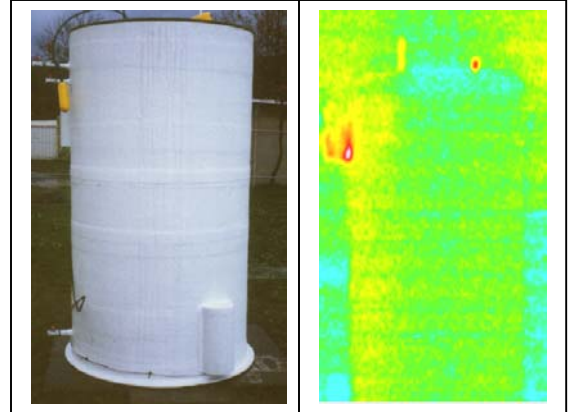


Forschungsbericht – Abschlussbericht –
Verbundprojekt Solarthermie - 2000,
Teilprojekt 3:
Solare Nahwärme – Begleitforschung:

**Durchführung eines
Messprogramms an dem 300 m³
GFK-Pilotspeicher und
Untersuchungen zur Optimierung
des Wärmespeicherkonzeptes**

Förderkennzeichen: 0329606Q/0

Andreas Nilius, Jürgen Bühl



Kurzreferat

Innerhalb des Forschungs- und Demonstrationsprogrammes Solarthermie- 2000, Teilprogramm 3: Solare Nahwärme-Begleitforschung wurde im Projekt "Durchführung eines Messprogramms an dem mit Mitteln des Landes Thüringen entwickelten und gefertigten 300 m³ GFK (Glasfaserverstärkter Kunststoff) – Pilotspeicher umfangreiche Untersuchungen zur Optimierung des Wärmespeicherkonzeptes in Form von Langzeitmaterialtests, Be- und Entladezyklen mit verschiedenen Schichtenladevorrichtungen und unterschiedlichen Temperaturniveaus erfolgreich durchgeführt. Im Ergebnis entstand ein 20 m³ Musterspeicher in neuer Technologie auf GFK – Basis. Hier flossen die bisherigen Erfahrungen auch zu thermischen Be- und Entladesystemen ein.

Es steht nach der Erprobung dieses Musterspeichers eine anwendbare, kostengünstige und vom Verbundpartner VKA Schönbrunn GmbH lieferbare Speicherbaureihe von (20)...100 ...6000 m³ Speicherinhalt zur Verfügung, die angepasst an die Anforderungen gebäudeintegriert, freistehend, oder im Erdreich vergraben eingesetzt werden kann.

Schlagwörter

- Solar unterstützte Nahwärmesysteme
- saisonale Speicherung
- Heißwasserspeicher
- messtechnische Begleitung und Überwachung
- GFK – glasfaserverstärkter Kunststoff
- integrale Wärmedämmung
- thermische Be- und Entladesysteme
- Kosten

Titel: Forschungsbericht / Abschlußbericht - Solarthermie 2000 Teilprogramm 3 – Solare Nahwärme Begleitforschung – Durchführung eines Meßprogramms an dem 300 m³ GFK – Pilotspeicher und Untersuchungen zur Optimierung des Wärmespeicherkonzeptes

Autoren: Bühl, J.; Nilius, A.

Technische Universität Ilmenau, Fakultät für Maschinenbau, Fachgebiet Thermo- und Fluidodynamik

Der **Bericht** besteht: aus 60 Seiten Text

Tag der Berichtserstellung: 30. 07. 2003

Es wurden 8 Exemplare erstellt.

Eine spätere Veröffentlichung ist geplant.

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Forschung und Technologie und des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit innerhalb des Forschungs- und Demonstrationsprogramms Solarthermie-2000 unter dem Kennzeichen 0329606Q/0 gefördert.

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

Abschlussbericht

Solarthermie - 2000, Teilprojekt 3: 0329606Q/0
Solare Nahwärme – Begleitforschung:
Durchführung eines Messprogramms an dem 300 m³ GFK-
Pilotspeicher und Untersuchungen zur Optimierung des Wärme-
speicherkonzeptes

Laufzeit vom 01.04.1998 bis 31.01.2003

TU Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Thermo- und Fluidodynamik
Arbeitsgruppe Regenerative Energien
Dipl.-Ing. Jürgen Bühl, Projektleiter
Dipl.-Ing. Andreas Nilius, Projektbearbeitung
Dipl.-Ing. Helmut Hoppe, Projektbearbeitung

Inhaltsverzeichnis:

1.	Einleitung	Seite 3
1.1	Heißwasser - Wärmespeicher	4
1.2	Kies/Wasser – Wärmespeicher	5
1.3	Aquifer - Wärmespeicher	6
1.4	Erdsonden – Wärmespeicher	7
1.5	Aussicht	8
2.	Wärmelangzeitspeicherung mit einem neuen Speicherkonzept	9
2.1	Ziel der Entwicklung	9
2.1.1	Warum eine Konstruktion aus glasfaserverstärktem Kunststoff?	10
2.1.2	Aufbau der Speicherwand	11
2.2	Entwicklung und Erprobung eines 1,3 m ³ Musterspeichers	13
2.3	Entwicklung des 300 m ³ Pilotspeichers	15
2.4	Entwicklung Speicher „Neuer Technologie“	29
2.4.1	Wärmelangzeitspeicher NT, 20 m ³ Musterspeicher	29
2.4.2	GFK – Pufferspeicher in Wickeltechnologie	37
2.4.3	Ergebnisse der Entwicklung GFK – Wärmelangzeitspeicher	39
3.	Entwicklung und Erprobung von Schichtenladevorrichtungen	40
3.1	Zylinderbeladevorrichtung am 20 m ³ Musterspeicher	40
3.2	Schichtenladevorrichtung Typ „Ratiotherm“	42
3.3	Schichtenladevorrichtung Typ „Consens“	44
3.4	Schichtenlader Typ „Solvis“	47
3.5	Entwicklung einer Beladeplatte für große Heißwasserspeicher	49
3.6	Aussicht zu Schichtenladevorrichtungen	50
4.	Erfolgskontrollbericht	51
5.	Zusammenfassung und Ausblick	52
6.	Quellenverzeichnis	58

1. Einleitung

Die Regierung der Bundesrepublik Deutschland hat beschlossen, die CO₂-Emissionen bis zum Jahr 2005 um 25 %, bezogen auf das Niveau von 1990, zu reduzieren. Die Privathaushalte verbrauchen rund 30 % des gesamten deutschen Endenergiebedarfs /Quelle: Statistisches Bundesamt Deutschland/ und bieten daher eines der größten Einsparpotentiale aller Energiesektoren. Für die Energieversorgung von Wohnsiedlungen wurden in den vergangenen Jahren Konzepte entwickelt, die bei möglichst geringen Mehrkosten den fossilen Brennstoffbedarf zur Wärmeversorgung der Siedlung um bis zu 50 % und mehr reduzieren. Ein wichtiger Baustein dieser Versorgungskonzepte ist die Nutzung von solarthermischer Energie in Nahwärmesystemen mit und ohne saisonaler Wärmespeicherung.

Das Forschungsprogramm Solarthermie-2000 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) fördert im Teilprogramm 3 solar unterstützte Nahwärmesysteme mit und ohne Langzeit-Wärmespeicher.

Diese Systeme dienen zur Versorgung größerer Wohnsiedlungen mit mindestens 100 Wohneinheiten. Die zeitliche Verschiebung zwischen Solarstrahlungsangebot in den Sommermonaten und maximalem Wärmebedarf im Winter wird über die saisonale Wärmespeicherung ausgeglichen. Die bisher in Deutschland realisierten Pilotanlagen sind auf solare Deckungsanteile von 40 bis 60 % des Gesamtwärmebedarfs ausgelegt.

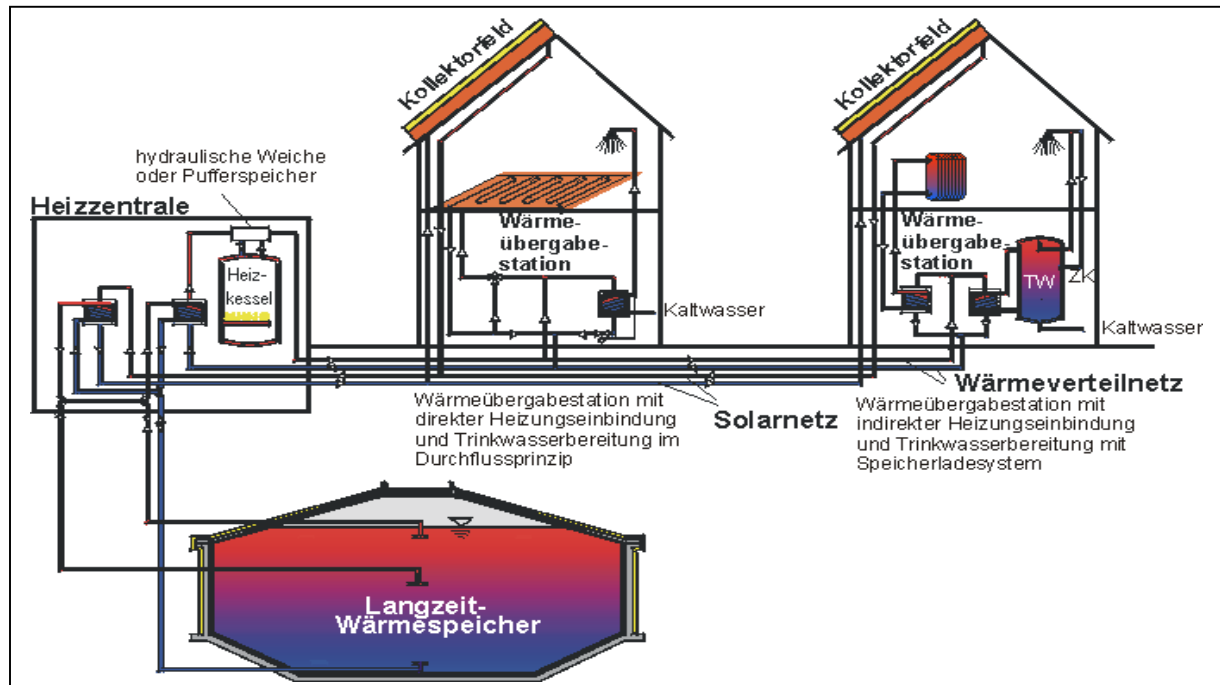


Abbildung 1: Beispiel einer solar gestützten Nahwärmeversorgung mit Langzeitwärmespeicher /Quelle: ITW-Stuttgart/

Die von den Sonnenkollektoren gewonnene Wärme wird über das Solarnetz zur Heizzentrale transportiert und bei Bedarf direkt an die Gebäude verteilt. Die Kollektoren

ren sind auf ausgewählten Dächern der Wohngebäude montiert, der saisonale Wärmespeicher ist in das Gelände der Siedlung integriert. Die im Sommer anfallende Überschusswärme wird in den saisonalen Wärmespeicher eingespeist und im Herbst und Winter zur Heizungsunterstützung und Trinkwassererwärmung genutzt. Die Wärmeerzeugung in der Heizzentrale verwendet die im Langzeit-Wärmespeicher gespeicherte Solarwärme und heizt bei Bedarf konventionell (z.B. mit einem Gasbrennwertkessel) nach. Die Auslegung und Planung solar unterstützter Nahwärmanlagen ist detailliert in [1] beschrieben.

