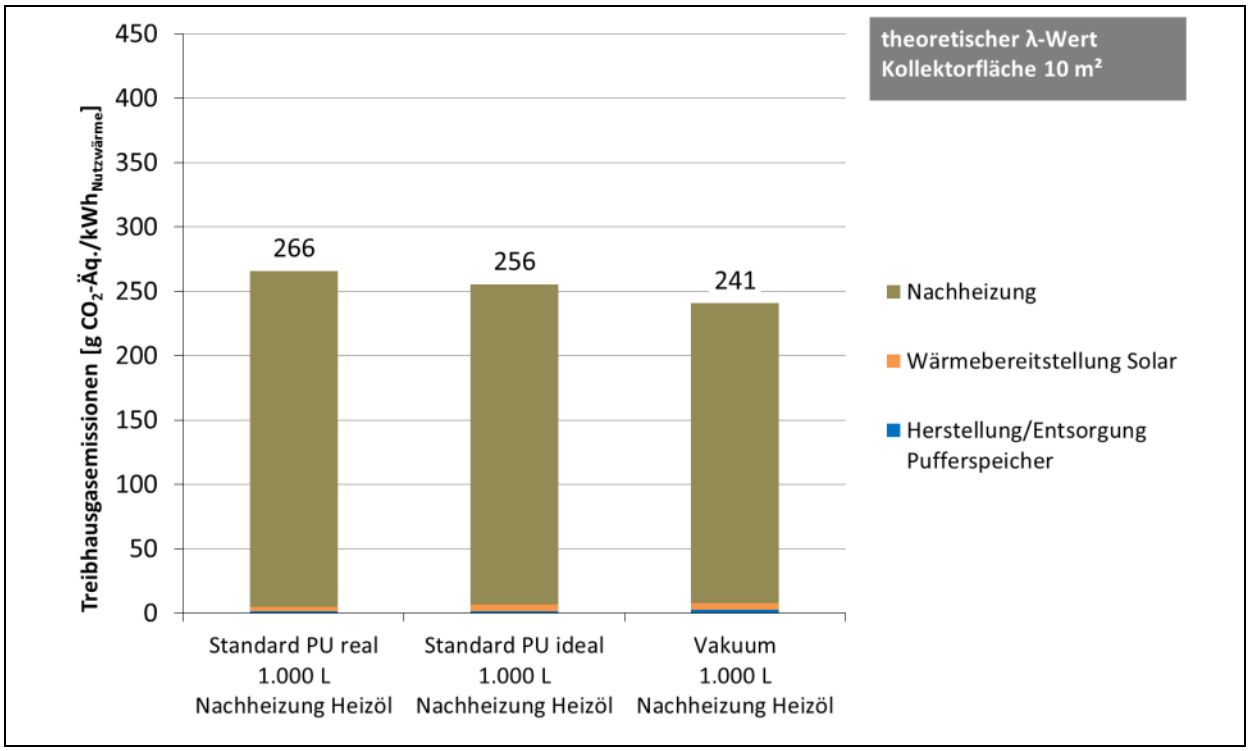

Abbildung 3-23: Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (10 m²) in Kombination mit einem Ölkessel für 1.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch)

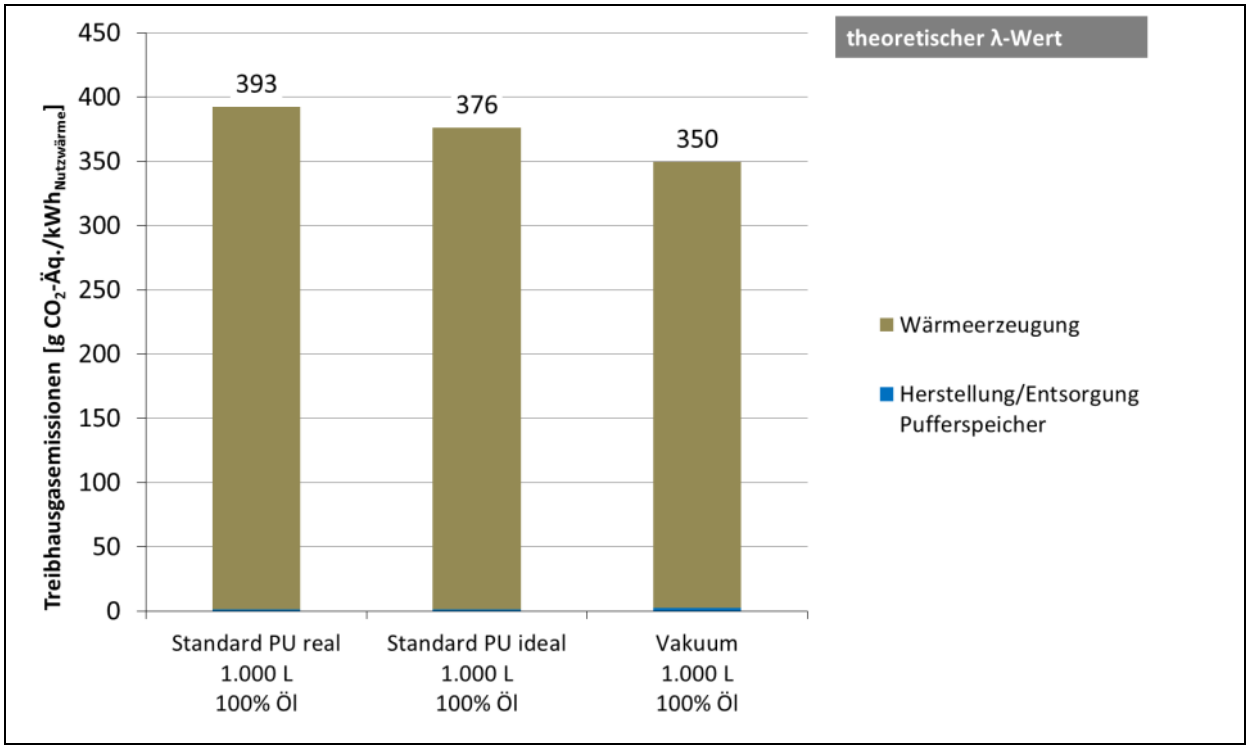

Abbildung 3-24: Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einem Ölkessel für 1.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch)

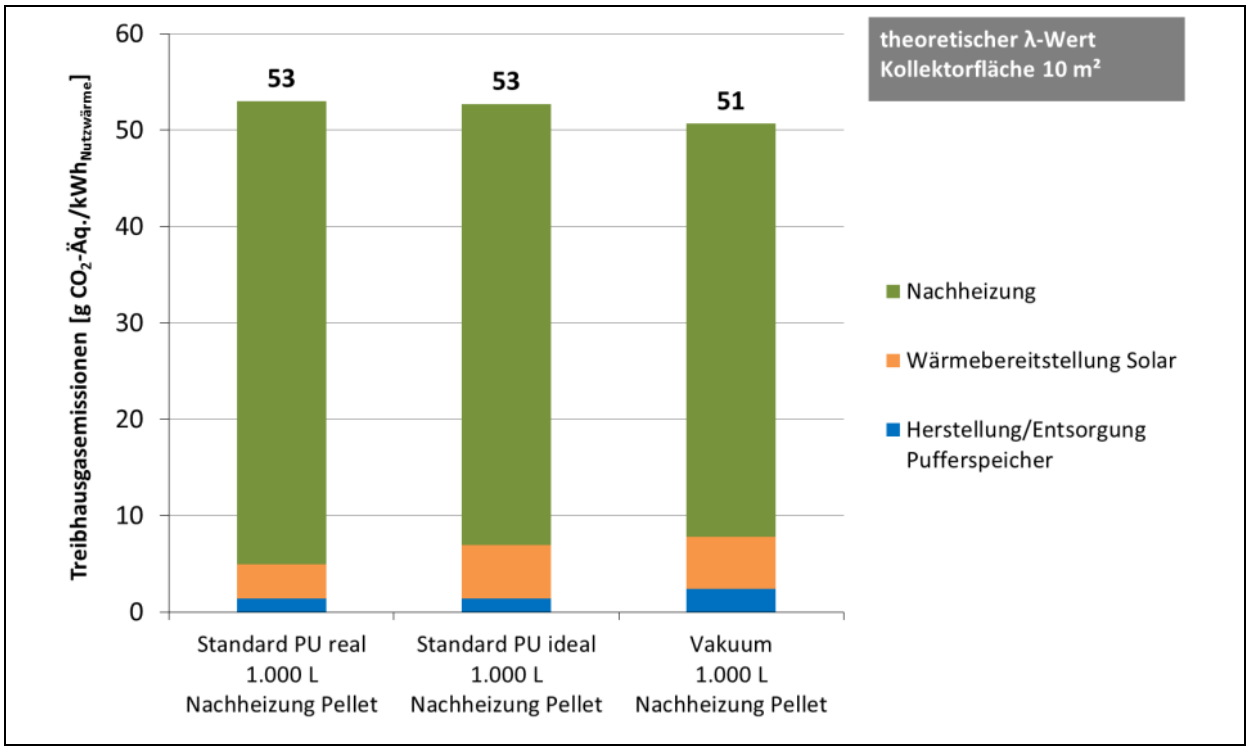

Abbildung 3-25: *Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (10 m²) in Kombination mit einem Pelletkessel für 1.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch)*