Zur saisonalen Wärmespeicherung stehen verschiedene Speicherkonzepte zur Auswahl. Nachfolgend werden die wesentlichen Systeme, eingegrenzt auf Temperaturanwendungen zwischen 20°C und 95°C (Anwendungen in Kombination mit Wärmepumpen werden hier nicht betrachtet), kurz dargestellt. Als Speichermedium kommt neben Wasser der natürliche Untergrund bzw. eine Kombination von beidem in Frage. Die Entscheidung für einen bestimmten Speichertyp hängt vor allem von den örtlichen Gegebenheiten und insbesondere von den geologischen und hydrologischen Verhältnissen im Untergrund des jeweiligen Standortes ab.

1.1 Heißwasser - Wärmespeicher

Hauptsächlich wird aufgrund der relativ hohen spezifischen Wärmekapazität von 4,19 kJ/(kg·K) und der leichten Verfügbarkeit Wasser als Speichermedium verwendet. Die vielseitigsten Einsatzbereiche eröffnen sich dem Heißwasser-Wärmespeicher, als Tankspeicher (Wassertanks) steht hier eine etablierte Technik zur Verfügung. Das Einsatzgebiet ist wegen der Formvariabilität und damit der Flexibilität groß und die Wärmeverluste können durch eine ausreichende Dämmung weitgehend unterbunden werden. Die Volumengrenze beträgt aus statischen Gründen etwa 100.000 m³

Er kann unabhängig von der Geologie und auch in kleiner Baugröße, z.B. als Tages- bzw. Wochenspeicher, eingesetzt werden.

Für den Bau eines Tankspeichers können verschiedene Materialien, wie z. B. diverse Metalle, Beton oder auch Kunststoffe, verwendet werden. Der Aufbau besteht meist aus 3 Schichten: ein das Wasser unmittelbar umgebendes, diffusionsdichtes Gefäß, der Wärmedämmung sowie dem äußeren Abschluss, der den gesamten Speicher mit Wärmedämmung vor mechanischen und auch vor witterungsbedingten Einwirkungen schützt. Auf Grund von negativen Erfahrungen mit durchnässten Dämmschichten werden geschlossoporige Materialien wie Blähglasgranulat oder PUR-Hartschaumstoffe bevorzugt. Aus Gründen der Temperaturschichtung ist eine große Höhe wünschenswert, die aber durch statische und bautechnische Aspekte begrenzt wird.

Da Metallspeicher als ausgereifte Technik betrachtet werden können, ist eine Senkung der volumenbezogenen Investitionskosten nicht zu erwarten. Der Forschungsschwerpunkt war deshalb auf den Einsatz alternativer Werkstoffe gerichtet.

Die Tragkonstruktion, hier beispielsweise aus Stahlbeton, ist teilweise oder ganz im Erdreich eingebaut. Die wasserdichte Auskleidung des Speichers ist in den ersten Pilotspeichern (Projekte in Rottweil, Hamburg und Friedrichshafen) aus Edelstahlblech ausgeführt. In Hannover kam ein neuartiger Hochleistungsbeton zum Einsatz, dessen Wasserdampfdurchlässigkeit so gering ist, dass auf eine zusätzliche Auskleidung verzichtet werden kann.

Die Speicher werden drucklos im Temperaturbereich von 20°C bis 95°C betrieben. Die Be- und Entladeeinrichtungen sind im Allgemeinen als Prallteller oder Ladetassen ausgeführt, um eine Durchmischung des Speicherinhaltes zu verhindern.

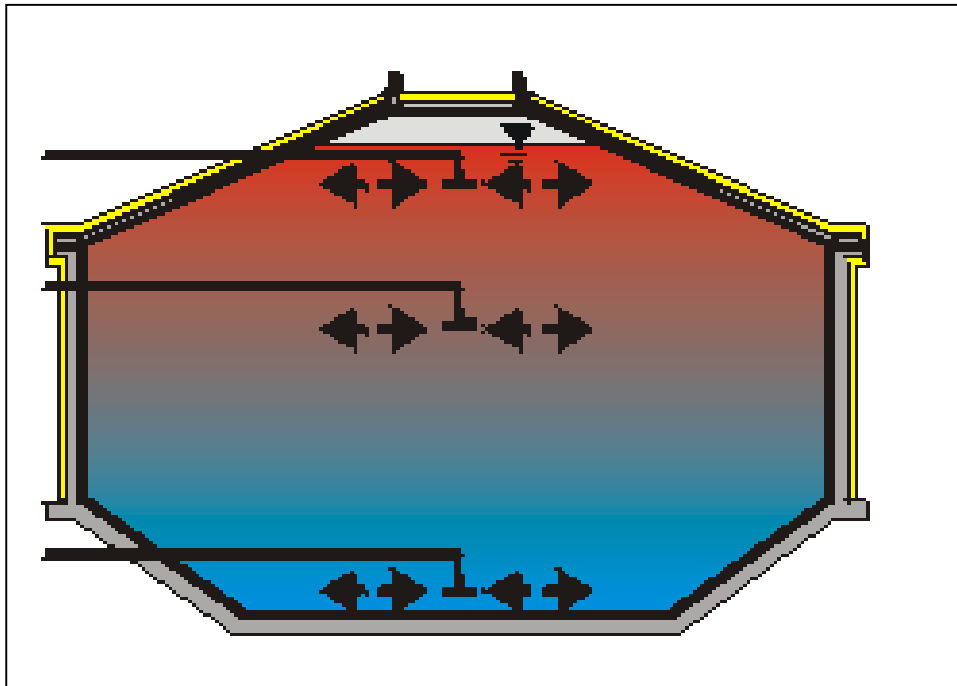


Abbildung 2: Heißwasser-Wärmespeicher (hier Betonspeicher) /Quelle ITW-Stuttgart/

1. 2 Kies/Wasser-Wärmespeicher

Eine weitere Möglichkeit der Langzeitwärmespeicherung ist eine mit wasserdichter Folie ausgekleidete Grube, gefüllt mit einem Kies/Wasser-Gemisch als Speichermedium.

Der Speicher ist seitlich und oben, bei geeigneter Druckfestigkeit des verwendeten Dämmstoffes auch nach unten wärmegeklämt. Gegenwärtig wird Blähglasgranulat als Wärmedämmung in Form von Schüttgut eingesetzt. Die Ein- und Ausspeicherung der Wärme erfolgt über direkten Wasseraustausch oder indirekt über im Kies/Wasser-Gemisch verlegte Rohrschlangen. Eine statische Tragkonstruktion ist nicht notwendig, da die auftretenden Lasten über den Kies an die Seitenwände und den Boden abgetragen werden.

Derzeitig werden zweilagige Polypropylen-Abdichtfolien (PP) ausgeführt, diese begrenzen die theoretischen Maximaltemperaturen auf ca. 90 °C. Zwischen den beiden PP-Lagen ermöglicht ein Vakuum eine Dichtigkeitskontrolle der Auskleidung.

Bedingt durch die geringere Wärmekapazität des Kies/Wasser-Gemisches von 1,31 kJ/kgK im Vergleich zu Wasser, muss das Speichervolumen ca. 50 % größer gewählt werden, um die gleiche Wärmemenge wie in einem Heißwasser-Wärmespeicher speichern zu können.

Kies/Wasser-Wärmespeicher sind in Stuttgart, Chemnitz, Augsburg und Steinfurt-Borghorst in Betrieb.

Der prinzipielle Aufbau ist in Abbildung 3 dargestellt.

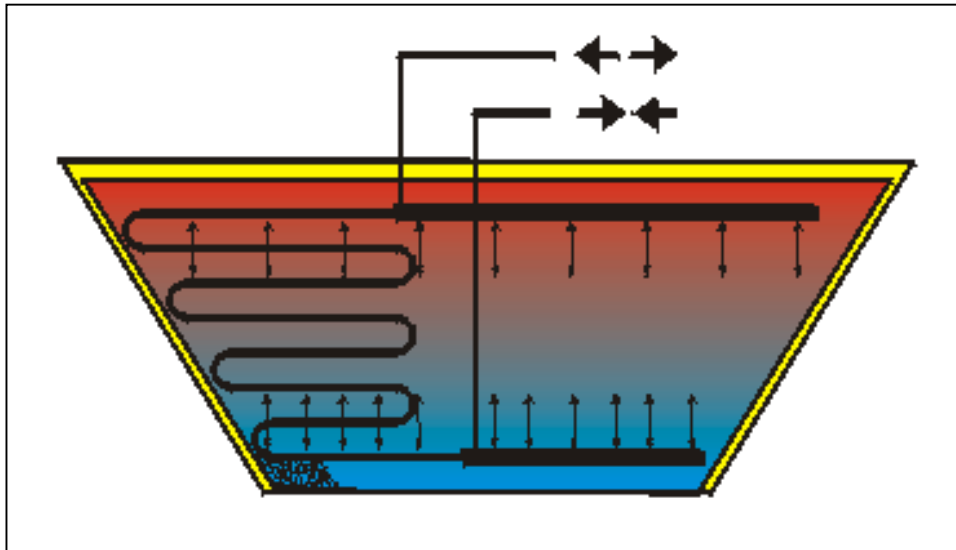


Abbildung 3: Kies/Wasser-Wärmespeicher /Quelle: ITW-Stuttgart/

1. 3 Aquifer-Wärmespeicher

Im Gegensatz zum Kies/Wasser-Wärmespeicher, werden beim Aquifer-Wärmespeicher natürlich vorkommende, nach oben und unten abgeschlossene Grundwasserschichten zur Wärmespeicherung genutzt (siehe Abbildung 4). Über eine Brunnenbohrung („kalte Bohrung“) wird dem Speicher Grundwasser entnommen, dieses über einen Wärmeübertrager erwärmt und über eine weitere Bohrung („warme Bohrung“) wieder in den Untergrund eingeleitet. Die Wärmeentnahme erfolgt durch eine Umkehrung der Durchströmungsrichtung (siehe Abbildung 5).

Aquifer-Wärmespeicher stellen sehr hohe Anforderungen an die geologischen Verhältnisse des jeweiligen Standortes bezüglich hydraulischer Durchlässigkeit, Grundwasserfließgeschwindigkeit, biologischer und chemischer Zusammensetzung des Grundwassers etc.. Sie können nicht zur Umgebung hin wärmgedämmt werden. Speicher mit hoher Temperatur sind deshalb nur bei großen Speichervolumen zu empfehlen.

Bei Temperaturen oberhalb 50°C kann es je nach geologischen Gegebenheiten zu biologischen und geochemischen Veränderungen des Grundwassers kommen. Dies kann gegebenenfalls zu Ablagerungen an Wärmeübertragern und den Brunnenfiltern führen, wodurch es im Extremfall zu einem Erliegen der Förderfähigkeit der Brunnen kommen kann. Um dies zu verhindern, muss in solchen Fällen eine geeignete Wasseraufbereitung während des Betriebs erfolgen. Aquiferwärmespeicher sind z. B. in Rostock und in Berlin (Reichstagsgebäude) in Betrieb.

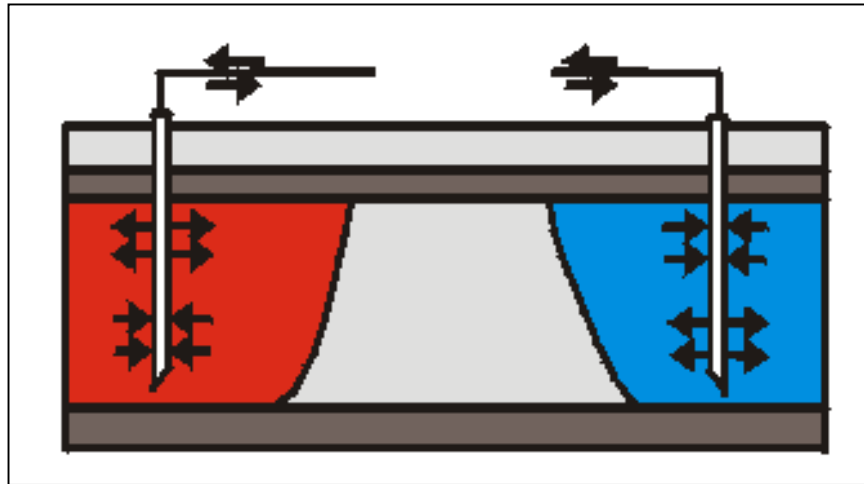


Abbildung 4: Aquifer-Wärmespeicher /Quelle: ITW-Stuttgart/

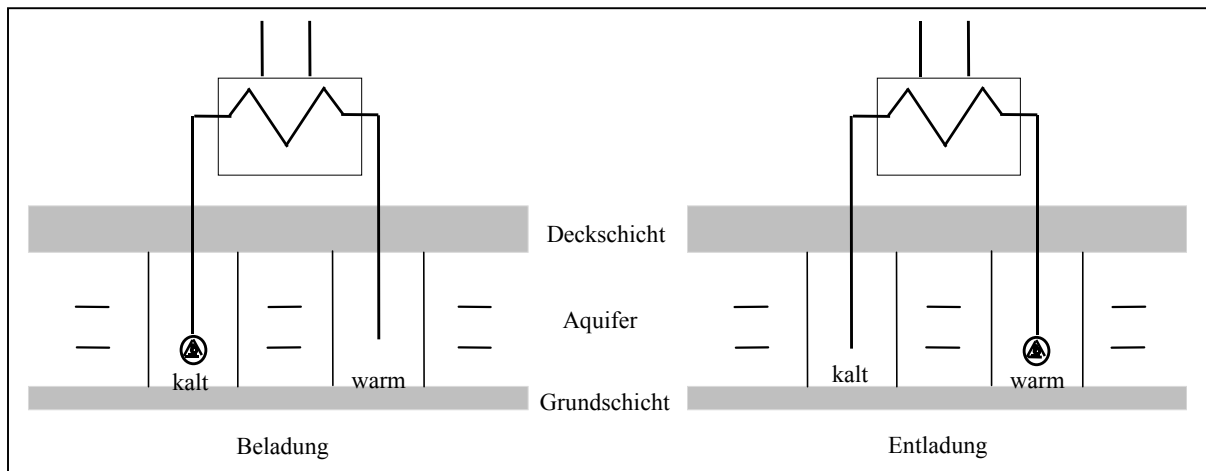


Abbildung 5: Prinzip der Beladung und Entladung eines Aquifer - Wärmespeichers

1.4 Erdsonden-Wärmespeicher

Beim Erdsonden – Wärmespeicher (siehe Bild 6) wird die Wärme direkt im Erdreich gespeichert. Über Erdwärmesonden wird die Wärme in den Untergrund ein- bzw. aus diesem ausgeladen. Die Sonden sind als U-Rohr oder Koaxialrohr ausgeführt. Geeignete Untergründe für Speicher dieser Art sind wassergesättigte Tone bzw. Tonsteine mit keiner oder nur geringer Grundwasserströmung. Typisch sind Bohrlochdurchmesser von 100 – 200 mm, Abstände zwischen zwei Bohrlöchern 1,5 – 3 m und Bohrlochtiefen von 20 – 100 m. Eine Wärmedämmung ist nur zur Oberfläche möglich. Auf Grund der hohen Wärmeverluste zu den Seiten und nach unten sind nur große Speicher (>50.000 m³) dieses Typs sinnvoll, um ein günstiges Oberflächen/Volumen Verhältnis zu erreichen.

Die maximalen Speichertemperaturen liegen bei ca. 80°C, begrenzt durch die

Temperaturbelastbarkeit des Materials der Erdwärmesonden.

Durch die geringere Wärmekapazität des Erdreichs gegenüber Wasser und aufgrund einer geringeren Temperaturspreizung im Betrieb, müssen Wärmespeicher dieser Bauart im Vergleich zu Heißwasser-Wärmespeichern ein etwa 3 bis 5 mal größeres Volumen besitzen. Vorteil dieses Speichertyps ist der im Vergleich zu Heißwasser-Wärmespeichern geringere Bauaufwand sowie ein möglicher modularer Aufbau bzw. eine sich dem Baufortschritt eines Wohngebietes anpassende Speichergröße. Ein Erdsonden-Wärmespeicher ist z. B. in Neckarsulm mit einem ausgebauten Volumen von 63.360 m³ in Betrieb.

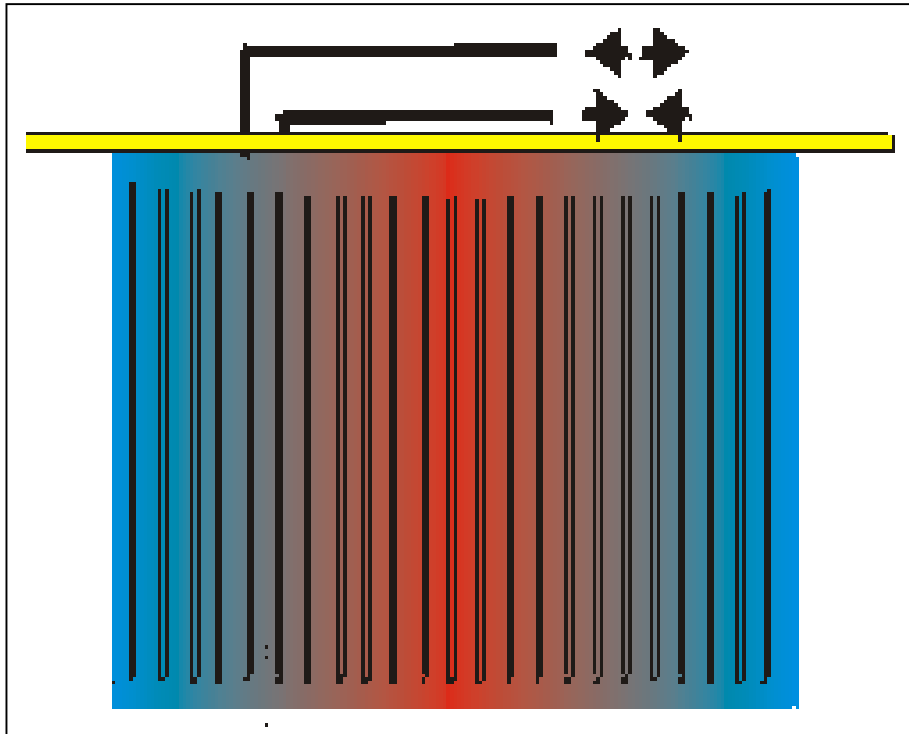


Abbildung 6: Erdsondenwärmespeicher /Quelle ITW-Stuttgart/

1.5 Aussicht

In dem vom BMWi, Projektträger Jülich geförderten Forschungsprogramm ST2000, TP3 werden Langzeitwärmespeicher mit Pilotcharakter in Nahwärmesystemen erprobt. Auf Grund des Temperaturniveaus der von solarthermischen Anlagen (i. Allg. Flachkollektoren) zur Verfügung gestellten Wärme und dem Bedarf von max. 60°C für die Trinkwasservorwärmung wurde mit Sicht auf den maximalen Wirkungsgrad (Kollektorwirkungsgrad und thermische Verluste) auf einen Speichertemperaturbereich von 20°C bis 95°C orientiert.

Hochtemperatur-Wärmespeicher, Latentwärmespeicher und chemische Wärmespeicher wurden teilweise schon in anderen Forschungsprogrammen untersucht.

Kennzeichnend für die bisherige Speicherentwicklung sind aufwendige Herstellung, einschließlich der Isolierung, aufwändiger Feuchtigkeitsschutz der Isolierung

und/oder des ganzen Speichers, hohe Kosten für Erdaushub, relativ hohe Kosten pro m³ - Speichervolumen (Wasseräquivalent) und hohe Speicherverluste.

2. Wärmelangzeitspeicherung mit einem neuen Speicherkonzept

2.1. Ziel der Entwicklung

Ziel der hier beschriebenen Entwicklung ist ein vergleichbarer Heißwasser - Wärmelangzeitspeicher mit folgenden Eigenschaften:

- Temperaturbereich von 20. . . 95°C
- Modularer Aufbau, Vorfertigung, Endmontage vor Ort auf der Baustelle
- niedrige Gestehungskosten pro m³ Wasseräquivalent
- Einsatz von Glasfaserverbundwerkstoffen (GFK), Außenwand GFK, Kern aus PUR –Hartschaum (Polyurethan), Innenwand aus GFK, Sandwichstruktur
- Unempfindlichkeit des eingesetzten Materials gegen Korrosion
- Boden wahlweise gedämmt oder nicht gedämmt zur Nutzung des Wärmespeichervermögens des darunter liegenden Erdreiches
- Nach innen führende Anschlussleitungen aus Nichtmetall, zur Vermeidung von Wärmebrücken
- Aufstellung wahlweise komplett oberirdisch, in Gebäude integriert, ganz oder teilweise im Erdreich eingegraben
- Grenznutzungsdauer >25-30 Jahre
- Die Geometrie wird durch Forderungen der Statik, eines optimalen A/V-Wertes und der Erreichung einer guten Temperaturschichtung bestimmt
- Speichergröße von 100... 6500 m³

Schon 1996 gab es erste Projektskizzen von Seiten der TU Ilmenau für die Gestaltung eines 6000 m³ GFK-Wärmelangzeitspeichers (Siehe Abbildung 7). Die Realisierung einer Konstruktion dieser Größenordnung wollte man aber auf Grund fehlender Erfahrungen im angestrebten Temperaturbereich nicht eingehen und führte ein Forschungs- und Erprobungsprogramm zur Entwicklung einer Baureihe durch, von der Auswahl der Materialkombinationen, über Belastungstests und dem Bau und der Erprobung eines 1,3 m³ Musterspeichers, eines 300 m³ Pilotspeichers, bis zum Bau eines 20 m³ Musterspeichers „Neuer Technologie“.

Auf der Basis dieser Projektskizzen wurde ein Verbundpartner aus der Industrie gesucht und mit der Firma VKA GmbH Schönbrunn in das Forschungsprogramm einbezogen.

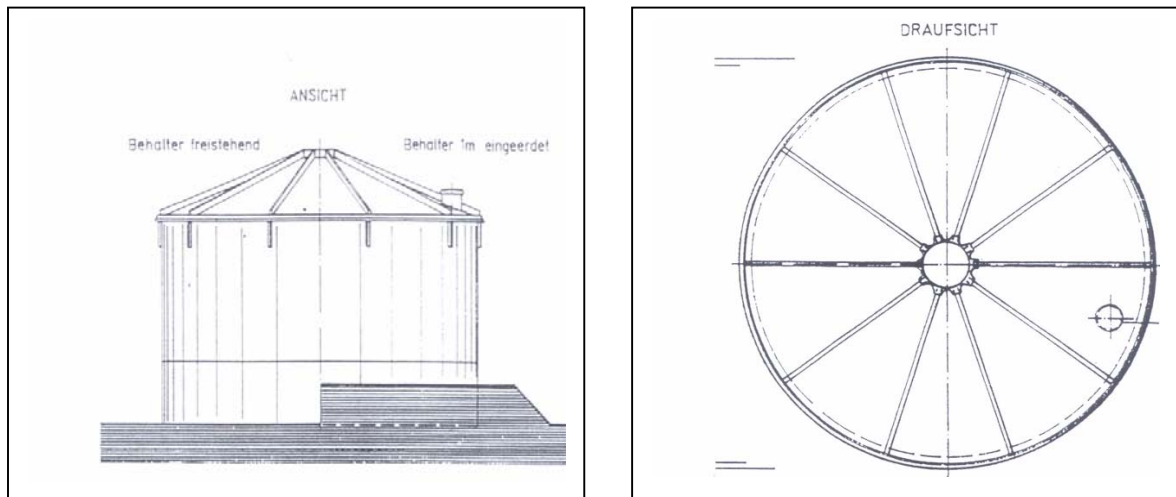


Abbildung 7: Erste Projektskizze eines 6000 m³ GFK-Heißwasserspeichers

2.1.1 Warum eine Konstruktion aus glasfaserverstärktem Kunststoff (GFK)?

GFK ist ein Verbundwerkstoff aus Glas und Harz.