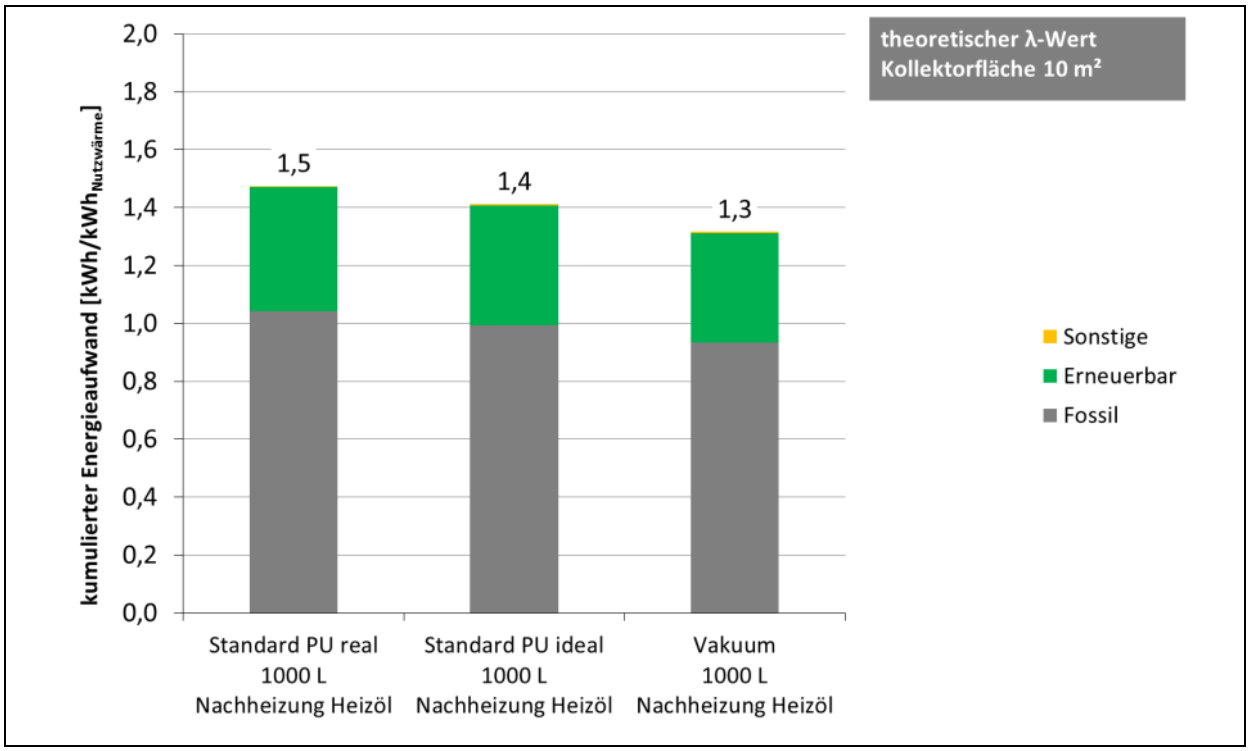

Abbildung 3-26: *Kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (10 m²) in Kombination mit einem Ölkessel für 1.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch)*

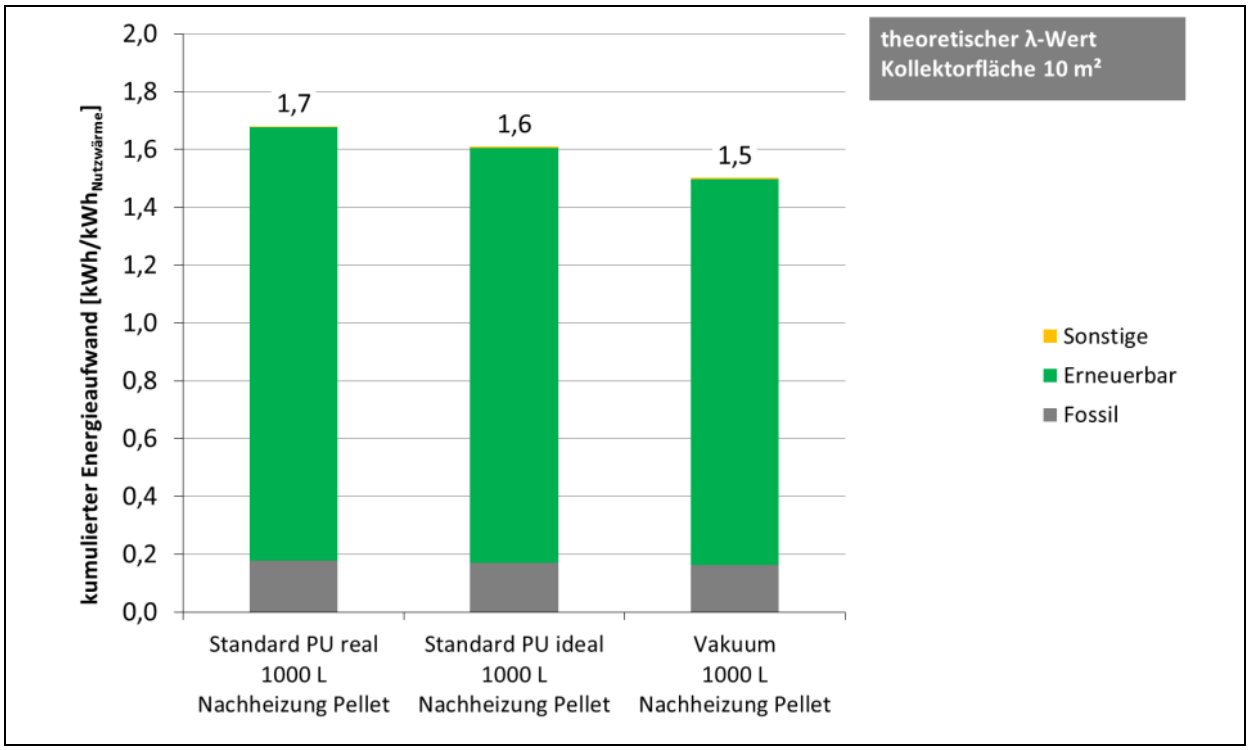

Abbildung 3-27: Kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (10 m²) in Kombination mit einem Pelletkessel für 1.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch)

Abbildung 3-28 und Abbildung 3-29 zeigen Ergebnisse für 5.000 L Speicher. Die Solarkollektorfläche beträgt 40 m² und die Nachheizung erfolgt mit einem Ölkessel. Durch den höheren solaren Deckungsgrad bei dieser Systemkonfiguration (45 % Standard-PU-real, 47 % Standard-PU-ideal, 50 % Vakuum) reduzieren sich die spezifischen Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung auf 199 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$ für den realen Standard-PU-Speicher, auf 191 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$ für den idealen Standard-PU-Speicher und auf 183 g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$ für den Thermoskannenspeicher. Im Vergleich zum realen Standard-PU-Speicher reduziert der Thermoskannenspeicher die Treibhausgasemissionen um 8 %.

In etwa 50 % des gesamten kumulierten Energieaufwands werden aus erneuerbaren Energieträgern bereitgestellt. Der Thermoskannenspeicher reduziert den kumulierten Energieaufwand bei dieser Systemkonfiguration im Vergleich zum realen Standard-PU-Speicher um 15 %.