Er verbindet die extrem hohe Reißfestigkeit der Glasfasern mit der Korrosions- und Medienbeständigkeit des Harzes. Je nach Anforderungsprofil werden ungesättigte Polyester-, Vinylester- oder Epoxidharze eingesetzt. Auch durch die Wahl der Verstärkungsfasern in Form von Textilglas-, Synthese- oder Kohlefaserarten verändern sich die Charakteristika des Werkstoffs. Neben den Werkstoffkomponenten bestimmen Wandaufbau und Fertigungstechnik das endgültige mechanische (Siehe Abbildung 8) und chemische Profil des GFK-Bauteils.

Wie kein anderer Werkstoff läßt sich der Duroplast GFK damit auf ein spezielles Anforderungsprofil optimal „einstellen“ [5].

Die hier verwendeten ungesättigten Polyesterharze (UP) wurden erstmalig 1934 von H. STAUDINGER untersucht [6]. ELLIS und FORSTER USA, erhielten 1936 das erste Patent betreffs Polymerisation ungesättigter Polyester in formgebenden Werkzeugen. Die United Staes Rubber Comp. fand 1942, dass die mechanischen Eigenschaften von Polyesterharzen durch Verstärken mit Glasfasern wesentlich verbessert werden können.

Das GFK – Material sorgt für die notwendige mechanische Festigkeit. Die Glasübergangstemperatur t_g liegt bei 130°C und die Wasseraufnahme nach DIN 53765 bei 0,13 % [8].

Die geforderte Dämmwirkung der Sandwichstruktur (Siehe Abbildung 15) wird durch die Verwendung von PUR (Polyurethan) – Hartschaum mit einem λ - Wert von ca. 0,03 W/(m*K) erreicht.

Hartschaumstoffe weisen nach [7] bei Druckbeanspruchung einen relativ hohen Verformungswiderstand auf. Ihre Haupteigenschaften bestehen in der hervorragend niedrigen Wärmeleitung infolge der in den geschlossenen Zellen (Anteil > 90 %) vorhandenen Dämmgasen (Pentan, CO₂, FCKW-frei) und der hier genutzten Fähigkeit, mit fast allen flexiblen oder starren Deckschichten feste Verbunde einzugehen (Im Gegensatz zu Mineralwolle, Glasschaum, Blähglasgranulat, ...). Der Rohdichtebe

reich liegt zwischen 30..90 kg/m³. Die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl (μ) liegt bei PUR – Hartschaum ohne Deckschicht zwischen 30 ...100.
GFK – Verbundmaterial ist langzeitstabil und chemisch unbedenklich. Für das Recycling ist die thermische Verwertung am günstigsten, dabei entstehen keine Rückstände, die kostenintensiv endgelagert werden müssen.

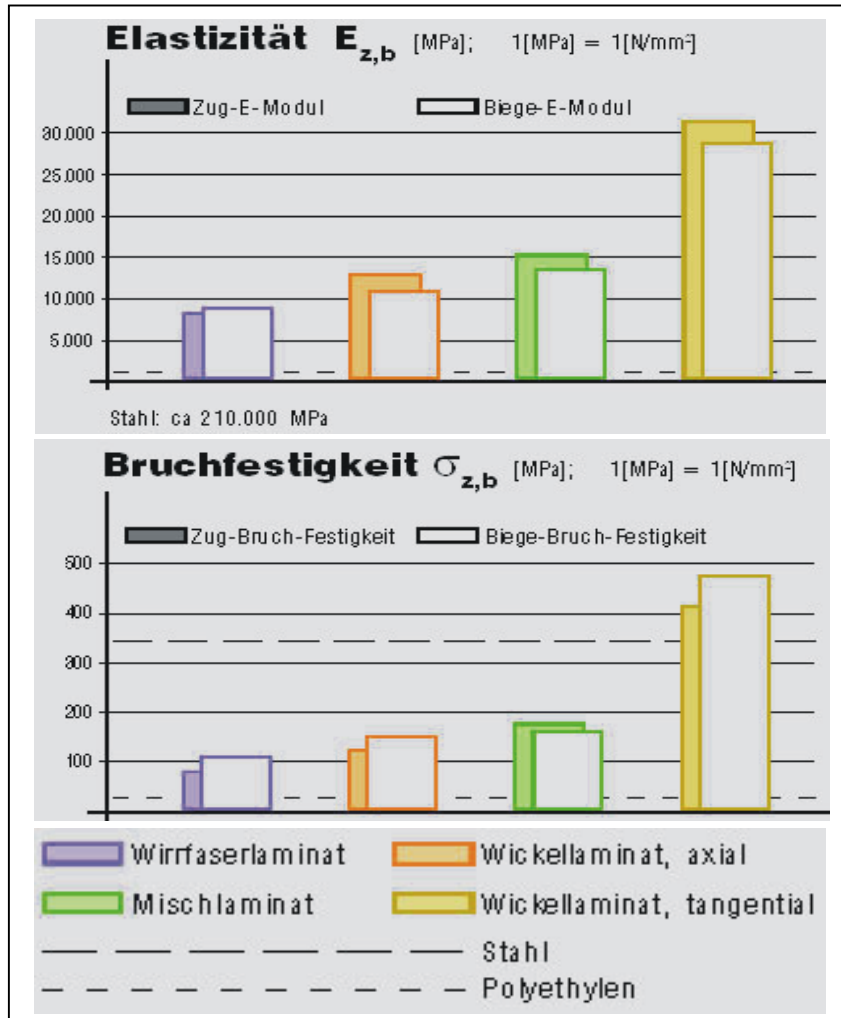


Abbildung 8: Anpassung der GFK-Materialeigenschaften [5]

2.1.2 Aufbau der Speicherwand

Die Speicherwand ist in Sandwichbauweise ausgeführt (Siehe Abbildung 9), bestehend aus einer 6...10 mm Innenwand (heißwasserbeständiges GFK-Material), einer entsprechend den Anforderungen von 100....200 mm (Siehe Abbildung 10) frei wählbaren Dämmschicht aus PUR - Hartschaum und einer äußeren Tragschicht mit 6...10 mm Stärke.



Abbildung 9: Prinzipieller Aufbau der Speicherwand mit integrierter Dämmung

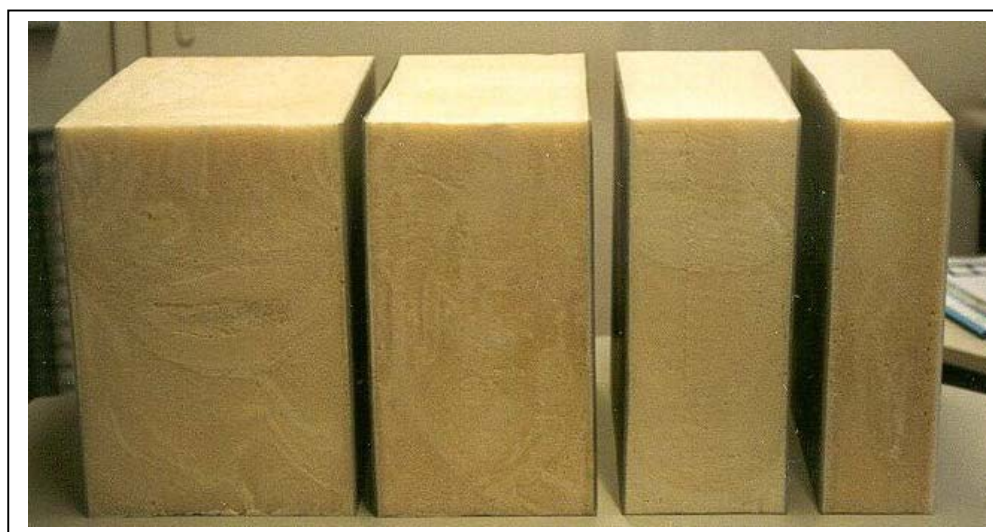


Abbildung 10: Sandwichelemente mit unterschiedlichen Dämmstärken

Die Stärke der Dämmung ist abhängig vom geplanten Verwendungszweck, ob Tages-, Wochen- oder in diesem Fall Saisonspeicherung des solaren Energieangebots. Der hier verwendete PUR – Hartschaum hat eine Dichte zwischen 40 und 58 kg/m³. Die Wärmeleitfähigkeit für den Wandquerschnitt wurde mit Hilfe eines Messstandes an der TU Ilmenau in einer Versuchsreihe ermittelt und lag zwischen $\lambda = 0,03 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (bei einer PUR – Schaum - Dichte von 40 kg/m³) und $\lambda = 0,05 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ (bei einer Dichte von 58 kg/m³).

2.2. Entwicklung und Erprobung eines 1,3 m³ Musterspeichers

Zur Absicherung der Konzeption des Heißwasser – Wärmelangzeitspeichers aus Verbundwerkstoffen wurde 6/96 entschieden einen Musterspeicher aus ausgewählten Materialien zu erstellen. Gebaut wurde der 1,3 m³ Speichervolumen große Speicher als Sandwichkörper mit PUR – Hartschaumdämmschicht, sowie Innen- und Außenschicht aus verschiedenen Mischlaminaten. Ziel der Untersuchung war die Auswahl der besten Materialkombinationen unter den Gesichtspunkten:

- Temperaturbeständigkeit > 95 °C und Medienbeständigkeit (Wärmeträger Wasser)
- Langzeitstandfestigkeit
- Korrosionsfestigkeit der Außenhülle gegenüber Wetter und UV-Strahlung
- Kostengünstige Materialkombination
- Gute Wärmdämmeigenschaften

Der Musterspeicher wurde gemeinsam mit dem Verbundpartner auf dem Gelände der TU Ilmenau (Siehe Abbildung 11) errichtet und in einen Versuchsstand eingebunden .



Abbildung 11: 1,3 m³ Musterspeicher am Standort TU Ilmenau

Der Musterspeicher wurde von 11/96 bis 12/97 in mehreren Versuchszyklen getestet. Die Aufheizung erfolgte direkt mit max. 3 kW elektrischer Leistung über Eintauchheizungen. Die Temperaturmessung erfolgte über verschiedene Platinwiderstands-

thermometer PT100 , an verschiedenen ausgewählten Stellen in der Wandung oder im Wasser. Die Erfassung erfolgte mit Hilfe eines Datenloggers.

Der Speicher wurde in verschiedenen Zyklen aufgeheizt, für die Materialerprobung und Auswahl längere Zeit auf 97°C gehalten, zur k-Wert-Bestimmung wurde die Abkühlkurve mit Ermittlung der Speicherzeitkonstante aufgenommen und Thermografieaufnahmen (Siehe Abbildung 12) zur Schwachstellenanalyse durchgeführt.

Die ersten Versuche ergaben einen k-Wert von **k = 0,37 W/m²K** .

Dieser Wert lag im erwarteten Bereich. Thermische Schwachstellen zeigten sich im Bereich von Durchführungen, die durch zusätzliche Dämmmaßnahmen für die nachfolgenden Versuche behoben wurden.

Der nach der zusätzlichen Dämmung durch Messungen ermittelte k-Wert des Speichers lag bei **k = 0,29 W/m²K** , dies lag bei 10 % Abweichung zum Vorhersagewert der durchgeführten TRNSYS – Simulationsrechnungen [2].

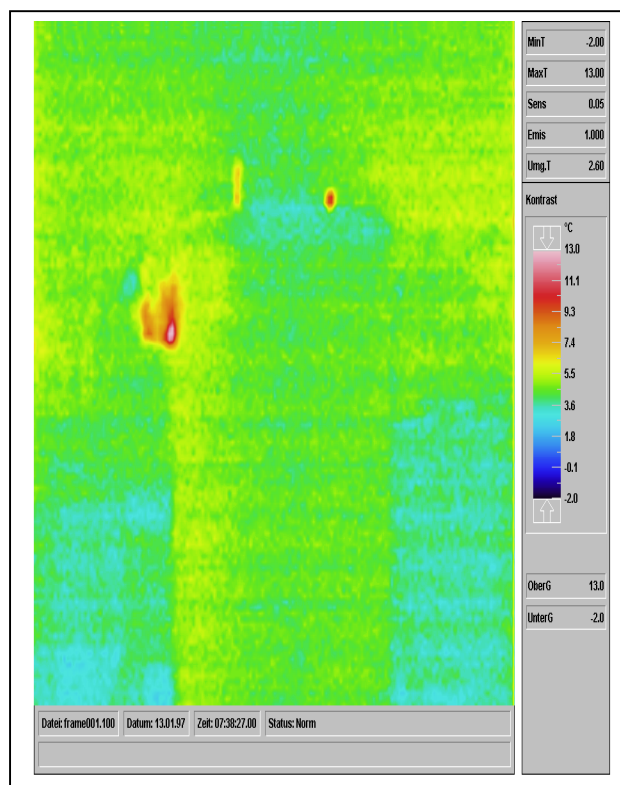


Abbildung 12: Thermografieaufnahme des Musterspeichers mit sichtbaren Wärmebrücken an den Metalldurchführungen

Die Analyse der Ergebnisse der ersten Versuche zeigte, dass ein Warmwasserspeicher aus GFK und PUR - Hartschaum als Wärmedämmung gut zur Wärmelangzeit-speicherung geeignet ist. Eine Verbesserung der Wärmeübergangszahl ist zu erwarten, wenn das Verhältnis ummantelnde Fläche / zu Volumen (A/V – Verhältnis), die Dicke der Dämmung, als auch die Isolierung der Anschlussverbindungen verbessert werden.

Der Nachweis der Langlebigkeit der eingesetzten Materialien wurde experimentell erbracht (siehe hierzu auch [8], Abschlußbericht VKA GmbH).

2.3. Entwicklung des 300 m³ Pilotspeichers

Ziel der GFK – Speicherentwicklung ist die Schaffung eines Wärmelangzeitspeichers mit verbesserten technischen Eigenschaften und niedrigeren Kosten gegenüber den unter 1.1...1.4. genannten Speicherkonzepten.

Die Entwicklung wurde bis zum Bau eines 300 m³ Pilotspeichers als Verbundprojekt durch den Freistaat Thüringen vom Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur (TMWFK) mit 770 TDM (394 T€) gefördert.

Auf der Grundlage der mit dem 1,3 m³ Musterspeicher gesammelten Erfahrungen wurde ein 300 m³ GFK - Speicher der ersten Generation entwickelt und 1997 am Standort Schortetal bei Ilmenau errichtet, der sich durch folgende Merkmale auszeichnet:

- modularer Aufbau
- Möglichkeit, aus den Modulen Speicher mit verschiedenem Rauminhalt (ca. 100 bis ca. 600 m³) zu fertigen
- Wandaufbau aus einer Außenschicht GFK (ca. 6 mm), 150 mm Kern aus PUR - Hartschaum, Innenschicht aus GFK (6.. 10 mm)
- Flachdach in gleicher Bauweise mit Mannloch
- Mittelstütze aus gedämmten GFK – Rohr mit innenliegender Entwässerung
- Inspektionsleitern außen und innen
- Boden wahlweise isoliert oder unisoliert zur Nutzung des Wärmespeichervermögens des darunter liegenden Erdreiches
- Nach innen führende Anschlussleitungen aus Kunststoff, zur Vermeidung von Wärmebrücken
- Aufstellung wahlweise komplett oberirdisch, in Gebäude integriert oder ganz/ teilweise eingegraben, hier komplett oberirdisch
- Verschiedene Be- und Entlademöglichkeiten (Schichtenladevorrichtungen, 2 Wärmepumpen mit je 14,5 kW elektrischer Leistung bis 60 °C, 25 kW Flüssiggasbrennwerttherme für den Temperaturbereich über 60 °C bis 82°C, Entladung über Wärmetauscher mit 9 °C Grubenwasser, siehe Abbildung 20)

Nach umfangreichen FEM – Berechnungen wurde entschieden, mit erhöhten Sicherheitsreserven zu arbeiten, und die Konstruktion und Erprobung des GFK – Langzeitwärmespeichers in zwei Varianten vorzunehmen. Die erste Generation wurde am 300 m³ Pilotspeicher, bestehend aus 5 horizontalen Zylinderringen, zusammengesetzt aus je 3 horizontalen 180 ° Wandsegmenten pro Kreisring, mit Schraubsicherung verwirklicht (Siehe Abbildung 13).



Abbildung 13: Schraubverbindungen am 300 m³ Pilotspeicher im Detail

Für die Bestimmung der Behälterdimensionen wurde für das vorgegebene Speichervolumen von 300 m³ eine Oberflächenoptimierung durchgeführt. Eine verlustarme Kugelform konnte aus technologischen Gründen nicht realisiert werden, deshalb wurde für die Zylinderform die Oberfläche minimiert (Siehe Abbildung 14)

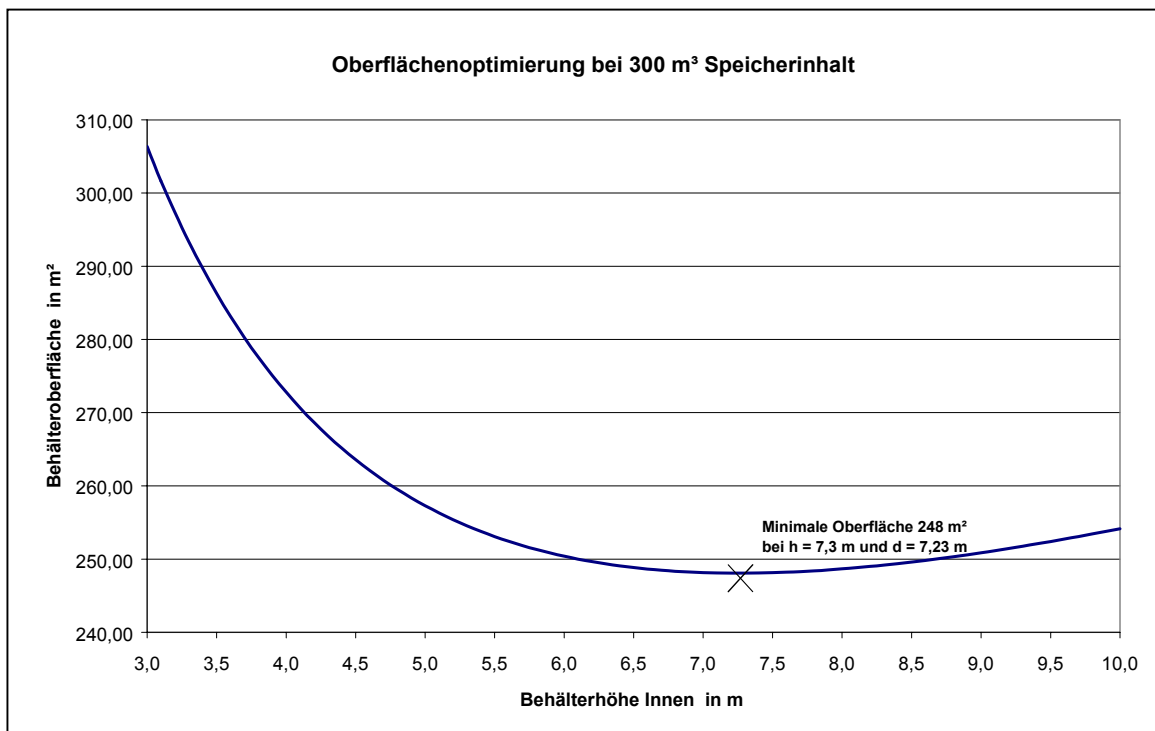


Abbildung 14: Oberflächenoptimierung bei 300 m³ Speichervolumen

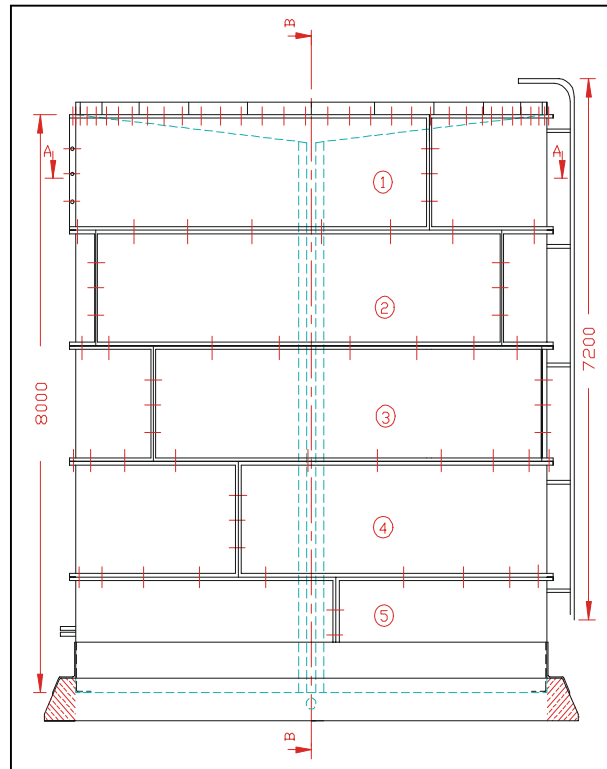


Abbildung 15: Seitenansicht des 300 m³ GFK - Pilotspeichers

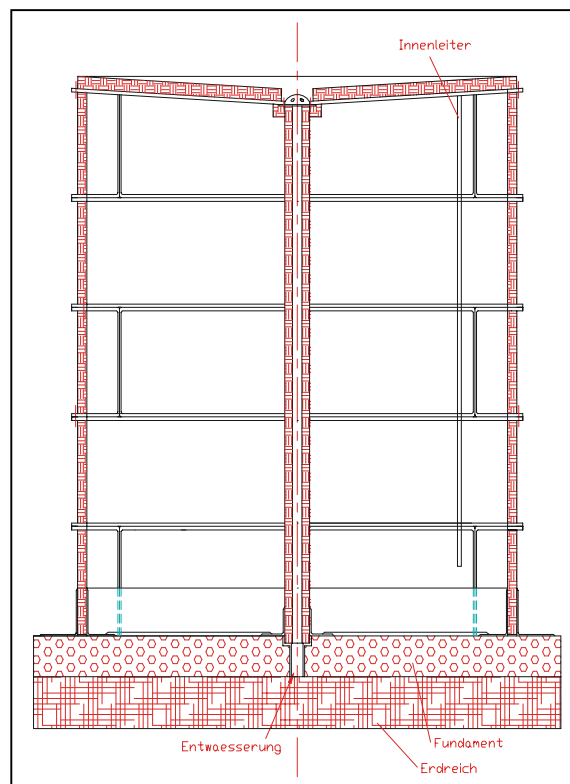


Abbildung 16: Schnittbild des 300 m³ GFK - Pilotspeichers

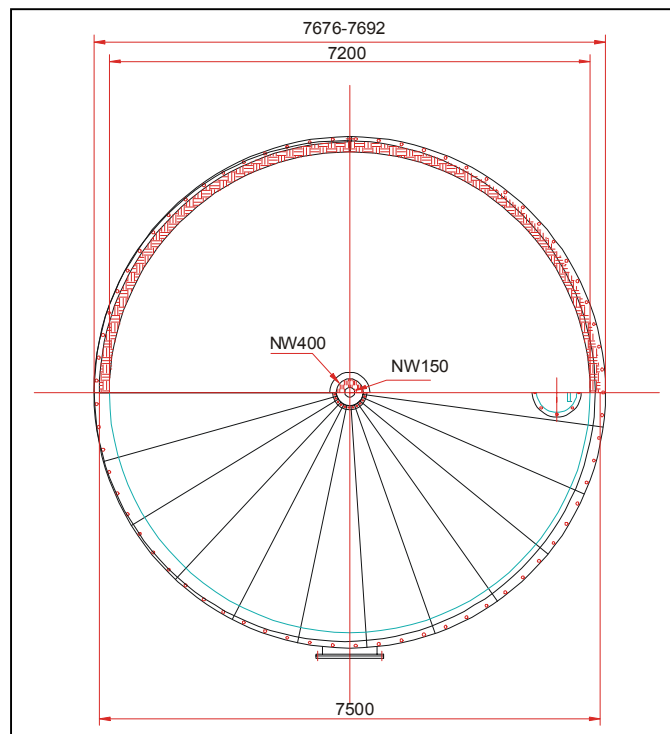


Abbildung 17: Schnittbild der Dachkonstruktion für den 300 m³ Pilotspeicher

Die Gesamthöhe des Speichers beträgt außen 8 m, der Innendurchmesser 7,2 m, das ergibt ca. 325 m³ maximalen Speicherinhalt (inkl. Ausdehnungsvolumen).