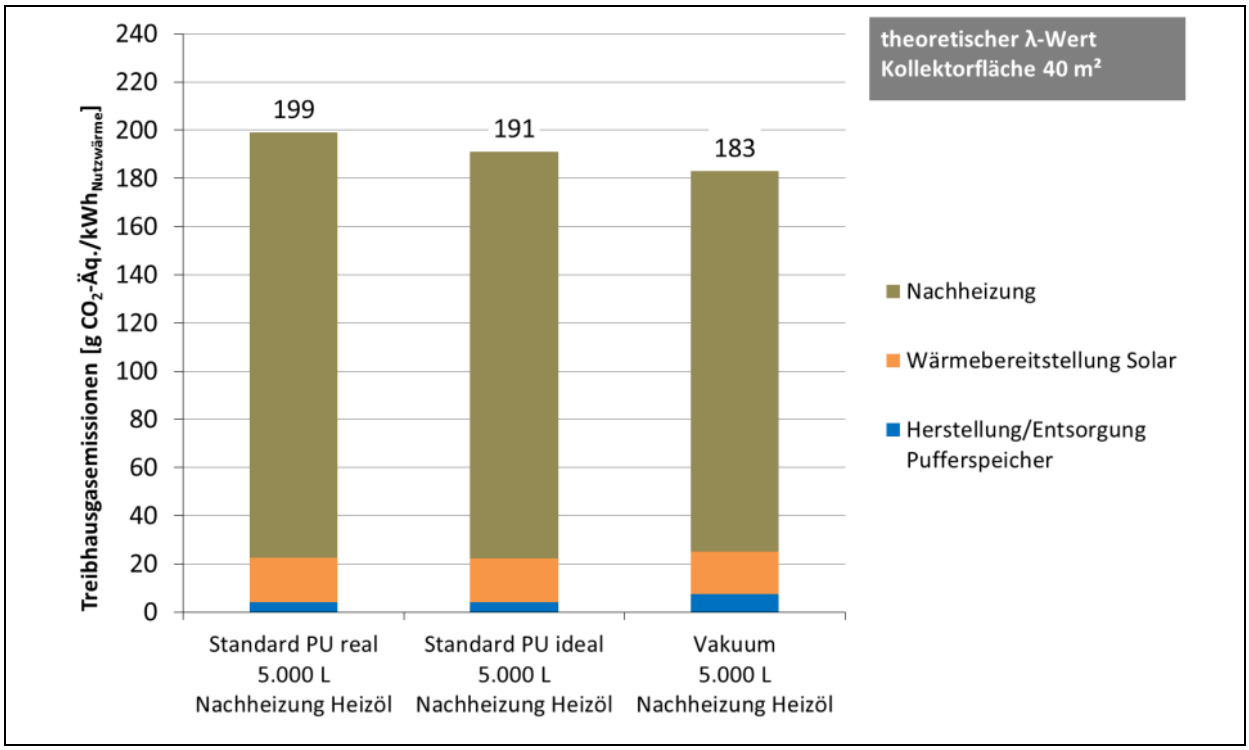

Abbildung 3-28: *Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (40 m²) in Kombination mit einem Ölkessel für 5.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch)*

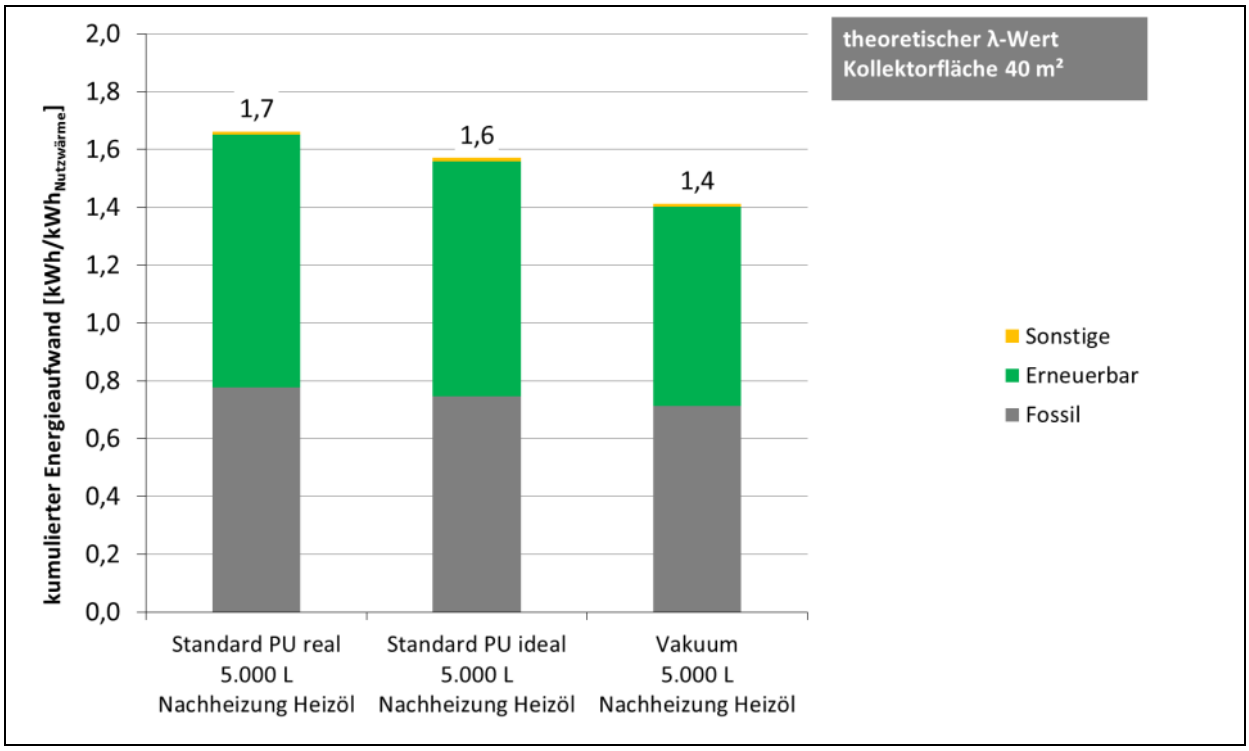

Abbildung 3-29: *Kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einer Solaranlage (40 m²) in Kombination mit einem Ölkessel für 5.000 L Standard- und Thermoskannenspeicher (Vakuum) (λ-Wert theoretisch)*

3.5 Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Arbeiten haben gezeigt, dass der praktische Einsatz von vakuumgedämmten Wärmespeichern (Thermoskannenspeicher) grundsätzlich möglich und sinnvoll ist.

Die theoretischen Berechnungen der Wärmeverluste ergaben, dass durch die Füllung des Vakuumspaltes mit entsprechendem Füllmaterial eine Spaltbreite von nur wenigen Zentimetern erforderlich ist. Die bei der Laborversion am Teststand durchgeführten Messungen zeigten Abweichungen zwischen den berechneten und den gemessen Wärmeverlusten. Diese Abweichung ist einerseits darin begründet, dass bei der Laborversion eine eine optimale Befüllung des Vakuumspaltes mit Schüttmaterial nicht möglich war (Stellen mit wenig oder keinem Schüttmaterial) und anderseits konstruktions- und fertigungsbedingte Gegebenheiten (Verschweißung des Innen- und Außenmantels) zu erhöhten Wärmeverlusten durch Wärmeleitung führten. Außerdem war das für die Berechnungen verwendete Schüttmaterial zum Zeitpunkt der Versuche nicht verfügbar sodass es bei den Versuchen durch ein ähnliches Material ersetzt werden musste.

Die Fertigung eines Thermoskannenspeichers ist mit vertretbarem Aufwand möglich. Wie die durchgeführten techno-ökonomischen Analysen zeigten kann durch den Einsatz eines Thermoskannenspeichers das Speichervolumen (gegenüber einem konventionellen Speicher) verringert werden bzw. bei gleicher Speichergröße der Solare Deckungsgrad erhöht werden. Die höheren Herstellungskosten eines Thermoskannenspeichers werden durch geringere Wärmeverluste bzw. kleinere Solaranlagen mehr als ausgeglichen.