Es wurde entschieden, das Fundament vorerst ohne entsprechend gestaltete integrierte Wärmedämmung auszuführen. Bei Wärmespeichern ohne derartige Wärmedämmung ist zu erwarten, dass das unter dem Speicher liegende Erdreich (Umfeld) nach einigen Heizperioden (unter der Voraussetzung eines kontinuierlichen Betriebes) zum Wärmespeichervermögen mit beiträgt. Die Messergebnisse zeigen in der Anfangsphase die Differenzen zwischen der Hülle des Speichers und der Bodenplatte bzgl. der Verluste sehr deutlich.

Bei ungestörten Bodenverhältnissen und kontinuierlichem Anlagenbetrieb kann man davon ausgehen, dass sich ein stationärer Zustand im Bodenbereich nach 3 - 5 Jahren einstellt.

Die Statik des 300 m³ Pilotspeichers wurde mit Hilfe von FEM – Berechnungen beim Verbundpartner ILL Dresden nachgewiesen. Der Bauplatz des Pilotspeichers war ein Aufschüttungsgebiet, das Erdreich musste bis in ca. 2,5 m Tiefe ausgetauscht werden.

Die ca. 300 t Bruttogesamtgewicht des Speichers mit 300.000 l Wasserfüllung machte eine aufwendige Stahlarmierung der Fundamentplatte (Abbildung 18) erforderlich, hierbei konnte durch den Einsatz einer verlorenen Schalung eine starke Kostenreduzierung für dieses Los erzielt werden.



Abbildung 18: Fundamentaufbau mit umfangreicher Stahlarmierung



Abbildung 19: Aufbau des ersten Ringes



Abbildung 20 und 21: Verschiedene Fertigstellungsphasen

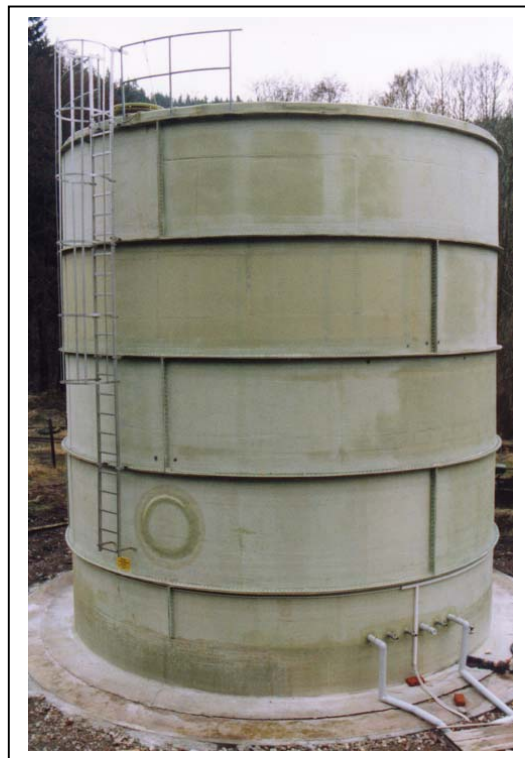


Abbildung 22: Fertig montierter 300 m³ GFK - Pilotspeicher

Am Standort Schortetal sind, bedingt durch die örtlichen Gegebenheiten eines stark eingeschnittenen Tales, die Möglichkeiten zur Nutzung einer angedachten solarthermischen Anlage für die Versuchsdurchführung eingeschränkt, wenn nicht ganz unmöglich. Deshalb wurde auf eine alternative regenerative Energiequelle zurückgegriffen. Das Wasserangebot eines ehemaligen Bergwerksstollens, Überhauen 100, wurde in einem Messprogramm auf den zeitlichen Temperaturverlauf, Strömungsgeschwindigkeit und Wasservolumen des Stollenwassers untersucht.

Die hier zur Verfügung stehende Wassermenge mit einer ganzjährigen Durchschnittstemperatur von 9... 10,5 °C wurde mit Hilfe von 2 Wärmepumpen a. 14,5 kW elektrisch für die Beladung und über einen Wärmetauscher zur Entladung des Pilotspeichers genutzt (Siehe Abbildung 23). Bis zu einer Grenztemperatur von 60 °C, bei vertretbarer Arbeitszahl, kann dieses zum Beladen des Speichers eingesetzt werden.

Die nutzbare Maximaltemperatur liegt im GFK-Wärmespeicher bei 95°C, für die Erprobung war deshalb ein Heizsystem mit dieser Grenztemperatur notwendig.

Deshalb wurde als zweites Aufheizsystem eine 25 kW Flüssiggasbrennwertherme installiert und in die Hydraulik eingebunden (Siehe Abbildung 23)

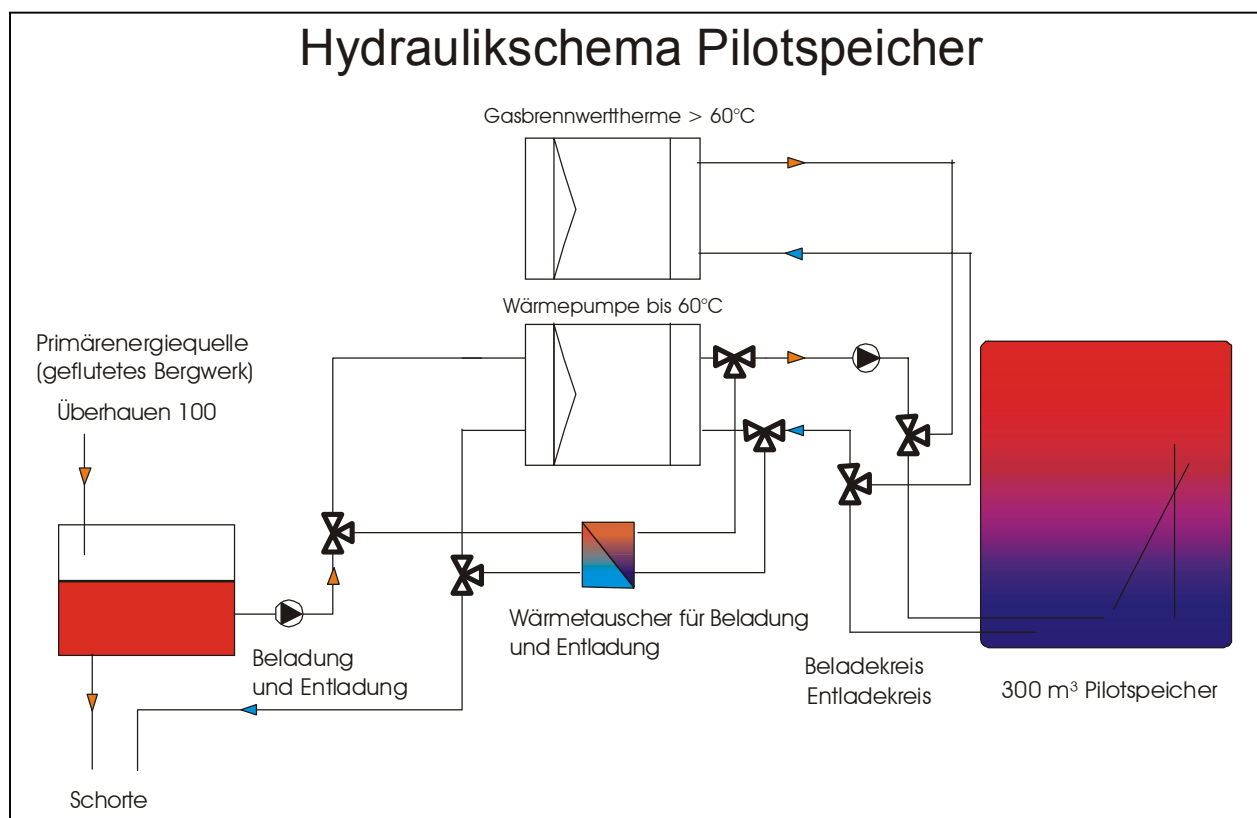


Abbildung 23: Hydraulikschaltbild für die Be- und Entladung des 300 m³ GFK - Pilotspeichers



Abbildung 24: Wärmepumpen und Datenlogger im Technikraum des Pilotspeichers

Zur Durchführung des Versuchsbetriebes wurde ein umfangreiches Messsystem, bestehend aus einem Datenlogger der Fa. Schühle, 2 Volumenstromzählern, 24 Stück Pt 100 Temperatursensoren am Aufheizsystem, im Speicher und im Boden und der Umgebungsluft, aufgebaut (Siehe Abbildung 25).