Die ökologischen Analysen hinsichtlich Treibhausgasemissionen und kumuliertem Energieaufwand ergaben ein differenziertes Bild. Die Herstellung und Entsorgung der Laborversion des Thermoskannenspeichers verursacht höhere Treibhausgasemissionen und einen höheren kumulierten Energieaufwand als ein Standard-PU-Speicher. Der wesentliche Grund dafür ist die Doppelmantelkonstruktion aus Stahl. Betrachtet man aber das Gesamtsystem (bestehend aus Wärmespeicher, Solar- und Heizanlage) über die gesamte Nutzungsdauer so sind, bedingt durch die geringeren Wärmeverluste des Thermoskannenspeichers, sowohl die Treibhausgasemissionen als auch der kumulierte Energieaufwand geringer als bei konventionellen Systemen.

Als nächster Schritt ist die Herstellung und der Test eines Prototyps anzustreben. Dazu sind weitere umfangreiche Recherchen hinsichtlich möglicher Schüttmaterialen und deren Handhabung sowie möglicher Materialen, Konstruktionen und Fertigungstechniken für den Speicher selbst anzustellen.

4 Ausblick und Empfehlungen

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass vakuumgedämmte Warmwasserspeicher eine energieeffiziente, wirtschaftliche und ökologisch intelligente Lösung zur Weiterentwicklung der thermischen Warmwasserspeichertechnik darstellen.

Die in diesem Projekt gewonnen Erkenntnisse zeigen weiteren Forschungsbedarf im Bereich der Grundlagenforschung in folgenden Bereichen:

- Geeignete Materialien, Materialkombinationen und Verbindungstechniken für den Speicher zur
    - weiteren Reduktion der Wärmeleitfähigkeit des Speichers und um Wärmeleitung durch konstruktionsbedingte Verbindungen zwischen Behälterinnenwand und Behälteraußenwand zu vermeiden bzw. auf ein Minimum zu reduzieren;
    - Diffusionsbeständigkeit um eine Langzeitstabilität des Vakuums zu gewährleisten;
    - Witterungsbeständigkeit bei Außenaufstellung (Korrosion, UV-Beständigkeit);
    - ökologische Verträglichkeit.
- Geeignete Schüttmaterialien und Einbringtechniken in den evakuierten Bereich (Wärmedämmeigenschaften, Rieselfähigkeit zur Einbringung).
- Geeignete Konzepte hinsichtlich einer kostengünstigeren Konstruktion.

Es wird empfohlen die oben dargestellten Bereiche weiter zu untersuchen und die Entwicklung eines Prototypen anzustreben. In der weiteren Folge sollte die Markteinführung eines vakuumgedämmten Wärmespeichers erfolgen.

5 Literaturverzeichnis

Duffie & Beckmann (2006): Duffie J.A. and Beckman W.A., 2006: Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley and Sons Inc., New York

Duffie J.A, Beckman W.A. (2003): Solar Engineering of Thermal Processes, Third Edition, John Wiley and Sons Inc, New York

Heimrath R. (2004): Simulation, Optimierung und Vergleich solarthermischer Anlagen zur Raumwärmeversorgung von Mehrfamilienhäuser, Institut für Wärmetechnik, TU Graz

Hischier, R., Weidema, B. (Editors) (2010): Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods, Data v2.2, ecoinvent report No. 3, St. Gallen

Hummelsberger (2010): Homepage der Firma Hummelsberger Stahl und Metallbau, URL: http://www.vakuum-pufferspeicher.de/, Mühldorf (Deutschland)

Jason J. Curtis (2007): Vacuum-Insulated Pipe vs. Conventional Foam-Insulated Pipe, Offshore Technology Conference in Houston, 30 April – 3 May, Texas

KBW (2010): Homepage der Firma KBW – Klaus Berndlmaier Wärmespeicher, URL: www.waermespeicher-vakuumisoliert.de, Trostberg (Deutschland)

Öko-Institut (2010): Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.6, Öko-Institut e.V., Institut für angewandte Ökologie, Darmstadt, August 2010, http://www.oeko.de/service/gemis/de/index.htm

ÖNORM EN 12977-3 (2006): Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kundenspezifisch gefertigte Anlagen, Teil 3: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen, Entwurf, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

ÖNORM EN 12977-4 (2011): Thermische Solaranlagen und ihre Bauteile – Kundenspezifisch gefertigte Anlagen, Teil 4: Leistungsprüfung von Warmwasserspeichern für Solaranlagen zur Trinkwassererwärmung und Raumheizung (Kombispeicher), Entwurf, Österreichisches Normungsinstitut, Wien

Polysun 5.4.11 (2010): Simulationssoftware, Vela Solaris AG, Stadthausstraße 125, CH-8400 Winterthur

Simmler et al. (2005): Vacuum Insulation Panels, Study on VIP-components and panels for Service Life Prediction of VIP in Building Applications (Subtask A), IEA/ECBCS Annex 39,

Swiss Centre for Life Cycle Inventories (2010): database ecoinvent data v2.2 (2010), http://www.ecoinvent.org/

VDI Wärmeatlas (1994): Berechnungsblätter für den Wärmeübergang, siebte und erweiterte Auflage, Verein Deutscher Ingenieure, VDI-Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen

Waukmann (2010): Homepage der Firma Waukmann, URL: www.waukmann.eu, Grambach (Österreich)

Weber R. (2001): Hochisolationsleitungen, Schlussbericht Vorstudie, EMPA, Abteilung für Energiesysteme/Haustechnik, im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungs-programm "Rationelle Energienutzung in Gebäuden“, Schweiz

6 Anhang

6.1 Berechnung der Wärmeleitfähigkeit im Vakuum

Im Allgemeinen werden die thermischen Eigenschaften im Vakuum vom Strahlungsaustausch zwischen den umgebenden Flächen, der Festkörperwärmeleitfähigkeit und der Gaskonvektion bestimmt. Im Vakuum können grundsätzlich drei verschiedene Möglichkeiten zur Minimierung der thermischen Verluste verfolgt werden.

- Reines Vakuum
- Strahlungsfolien
- Schüttmaterial

Bei reinem Vakuum werden die thermischen Verluste durch den Strahlungsaustausch bestimmt und durch einen geringen Anteil an Gaskonvektion. Verwendet man hingegen Strahlungsfolien, findet beinahe kein Strahlungsaustausch mehr statt, während die Gaskonvektion immer noch geringfügige Verluste verursacht. Wird ein Schüttmaterial verwendet, können nahezu alle drei Mechanismen des Wärmetransports vollständig unterbunden werden. Ein besonderes Augenmerk ist in diesem Fall auf die Festkörperwärmeleitfähigkeit zu legen, welche je nach Material variieren kann.

Für die Untersuchungen der Wärmeleitfähigkeit im Vakuum wird bei den drei möglichen Ausführungen das Druckniveau von 10^{-4} bis 10^{3} mbar variiert, um einen geeigneten Einsatzbereich der Materialien zu erhalten.

6.1.1 Ermittlung der Verlustwärmeströme im Vakuum

Für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit im evakuierten Spalt ist die Kenntnis über die Ausführung der Isolation zwingend erforderlich. Es wird hierbei zwischen diskontinuierlichen und kontinuierlichen Isolationen unterschieden. Letztere sind transparente (z.B. Silikate) bzw. opake Schüttmaterialien (z.B. Perlite), während bei einer diskontinuierlichen Isolation Strahlungsfolien zum Einsatz kommen.

6.1.1.1 Diskontinuierlich aufgebaute Isolationen (Strahlungsfolien)

Durch die Untersuchung der freien Konvektion, welche bei einem Druckniveau von 10 mbar nicht mehr gegeben ist, können folglich Berechnungen hinsichtlich der Verlustwärmeströme im Vakuum durchgeführt werden. Ziel einer Vakuumisolation ist die Minimierung aller vorhandenen Wärmeströme aus dem Speicher, wie bspw.

- die Verlustwärmeströme durch vorhandene Gase oder Umgebungsluft q_{Gas}
- Festkörper-Wärmebrücken und damit Festkörperwärmeleitung q_{FK}
- Strahlungsverluste durch verspiegeln der Innenwände bzw. durch den Einbau hochreflektierender Metallfolien q_{Rad}.

Im Folgenden werden statische Berechnungsmethoden zur detaillierten Ermittlung der einzelnen Verlustwärmeströme angegeben. Sämtliche Berechnungsansätze sind aus VDI Wärmeatlas (1994) zu entnehmen.

6.1.1.1.1 Berechnung von qGas

Eine wesentliche Einflussgröße bei der Berechnung der Verlustwärmeströme durch vorhandene Gase oder Luft stellt die mittlere freie Weglänge dar. Diese beschreibt die durchschnittliche Länge, die ein Molekül ohne Wechselwirkung (Energieaustausch) mit einem benachbarten Molekül zurücklegen kann.

$$l_{Gas} = \frac{C_1(p_{Gas})}{1 + \frac{C_2}{T}} \tag{6.1}$$

l_{Gas}	mittlere freie Weglänge in µm
$C_1(p_{Gas})$	gasspezifische Konstante in µm
C_2	gasspezifische Konstante in K

Werte für die gasspezifische Konstante C_2 sind VDI Wärmeatlas (1994) zu entnehmen, während die gasspezifische Konstante $C_1(p_{Gas})$ druckabhängig ist und je nach Druckniveau berechnet werden muss. Für Luft bei Normaldruck (1,013 bar) und Raumtemperatur (~20 °C) beträgt die mittlere freie Weglänge bspw. etwa 0,06 mm.

Durch die gewonnenen Erkenntnisse hinsichtlich der mittleren freien Weglänge lässt sich mit der Vorgabe des Wandabstandes zwischen den Strahlungsfolien eine weitere wichtige Kenngröße, die Knudsenzahl, bestimmen. Diese wird für die anschließende Berechnung der Wärmeleitfähigkeit benötigt. Die Knudsenzahl beschreibt die mittlere freie Weglänge im Verhältnis zum Abstand zwischen den einzelnen Strahlungsfolien.

$$Kn = \frac{l_{Gas}}{\delta} \tag{6.2}$$

Kn	Knudsenzahl
δ	Abstand zwischen den einzelnen Strahlungsfolien in µm

Für die Wärmeleitfähigkeit des Restgases gilt:

$$\lambda_{Gas} = \frac{\lambda_0}{1 + 2 \cdot \beta \cdot Kn} \tag{6.3}$$

λ_{Gas}	Wärmeleitfähigkeit des Restgases in W/(m*K)
λ_0	Wärmeleitfähigkeit für Luft bei Umgebungsdruck in W/(m*K)

β Gewichtungsfaktor (für Luft ~ 1,63)

Die Wärmeleitfähigkeit für Luft bei Umgebungsdruck und einer Temperatur von 25 °C beträgt 0,026 W/(m*K). Betrachtet man Gleichung (6.3), wird die Wärmeleitfähigkeit im Vakuum klein, wenn man möglichst geringe Werte für λ_0 (Edelgase) bzw. eine große Knudsenzahl anstrebt. Durch evakuieren auf sehr geringe Restgasdrücke und kleine Abstände zwischen den Strahlungsfolien gelingt es im technischen Maßstab die Wärmeleitung λ_{Gas} beinahe vollständig zu unterbinden.

Unter Verwendung des Fourier'schen Wärmeleitungsgesetzes lässt sich der Verlustwärmestrom durch vorhandene Gase bzw. Luft bestimmen (Gleichung (6.4)).

$$\dot{q}_{Gas} = \lambda_{Gas} \cdot \frac{(T_i - T_a)}{l} \tag{6.4}$$

$\dot{q}_{Gas}$ Verlustwärmestrom durch vorhandene Gase in W/m²

l Abstand zwischen Innen- und Außenmantel in m

6.1.1.1.2 Berechnung von qFK

Aufgrund der geplanten Konstruktion des Testspeichers ist es nicht notwendig, Stützen zwischen den beiden Behältern zu verwenden. Aus diesem Grund tritt auch keine Festkörperwärmeleitung bei der Verwendung von Strahlungsfolien auf und kann deshalb vernachlässigt werden.

6.1.1.1.3 Berechnung von qRad

Die Berechnung des Verlustwärmestromes infolge von Strahlungsaustausch erfolgt näherungsweise über Berechnungsansätze zwischen zwei planparallelen Platten. Sind keine Strahlungsfolien im Spalt eingebaut, findet lediglich ein Strahlungsaustausch zwischen dem Innen- und Außenbehälter statt.

Sind jedoch Strahlungsfolien in den Vakuumbereich integriert, findet ein Strahlungsaustausch zwischen dem Innenbehälter und der nächstgelegenen Folie, zwischen den Folien und zwischen der letzten Folien und dem Außenbehälter statt. Die allgemeine Formulierung dieses Berechnungsvorganges beschreibt nachstehende Gleichung (6.5). Die Lösung dieser Gleichung erfolgt iterativ, da vorab die Temperaturen der Strahlungsfolien genähert werden.

$$\dot{q}_{Rad} = \frac{\sigma \cdot \left(T_i^4 - T_{i+1}^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_{i+1}} - 1} \tag{6.5}$$

$\dot{q}_{Rad}$ Verlustwärmestrom durch vorhandene Gase in W/(m*K)

σ Stefan-Boltzmann Konstante in 5,67*10^{-8} W/(m²K^4)

T Temperatur der Oberfläche in K

ε Emissionskoeffizienten der Oberflächen

6.1.1.2 Kontinuierlich aufgebaute Isolationen (Schüttungen)

In diesem Kapitel soll der Einsatz sehr feinkörniger Materialien untersucht werden. Zu den feinkörnigen Isolationsmaterialien zählen transparente bzw. opake Pulverdämmungen. Es wird vorausgesetzt, dass die Durchmesser der Teilchen oder Hohlräume zwischen den Teilchen höchstens gleich der Wellenlänge der Wärmestrahlung (1 - 500 µm) sind, die von der isolierenden Wärmequelle ausgesandt wird. Wie in Kapitel 6.1.1.1 erfolgt die Berechnung der Verlustwärmeströme komponentenweise.

6.1.1.2.1 Berechnung von qGas

Die Berechnung des Verlustwärmestroms durch vorhandene Luft bzw. Gase erfolgt gleich wie bei der Verwendung von Strahlungsfolien in Kapitel 6.1.1.1.1. Wird im Vakuumraum ein Schüttmaterial verwendet, muss anstelle des Folienabstandes der Porendurchmesser des Materials bekannt sein. Durch diese Kenntnis haben die Gleichung und ihre Gültigkeit, wodurch sich die Wärmeleitfähigkeit für vorhandene Luft bzw. gase bestimmen lässt.

Für die Berechnung der Wärmeleitfähigkeit und des Verlustwärmestromes durch vorhandene Luft bzw. Gase erfolgt werden die Gleichungen (6.2) bis (6.4) herangezogen.

6.1.1.2.2 Berechnung von qFK

Aufgrund der sehr kleinen Teilchendurchmesser spielen in diesem Fall die Kontaktwärmeströme eine entscheidende Rolle für den Wärmedurchgang. Diese können aus vorhandener Literatur (siehe VDI Wärmeatlas, 1996) bzw. den Herstellerangaben entnommen werden. Liegen allerdings keine Daten für die Kontaktwärmeleitfähigkeit vor, lässt sich diese durch Gleichung (6.6) berechnen.

Der nachstehende Ausdruck für die Berechnung der Kontaktwärmeleitfähigkeit beruht auf einer Verknüpfung der Wärmeleitfähigkeit des Grundmaterials mit den aus der Elastizitätstheorie berechneten Kontaktradien. Des Weiteren geht die Anzahl von Kontakten zwischen den Teilchen des Schüttmaterials in die Berechnung mit ein.

$$\lambda_{FK} = 3{,}44 \cdot (1-\psi)^{\frac{4}{3}} \cdot \left(\frac{1-\gamma}{\mathrm{Y}}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot \lambda_F \cdot p^{\frac{1}{3}} \qquad (6.6)$$

λ_{FK} Kontaktwärmeleitfähigkeit in W/(m*K)

λ_F Festkörperwärmeleitfähigkeit des Schüttmaterials in W/(m*K)

ψ Porosität

γ Querkontraktionszahl

Y	Elastizitätsmodul in Pa
p	mechanischer Auflagedruck in $9{,}81*10^4$ Pa

Aus dem üblichen Fourier'schen Wärmeleitungsgesetz (Gleichung (6.4)) erhält man den entsprechenden Verlustwärmestrom infolge von Festkörperwärmeleitung.