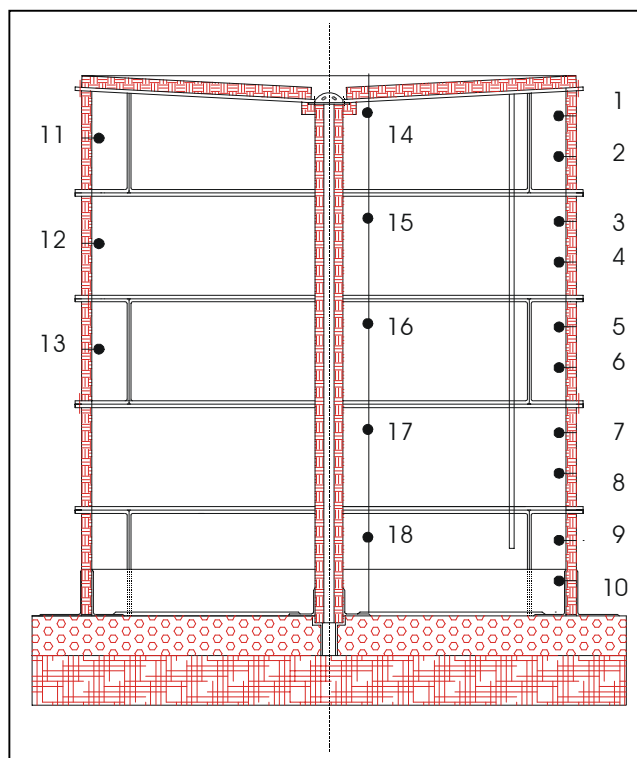


Abbildung 25: Anordnung der Pt 100 Temperaturmessstellen am Pilotspeicher



Abbildung 26: Temperaturmessstellen im Speicher (500 mm Tauchhülsen)

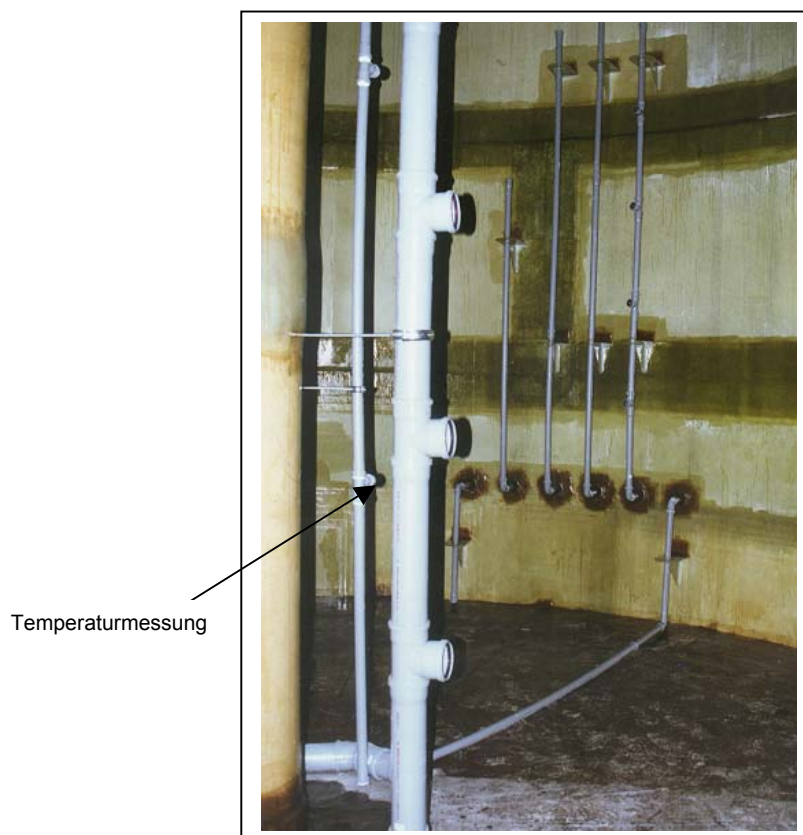


Abbildung 27: Be- und Entladesystem Variante 1 und Temperaturmessstellen im Zentrum des Pilotspeichers

Nach erfolgter Befüllung und Dichtheitsprüfung wurde der 300 m³ GFK – Pilotspeicher im Januar/Februar 1998 erstmalig aufgeheizt. Erste Untersuchungen zur Schichtung konnten im Temperaturbereich bis 60 °C (Nur Wärmepumpenbetrieb) durchgeführt werden.

Mit der Variante 1 des Beladesystems konnte die erwartete große Schichtung (Siehe Abbildung 28) nicht erzielt werden, obwohl zum Zeitpunkt der Messungen die später festgestellten Fehler noch nicht dominierten. Eine maximale Temperaturdifferenz von 3 K ist für den vorgesehenen Einsatz in solarthermischen Nahwärmesystemen zu gering.

In nachfolgenden Aufheizversuchen veränderte sich das Verhältnis zu Ungunsten der Rücklauftemperatur TSK_T. Die Temperatur TSP10_T (gemessen in 0,8 m Höhe), lag dabei unter der Rücklauftemperatur.

Die Ursache konnte erst nach Leerung und Sichtung des Speichers festgestellt werden, es hatten sich Anschlussleitungen abgelöst (Siehe Abbildung 28).

Dieser Installationsfehler führte dazu, dass der Vorlauf der Speicherbeladung nur bedingt über die Schichtenladevorrichtung erfolgte. Der Rücklauf entnahm das Wasser in 1 m Speicherhöhe und nicht wie vorgesehen direkt am Speicherboden.

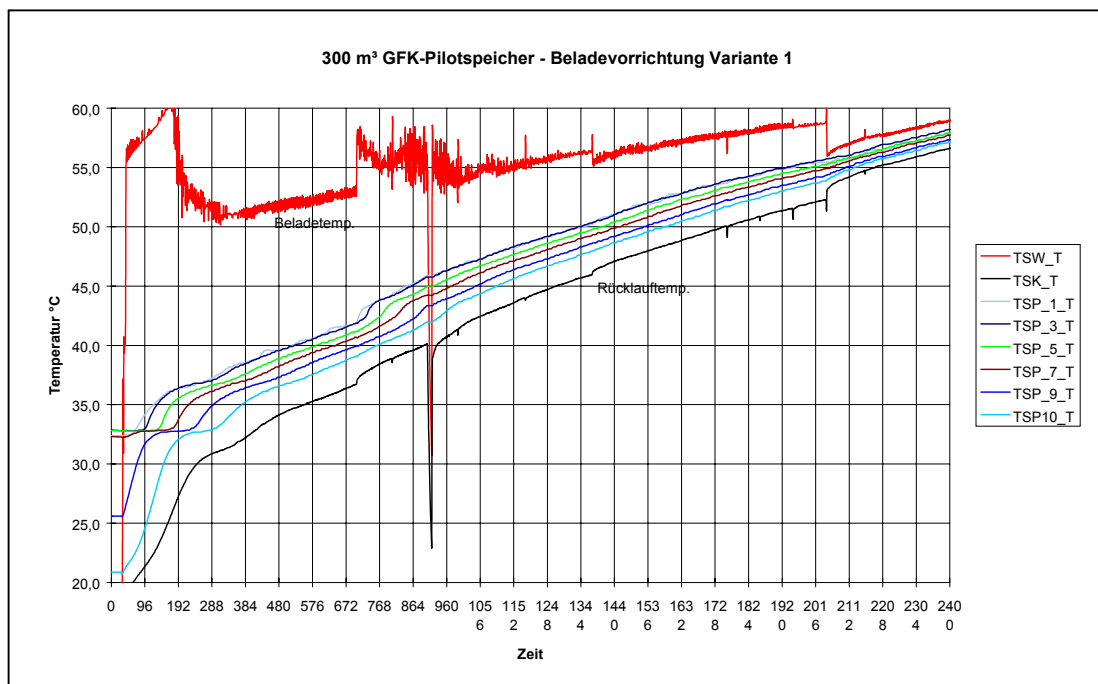


Abbildung 28: Beladung des 300 m³ Pilotspeichers mit Beladevariante 1



Abbildung 29: Revision des 300 m³ Pilotspeichers; deutlich zu sehen sind die gelösten Rohrverbindungen

Schon nach einer Messperiode, wurde während der ersten Revision des Speichers, ein weiterentwickeltes Beladesystem Typ Consens (Siehe Abbildung 30) eingebaut.

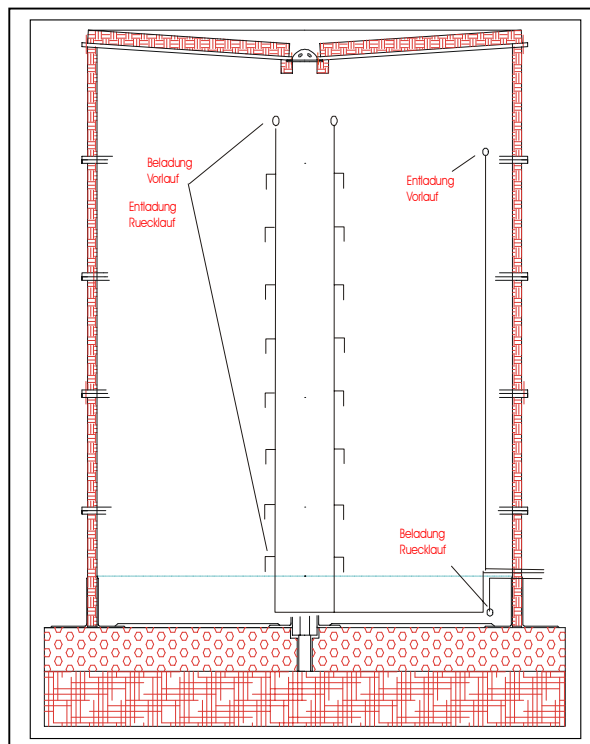


Abbildung 30: Beladevorrichtung Variante 2

Der so veränderte Speicher wurde wieder mit Wasser gefüllt, es erfolgte eine erneute Beladung bis zu einer Temperatur von 60 °C mit Hilfe der beiden Wärmepumpen und der Primärwärmequelle (10 °C Stollenwasser aus dem Überhauen 100). Die fixierten Anschlussleitungen hielten im weiteren Versuchsbetrieb den Anforderungen stand. Die Beladekurve (Siehe Abbildung 28) zeigt eine verbesserte Schichtung über den gesamten Aufheizprozeß. Dies ist noch nicht ausreichend, weil der Bodenbereich eine zu hohe Temperatur erreicht und durch den nicht isolierten Boden ein erhöhter Wärmeverlust auftritt.

Die erreichte geringe Schichtung bei diesem Speicher, mit einem ungünstigen Durchmesser/Höhe – Verhältnis (7m / 8 m), galt es während der Weiterführung des Forschungsthemas an einem 20 m³ Musterspeicher mit ähnlichem d/h – Verhältnis zu untersuchen, zu optimieren und einer Lösung zuzuführen.

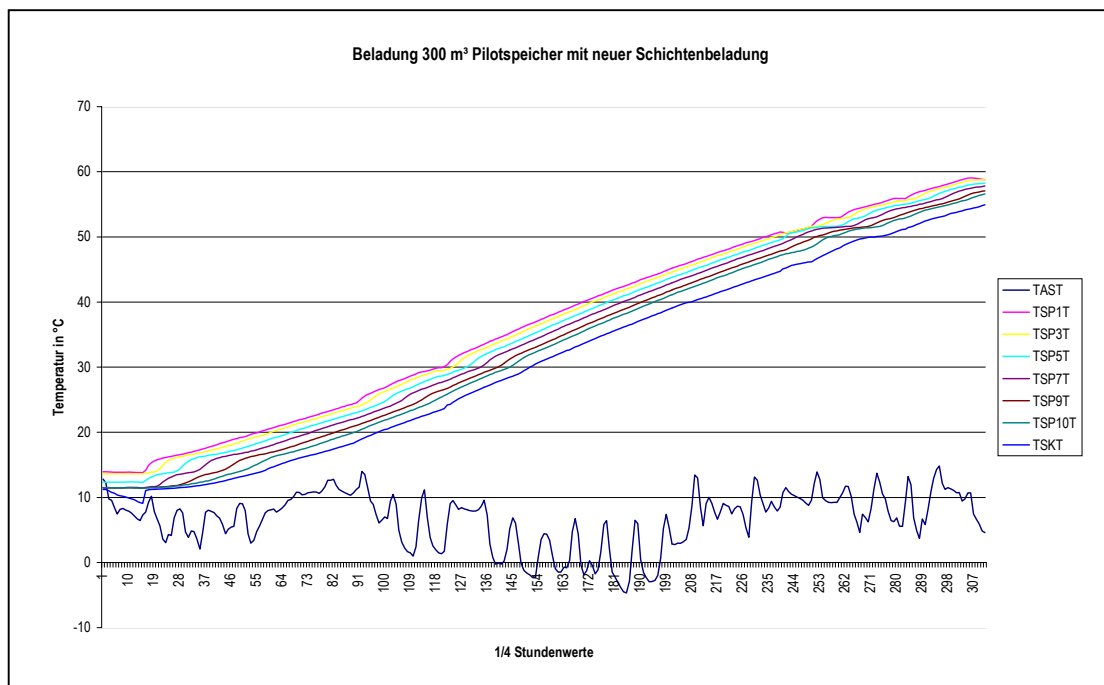


Abbildung 31: Temperaturverlauf Beladevorrichtung Variante 2

Mit Hilfe des inzwischen installierten zweiten Aufheizsystems, mittels einer Gasbrennwerttherme, konnte eine maximale Temperatur von 82 °C im Speicher erreicht werden. Die Grenztemperatur wurde hierbei nicht durch den Speicher, sondern durch den Regelalgorithmus der Gastherme bestimmt.