6.1.1.2.3 Berechnung von qRad

Die hier behandelten Berechnungsverfahren unterscheiden sich deutlich von denen, die für den Einsatz von Strahlungsfolien angegeben werden (siehe Kapitel 6.1.1.1.3). Während dort Strahlungsausbreitung durch die Oberflächeneigenschaften und Folienabstände beschrieben wird, muss bei der Verwendung eines Schüttmaterials aufgrund der kleinen Teilchendurchmesser auch das Eindringen der Strahlung in die Teilchen betrachtet werden.

Für die Berechnung des Verlustwärmestromes infolge von Strahlungsaustausch werden daher wichtige Parameter benötigt. In diesem Fall ist der Strahlungsaustausch nicht mehr auf Oberfläche zu Oberfläche Wechselwirkungen beschränkt, sondern auf den Gesamteinfluss der Teilchen zur Unterbindung der Strahlung entlang der mittleren freien Weglänge.

Bevor jedoch Berechnungsansätze verwendet werden, gilt zu prüfen, ob das verwendete Material transparent oder opak ist.

Opake Schüttung

Handelt es sich um ein opakes Schüttmaterial (z.B. Perlite), kann der Verlustwärmestrom durch Strahlung in Form eines Wärmeleitungsausdruckes mit einer „Strahlungswärmeleitfähigkeit" angeschrieben werden.

$$\lambda_{Rad} = \frac{16 \cdot \sigma \cdot n^2}{3 \cdot E} \cdot T_{Rad}^3 \qquad (6.7)$$

λ_{Rad}	Strahlungswärmeleitfähigkeit in W/(m*K)
n	Brechungsindex (für isotrope Strahlung n=1)
E	Extinktionskoeffizient in 1/m
T_{Rad}	mittlere Strahlungstemperatur in K

Sichere Ergebnisse können mit obiger Gleichung (6.7) nur erzielt werden, wenn sich die Temperaturen in einem bestimmten Bereich ($120 \leq T_i \leq 700$ K; $100 \leq T_a \leq 300$ K) befinden und der Extinktionskoeffizient hinreichen genau bekannt ist. Letzterer beschreibt die Abschwächung der langwelligen Strahlung und kann im Normalfall den Herstellerangaben entnommen werden.

Durch anwenden des üblichen Fourier'schen Wärmeleitungsgesetz (Gleichung (6.4)) erhält man den gesamten Verlustwärmestrom infolge von Strahlungsaustausch.

Transparente Schüttung

Zu den bereichsweise transparenten Isolationen gehören SiO_2-Aerogele und hochdisperse Kieselsäuren. Liegen für diese Materialien keine Extinktionsspektren vor, kann man den Verlustwärmestrom wie bei einer homogenen, grauen, transparenten Schüttung mit kleiner optischen Dicke zwischen parallelen ebenen Wänden näherungsweise mit Gleichung (6.8) ermitteln.

$$\dot{q}_{Rad} = \frac{\sigma \cdot \left(T_i^4 - T_a^4\right)}{\frac{1}{\varepsilon_i} + \frac{1}{\varepsilon_a} - 1 + \frac{3}{4} \cdot E \cdot l} \tag{6.8}$$

q_{rad} Verlustwärmestrom durch Strahlung in W/m²

l Abstand zwischen Innen- und Außenbehälter in m

Organische oder mit Trübungsmittel dotierte Materialien besitzen im Bereich der Wärmestrahlung opake Eigenschaften und sind dadurch undurchlässig für diesen Wellenlängenbereich. Monolithische Aerogele bzw. mit IR-Trüber behandelte hochdisperse Kieselsäuren weisen auch unter Normaldruck äußerst kleine Wärmeleitfähigkeiten auf. Diese Materialien sind daher bestens für den Einsatz im Vakuum geeignet.

6.1.2 Gesamte Wärmeleitfähigkeit im Vakuum

Für die Berechnung der gesamten Wärmeleitfähigkeit ist es notwendig, sämtliche Verlustwärmeströme durch vorhandene Gase oder Umgebungsluft, durch Wärmeleitung innerhalb des Schüttmaterials und jene durch Strahlung zwischen den einzelnen Flächen bzw. Teilchen zu summieren (Gleichung (6.9)).

$$\dot{q}_{tot} = \dot{q}_{Gas} + \dot{q}_{FK} + \dot{q}_{Rad} \tag{6.9}$$

q_{tot} gesamter Verlustwärmestrom in W/m²

Die gesamte Wärmeleitfähigkeit lässt sich durch die Kenntnis des gesamten Verlustwärmestroms und durch umformen des Fourier'schen Wärmeleitungsgesetztes ermitteln.

$$\lambda_{Vak} = \frac{\dot{q}_{tot} \cdot l}{T_i - T_a} \tag{6.10}$$

λ_{Vak} gesamte Wärmeleitfähigkeit in W/(m*K)

Die Kenntnis über die gesamte Wärmeleitfähigkeit ist speziell für Jahressimulationen erforderlich, um die jährlichen Speicherverluste besser abbilden zu können.

6.2 Systemsimulationen

Die Systemsimulationen wurden mit der Software Polysun 2010 durchgeführt. Als Berechnungsgrundlage wurden Referenzmodelle definiert. Nachfolgend sind die getroffenen Annahmen und Berechnungsmethoden beschrieben.

6.2.1 Referenzmodelle

Bei den definierten Referenzmodellen handelt es sich um ein Einfamilienhaus, welches einerseits als Niedrigenergiehaus und andererseits als Passivhaus ausgeführt ist. Die Wärmebereitstellung erfolgt über eine Solaranlage und über einen Pelletskessel. Des Weiteren ist der Pufferspeicher im Solarkreis mit einer Schichtladelanze ausgestattet um eine bestmögliche Temperaturschichtung zu erzielen. Der Pelletskessel ist nur in den oberen Bereich des Pufferspeichers eingebunden, damit das darunterliegende Volumen ausschließlich der Solaranlage zur Verfügung steht.

In der Tabelle 6-1 sind sämtliche spezifische Parameter der Referenzmodelle für das Niedrigenergiehaus und das Passivhaus angeführt.

Tabelle 6-1: Parameter der Systemsimulationen

Parameter	Einheit	NEH	PH
beheizte Wohnfläche	m²	148.0	
spez. Heizenergiebedarf	kWh/m²a	45.0	15.0
Heizenergiebedarf	kWh/a	6660.0	2220.0
Energiebedarf Brauchwarmwasser (FW-Modul)	kWh/a	3450.0	
Energieabgabesystem VL/RL	°C	35/28	
Bruttokollektorfläche	m²	20.0	
Neigungswinkel Kollektoren	°	60.0	
Speichervolumen	lt.	1000.0	
Nachheizung Pelletskessel	kW	10.0	

Verbraucherseitig wird über ein Niedertemperaturheizsystem die benötigte Energie an das Gebäude abgegeben. Für das erforderliche Brauchwarmwasser steht ein Frischwassermodul zur Verfügung. Nachstehende Abbildung 6-1 zeigt den schematischen Aufbau der Referenzmodelle in der Simulationsumgebung Polysun (2010).

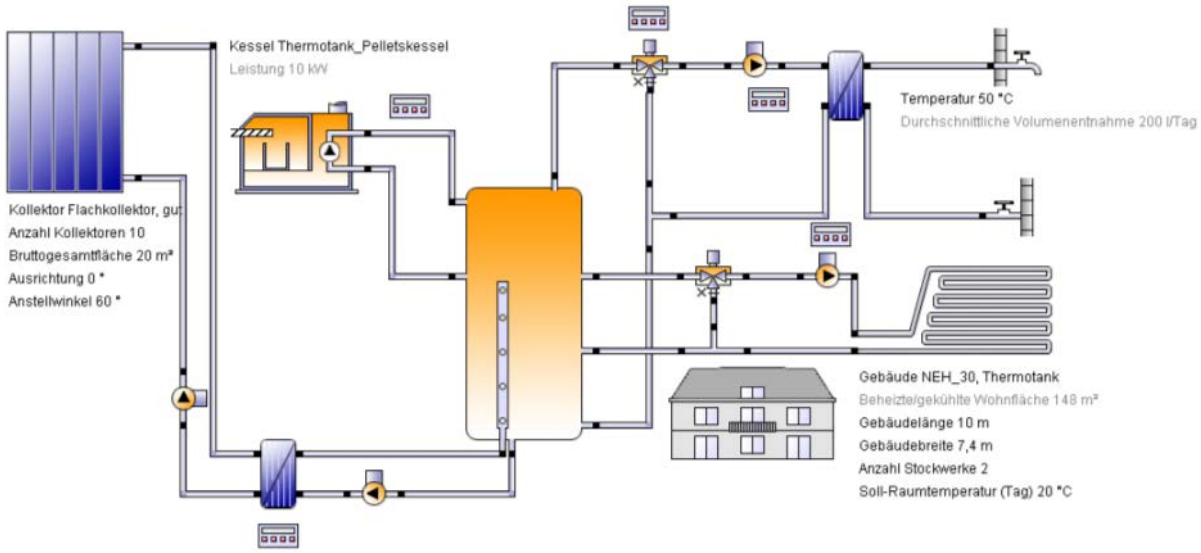

Abbildung 6-1: Modell einer teilsolaren Raumheizung in der Simulationsumgebung Polysun 5.4

Auf Basis dieser Referenzmodelle werden einerseits die Dämmstärke und andererseits die Kollektorfläche bzw. das Nennvolumen des Pufferspeichers variiert. Im Zuge dessen, kann der Einfluss auf die Dimensionierung der Solaranlage und des Pufferspeichers je nach Gebäudestandard (Niedrigenergiehaus bzw. Passivhaus) sichtbar gemacht werden. Des Weiteren werden ebenfalls die Steigerungen des solaren Deckungsgrades je nach Anlagenkonfiguration ersichtlich.

6.2.2 Kennzahlen

Kenngrößen dienen dazu, um Systeme unterschiedlicher Größe und Konfigurationen hinsichtlich ihrer Qualität bewerten und vergleichen zu können. Bei der Berechnung des jeweiligen Kennwertes können unterschiedliche Bilanzgrenzen verwendet werden, wobei für die folgenden Systeme die Bilanzgrenze „Speicher“ herangezogen wird.

6.2.2.1 Solarer Deckungsgrad SD

In der Literatur sind verschiedene Interpretationen für den solaren Deckungsgrad einer Anlage zu finden. Durch die Vielfalt an Definitionen des solaren Deckungsgrades sind auch die Ergebnisse unterschiedlich. Im Allgemeinen gibt der solare Deckungsgrad Auskunft über den solaren Anteil des Energiebedarfs in einem System.

Um den Deckungsgrad berechnen zu können, müssen die Energiemengen für jenen Zeitraum bekannt sein, für welchen man diesen berechnen möchte. Betrachtet man ein Kalenderjahr, so spricht man vom Jahresdeckungsgrad, welcher auch am aussagekräftigsten ist. Diese Definition kann sowohl für eine reine Brauchwassererwärmung als auch für ein System mit teilsolarer Raumheizung verwendet werden.

$$SD = 1 - \frac{Q_{Aux}}{Q_{Bui}} \tag{6.1}$$

SD solarer Deckungsgrad

Q_{Aux} Zusatzenergie in kWh

Q_{Bui} Nutzenergie in kWh

Bei dieser Definition werden sämtliche Verluste der Solaranlage angerechnet. Sollte der Speicher mehr Energie verlieren als durch die Solaranlage eingebracht wird, kann es somit auch zu negativen Deckungsgraden kommen. Diese Definition ist gerechtfertigt, wenn durch die Solaranlage der Speicher notwendig geworden ist und das Heizungssystem einen hohen Wirkungsgrad besitzt. Falsch wäre es, alle Verluste der Nachheizung zuzuordnen, da in der Regel das größere Volumen des Speichers ausschließlich durch die Solaranlage erwärmt wird.

6.2.2.2 Spezifischer Ertrag einer Solaranlage

Der spezifische Solarertrag ist eine weitere bedeutende Kenngröße zur Beurteilung von thermischen Solaranlagen. Dieser beschreibt jene Energiemenge, welche von einem Quadratmeter Kollektorfläche dem Pufferspeicher zugeführt wird. Bei dieser Kenngröße ist darauf zu achten, auf welche Fläche (Absorber-, Apertur- oder Bruttofläche) der spezifische Ertrag bezogen wird. In der Regel wird der spezifische Solarertrag auf die Bruttokollektorfläche bezogen.

$$SE = \frac{Q_{Sol}}{A_{Koll}} \tag{6.2}$$

SE spezifischer Solarertrag in kWh/m²a

Q_{Sol} Solarenergie in kWh/a

A_{Koll} Bruttokollektorfläche in m²

Diese Kenngröße ist eine Bewertungsgröße zur Angabe der Leistungsfähigkeit von thermischen Solaranlagen. Für die richtige Interpretation müssen korrekte Informationen über die Dimensionierung (solarer Deckungsanteil) sowie der Systemverluste (Speicher- bzw. Wärmeverteilverluste) der Anlage vorliegen.

6.2.2.3 Nachheizenergiebedarf

Als Nachheizenergiebedarf wird jene Wärmemenge verstanden, welche vom konventionellen Energieträger, zusätzlich zu den solaren Erträgen dem System zugeführt werden muss. Durch den Nachheizenergiebedarf können Unterschiede in der Effizienz von solaren Wärmeversorgungssystemen bei gleichem Bedarf an Nutzenergie noch deutlicher

ausgedrückt werden. In dieser Kennzahl werden ebenfalls keinerlei Wirkungsgrade des Heizkessels bzw. des Kollektors berücksichtigt.

Betrachtet man Systeme mit geringem Nachheizenergiebedarf, so sind diese Systeme jenen mit hohem Nachheizenergiebedarf vorzuziehen. Im Systemvergleich spielt neben den energetischen Aspekten auch die ökonomische Betrachtung (Wärmepreis) eine wesentliche Rolle.

6.2.2.4 Jährliche Speicherverluste

Die jährlichen Speicherverluste geben Auskunft über sämtliche Energieströme, welche der Speicher an dessen Umgebung abgibt. Diese müssen von der Solaranlage bzw. dem Nachheizsystem zusätzlich zur Energiemenge für Warmwasserbereitung und Raumwärme bereitgestellt werden. In der Gleichung (6.3) ist die Energiebilanz eines Pufferspeichers angeführt. Um diese Aufwendungen so gering als möglich zu halten, sollte der Speichermantel sowie die Ober- und Unterseite des Speichers entsprechend gut gedämmt sein. Bei der Anbringung der Dämmung ist weiters darauf zu achten, dass keine Luftschlitze zwischen Speicherbehälter und Dämmmaterial vorhanden sind (Kamineffekt). Einen wesentlichen Einfluss auf die Verluste stellen auch die hydraulischen Anschlüsse dar. Diese sollten entsprechend isoliert und mit einem thermischen Siphon versehen sein.

$$Q_{Sol} + Q_{Aux} = Q_{RW} + Q_{WW} + Q_{Sp,Loss} \tag{6.3}$$

Q_{RW} Energiemenge für Raumwärme in kWh

Q_{WW} Energiemenge für Brauchwarmwasser in kWh

$Q_{Sp,Loss}$ Speicherverluste in kWh

Durch die Verwendung einer Vakuumdämmung und unter der Berücksichtigung, dass sämtliche Anschlüsse von unten in den Speicher geführt werden, können die thermischen Verluste auf ein Minimum reduziert werden.

6.3 Ökologische Bewertung

In den folgenden Tabellen sind die Ergebnisse von allen ökologisch bewerteten Systemkonfigurationen dargestellt.

Tabelle 6-2: *Spezifische Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einem Gaskessel als Nachheizung*

Spezifische THG-Emissionen der Wärmebereitstellung, Nachheizung Erdgas [g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$]		Vakuum 1.000 L	Standard PU ideal 1.000 L	Standard PU real 1.000 L	Vakuum 5.000 L	Standard PU ideal 5.000 L	Standard PU real 5.000 L
Kollektorfläche	10 m²	197	209	217	-	-	-
λ-Wert	theoretisch						
Kollektorfläche	10 m²	199	200	211	-	-	-
λ-Wert	aus Messung						
Kollektorfläche	20 m²	180	188	195	179	187	194
λ-Wert	theoretisch						
Kollektorfläche	20 m²	181	181	190	-	-	-
λ-Wert	aus Messung						
Kollektorfläche	40 m²	-	-	-	153	159	166
λ-Wert	theoretisch						

Tabelle 6-3: *Spezifische Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einem Pelletkessel als Nachheizung*

Spezifische THG-Emissionen der Wärmebereitstellung, Nachheizung Pellet [g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$]		Vakuum 1.000 L	Standard PU ideal 1.000 L	Standard PU real 1.000 L	Vakuum 5.000 L	Standard PU ideal 5.000 L	Standard PU real 5.000 L
Kollektorfläche	10 m²	51	53	53	-	-	-
λ-Wert	theoretisch						
Kollektorfläche	10 m²	51	51	52	-	-	-
λ-Wert	aus Messung						
Kollektorfläche	20 m²	50	51	53	54	54	55
λ-Wert	theoretisch						
Kollektorfläche	20 m²	50	50	52	-	-	-
λ-Wert	aus Messung						
Kollektorfläche	40 m²	-	-	-	54	53	55
λ-Wert	theoretisch						

Tabelle 6-4: *Spezifische Treibhausgasemissionen der Wärmebereitstellung mit einem Ölkessel als Nachheizung*

Spezifische THG-Emissionen der Wärmebereitstellung, Nachheizung Heizöl [g CO_2-Äq./$kWh_{Nutzwärme}$]		Vakuum 1.000 L	Standard PU ideal 1.000 L	Standard PU real 1.000 L	Vakuum 5.000 L	Standard PU ideal 5.000 L	Standard PU real 5.000 L
Kollektorfläche	10 m²	241	256	266	-	-	-
λ-Wert	theoretisch						
Kollektorfläche	10 m²	244	245	259	-	-	-
λ-Wert	aus Messung						
Kollektorfläche	20 m²	219	229	237	214	217	236
λ-Wert	theoretisch						
Kollektorfläche	20 m²	220	221	231	-	-	-
λ-Wert	aus Messung						
Kollektorfläche	40 m²	-	-	-	183	191	199
λ-Wert	theoretisch						

Tabelle 6-5: *Spezifischer kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einem Gaskessel als Nachheizung*

Spezifischer kumulierter Energieaufwand, Nachheizung Erdgas [kWh/kWh$_{Nutzwärme}$]		**Vakuum 1.000 L**	**Standard PU ideal 1.000 L**	**Standard PU real 1.000 L**	**Vakuum 5.000 L**	**Standard PU ideal 5.000 L**	**Standard PU real 5.000 L**
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² theoretisch	1,36	1,46	1,52	-	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² aus Messung	1,41	1,42	1,51	-	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² theoretisch	1,37	1,50	1,54	1,42	1,56	1,62
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² aus Messung	1,43	1,45	1,55	-	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	40 m² theoretisch	-	-	-	1,44	2	2

Tabelle 6-6: *Spezifischer kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einem Pelletkessel als Nachheizung*

Spezifischer kumulierter Energieaufwand, Nachheizung Pellet [kWh/kWh$_{Nutzwärme}$]		**Vakuum 1.000 L**	**Standard PU ideal 1.000 L**	**Standard PU real 1.000 L**	**Vakuum 5.000 L**	**Standard PU ideal 5.000 L**	**Standard PU real 5.000 L**
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² theoretisch	1,50	1,61	1,68	-	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² aus Messung	1,55	1,56	1,66	-	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² theoretisch	1,49	1,63	1,68	1,54	1,69	1,76
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² aus Messung	1,55	1,57	1,69	-	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	40 m² theoretisch	-	-	-	1,54	1,70	1,80

Tabelle 6-7: *Spezifischer kumulierter Energieaufwand der Wärmebereitstellung mit einem Ölkessel als Nachheizung*

Spezifischer kumulierter Energieaufwand, Nachheizung Heizöl [kWh/kWh$_{Nutzwärme}$]		**Vakuum 1.000 L**	**Standard PU ideal 1.000 L**	**Standard PU real 1.000 L**	**Vakuum 5.000 L**	**Standard PU ideal 5.000 L**	**Standard PU real 5.000 L**
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² theoretisch	1,32	1,41	1,47	-	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² aus Messung	1,36	1,37	1,46	-	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² theoretisch	1,33	1,46	1,50	1,38	1,52	1,58
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² aus Messung	1,39	1,41	1,51	-	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	40 m² theoretisch	-	-	-	1,41	1,57	1,66

Tabelle 6-8: *Einsparung der Treibhausgasemissionen durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Gaskessel*

Einsparung von THG-Emissionen durch Vakuum-Speicher [%]		**Standard PU ideal 1.000 L**	**Standard PU real 1.000 L**	**Standard PU ideal 5.000 L**	**Standard PU real 5.000 L**
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² theoretisch	5,7%	9,2%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² aus Messung	0,5%	5,6%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² theoretisch	4,5%	7,7%	4,5%	7,8%
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² aus Messung	0,3%	4,9%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	40 m² theoretisch	-	-	3,8%	7,6%

Tabelle 6-9: *Einsparung der Treibhausgasemissionen durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Pelletkessel*

Einsparung von THG-Emissionen durch Vakuum-Speicher [%]		**Standard PU ideal 1.000 L**	**Standard PU real 1.000 L**	**Standard PU ideal 5.000 L**	**Standard PU real 5.000 L**
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² theoretisch	3,9%	4,4%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² aus Messung	0,0%	0,7%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² theoretisch	2,9%	5,8%	0,0%	2,4%
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² aus Messung	0,0%	3,0%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	40 m² theoretisch	-	-	0,0%	1,8%

Tabelle 6-10: *Einsparung der Treibhausgasemissionen durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Ölkessel*

Einsparung von THG-Emissionen durch Vakuum-Speicher [%]		**Standard PU ideal 1.000 L**	**Standard PU real 1.000 L**	**Standard PU ideal 5.000 L**	**Standard PU real 5.000 L**
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² theoretisch	5,8%	9,5%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² aus Messung	0,6%	5,9%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² theoretisch	4,6%	7,8%	1,3%	9,4%
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² aus Messung	0,4%	5,0%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	40 m² theoretisch	-	-	4,2%	8,1%

Tabelle 6-11: *Einsparung des kumulierten Energieaufwands durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Gaskessel*

Einsparung von kumuliertem Energieaufwand durch Vakuum-Speicher [%]		**Standard PU ideal 1.000 L**	**Standard PU real 1.000 L**	**Standard PU ideal 5.000 L**	**Standard PU real 5.000 L**
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² theoretisch	6,8%	10,7%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² aus Messung	0,9%	6,6%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² theoretisch	8,8%	11,2%	8,7%	12,3%
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² aus Messung	1,3%	8,1%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	40 m² theoretisch	-	-	9,9%	14,9%

Tabelle 6-12: *Einsparung des kumulierten Energieaufwands durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Pelletkessel*

Einsparung von kumuliertem Energieaufwand durch Vakuum-Speicher [%]		**Standard PU ideal 1.000 L**	**Standard PU real 1.000 L**	**Standard PU ideal 5.000 L**	**Standard PU real 5.000 L**
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² theoretisch	6,7%	10,7%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² aus Messung	0,9%	6,7%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² theoretisch	8,5%	11,0%	8,5%	12,2%
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² aus Messung	1,2%	7,9%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	40 m² theoretisch	-	-	9,7%	14,6%

Tabelle 6-13: *Einsparung des kumulierten Energieaufwands durch den Vakuum-Speicher im Vergleich zum realen und idealen Standard-PU-Speicher bei einer Nachheizung mit einem Ölkessel*

Einsparung von kumuliertem Energieaufwand durch Vakuum-Speicher [%]		**Standard PU ideal 1.000 L**	**Standard PU real 1.000 L**	**Standard PU ideal 5.000 L**	**Standard PU real 5.000 L**
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² theoretisch	6,8%	10,7%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	10 m² aus Messung	0,9%	6,6%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² theoretisch	8,9%	11,3%	8,8%	12,4%
Kollektorfläche λ-Wert	20 m² aus Messung	1,3%	8,2%	-	-
Kollektorfläche λ-Wert	40 m² theoretisch	-	-	10,0%	15,0%

JOANNEUM RESEARCH
Forschungsgesellschaft mbH

Leonhardstraße 59
8010 Graz

Tel. +43 316 876-0
Fax +43 316 876-1181

pr@joanneum.at
www.joanneum.at

oef mfg 12 008