Die natürliche Abkühlkurve zur Bestimmung der Speicherzeitkonstante [4] wurde ausgehend von dieser Temperatur aufgenommen und mit dem durch TRNSYS – Simulation vorausberechnetem k – Wert von 0,244 W/m²K verglichen.

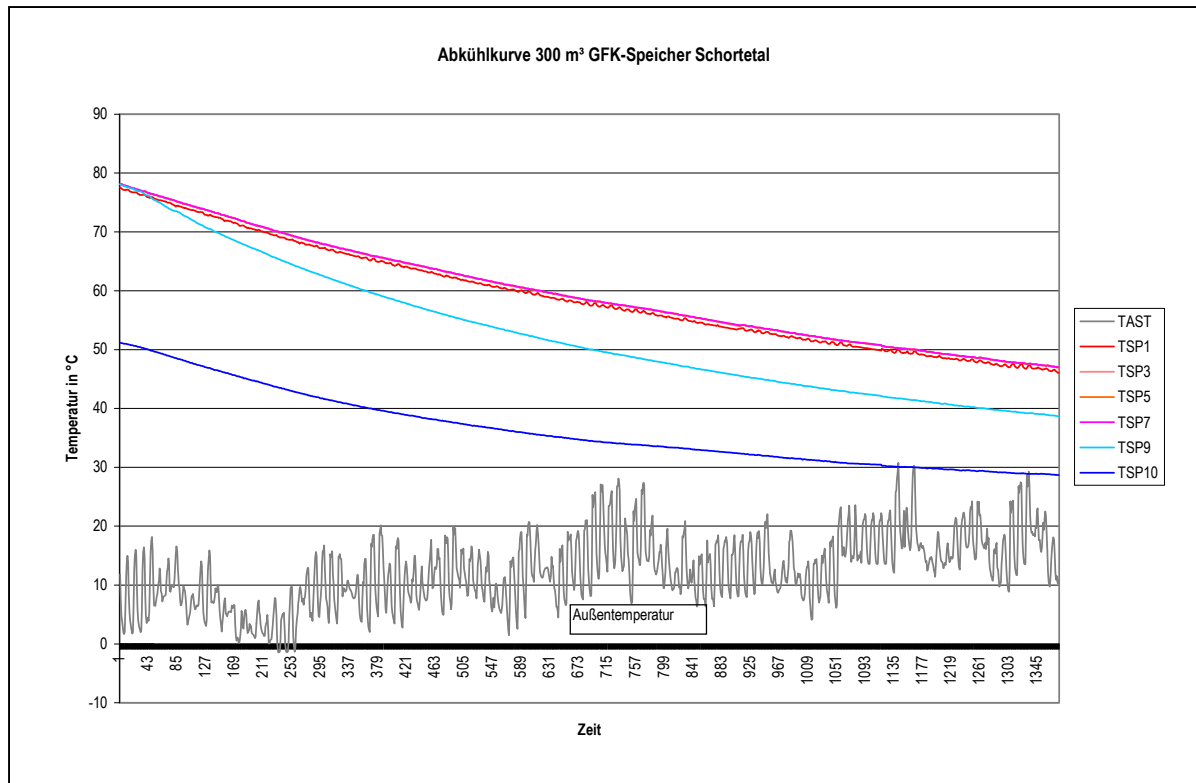


Abbildung 32: Abkühlkurve des 300 m³ Pilotspeichers zur Bestimmung der Speicherzeitkonstante

k- Wertbestimmung des 300 m³ GFK-Pilotspeichers Schortetal

Abkühlphase: Beginn 30.03.99 Ende 31.08.99

Bestimmung der Speicherzeitkonstante aus der aufgenommenen Trendkurve:

$\tau = 154$ Tage aus Trendkurve entnommen (Siehe Abbildung 32)

$T_i = 74,7$ °C (gemittelt)

$T_a = 12,5$ °C (Mittelwert)

$V_{\text{Wasser}} = 237$ m³ (Behälter war nicht vollständig gefüllt!)

$A_{\text{Mantel}} = 262$ m²

$$\tau = \frac{V_p C_p}{kA}$$

$\rho C_p = 1,16$ kWh/ m³K

$k = 0,283$ W/m²K

Die TRNSYS - Berechnungen wurden um 15 % überschritten, der höhere k - Wert wird auf die geringe Temperaturschichtung im Speicher , damit höhere Verluste durch den nicht isolierten Speicherbodens mit ca. 42 m² Grundfläche und der Ausführung der Dachkonstruktion aus 23 Einzelelementen mit sich daraus ergebenden erhöhten Wärmeverlusten (Spaltenbildung) zurückzuführen.

Zur Schwachstellenanalyse wurden am Pilotspeicher Thermografieaufnahmen durchgeführt. Die Speicherwandung mit 150 mm PUR – Hartschaumkern ($\lambda \approx 0,03$ W/m²K) stellt ein gutes Dämmsystem dar, nur die Stege der einzelnen Elemente, die aus GFK – Verbundwerkstoff mit einem Glasanteil von ca. 40 % bestehen, besitzen eine Wärmeleitfähigkeit von $\lambda = 0,174 \dots 0,185$ W/m²K [Quelle; 2] und sind in den Infrarotaufnahmen noch sichtbar (Siehe Abbildung 33). Außerdem müssen die hydraulischen Anschlüsse an die Wanddurchführungen thermisch gut gedämmt werden (Siehe Abbildung 34).

Die Fugen stellen im Bereich des Daches (größte Temperaturdifferenz zur Umgebungsluft) besondere Anforderungen an die Gestaltung und Ausführung (Siehe Abbildung 35).

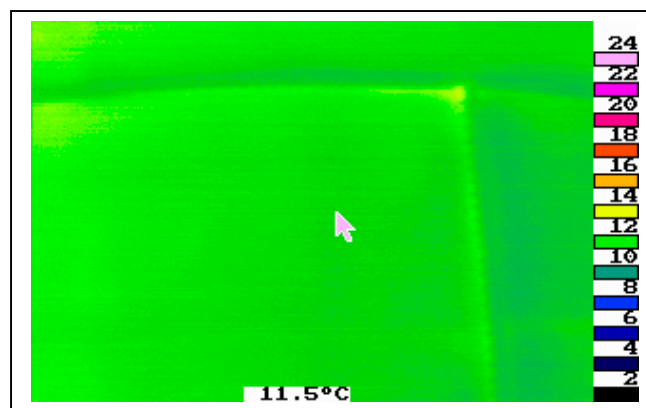


Abbildung 33: Thermografieaufnahme Speicherwand 300 m³ Pilotspeicher

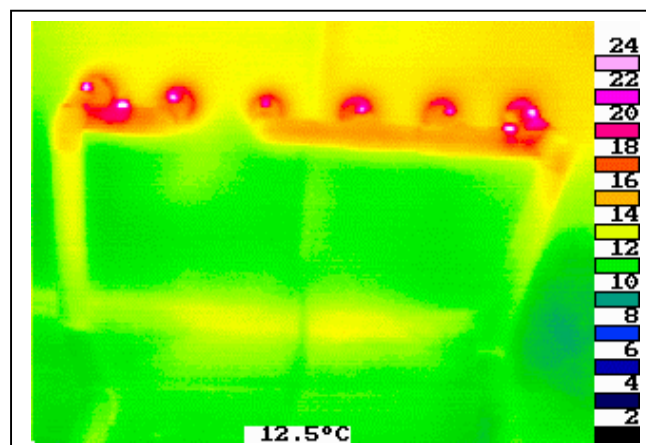


Abbildung 34: Thermografieaufnahme Anschlussfeld 300 m³ Pilotspeicher

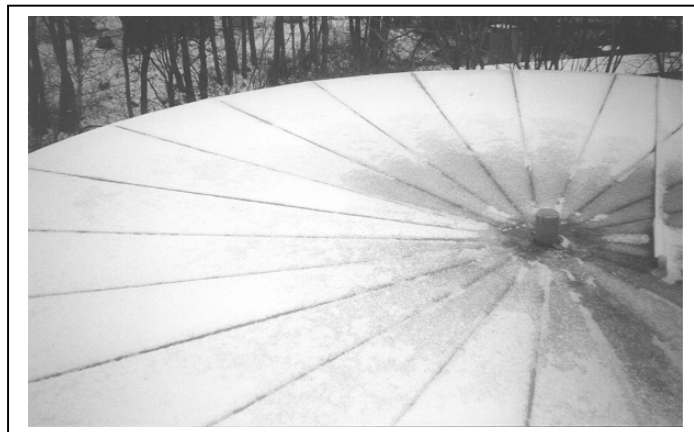


Abbildung 35: Aufnahme des Pilotspeichers im Winter, deutlich sind die Fugen im Dachbereich als Wärmebrücken erkennbar

2.4. Entwicklung Speicher NT („Neuer Technologie“)

Die Erfahrungen beim Aufbau und der Durchführung des Messprogramms am 300 m³ GFK-Pilotspeicher flossen in die Konstruktion eines 20 m² Musterspeichers „Neuer Technologie“ ein. Hier wurde das ursprüngliche Konstruktionsprinzip der ersten Konzeptideen verwirklicht, nachdem anfangs aus Gründen der fehlenden Fertigungserfahrung und Sicherheitsbedenken eine Konstruktion mit erhöhter Sicherheit gewählt wurde.

Ziel der GFK – Speicherentwicklung ist die Schaffung eines Wärmelangzeitspeichers mit verbesserten technischen Eigenschaften und niedrigeren Kosten gegenüber den unter 1.1...1.4. genannten Speicherkonzepten.

Die Entwicklung wurde bis zum Bau eines 300 m³ Pilotspeichers als Verbundprojekt durch den Freistaat Thüringen vom Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kultur (TMWFK) mit 770 TDM (394 T€) gefördert.

2.4.1 Wärmelangzeitspeicher „Neuer Technologie“ – 20 m³ Musterspeicher

Die Erfahrungen mit dem Pilotspeicher führten zur Weiterentwicklung des GFK-Heißwasserspeicherkonzeptes. Im Zeitraum 2000/2001 wurde auf dem Betriebsgelände der Fa. VKA in Schönbrunn eine Versuchsanlage bestehend aus einer 30 m² Solaranlage, einem 20 m³ GFK-Heißwasserspeicher nach „Neuer Technologie“, die dazugehörige Be- und Entladetechnik und umfangreiche Messtechnik errichtet und in das bestehende Wärmeversorgungssystem der Firma eingebunden.

Hier wurde das ursprüngliche Konstruktionsprinzip der ersten Konzeptideen (Siehe Abbildung 7) verwirklicht, nachdem anfangs aus Gründen der fehlenden Fertigungserfahrung und Sicherheitsbedenken eine Konstruktion mit mehrfacher Sicherheit gewählt wurde, d. h. Zylindersegmente mit Schraubverbindungen. Die gewählte Konstruktion ist an die traditionelle Fassbauweise mit Umreifung angelehnt. Die einzelnen geometrisch einfach gestalteten Segmente (Siehe Abbildung 35) werden un-

ter Nutzung von Montagehilfen senkrecht montiert, die Berührungsflächen dabei verklebt, anschließend die noch vorhandenen Fugen innen und außen handlamiert. Die mechanische Belastbarkeit wird durch Glasfaserseile, die mit Hilfe neu entwickelter Spannvorrichtungen im definierten horizontalen Abstand um den zylindrischen Speicherkörper vorgespannt werden.



Abbildung 36: Einzelsegment des Speichers „Neuer Technologie“

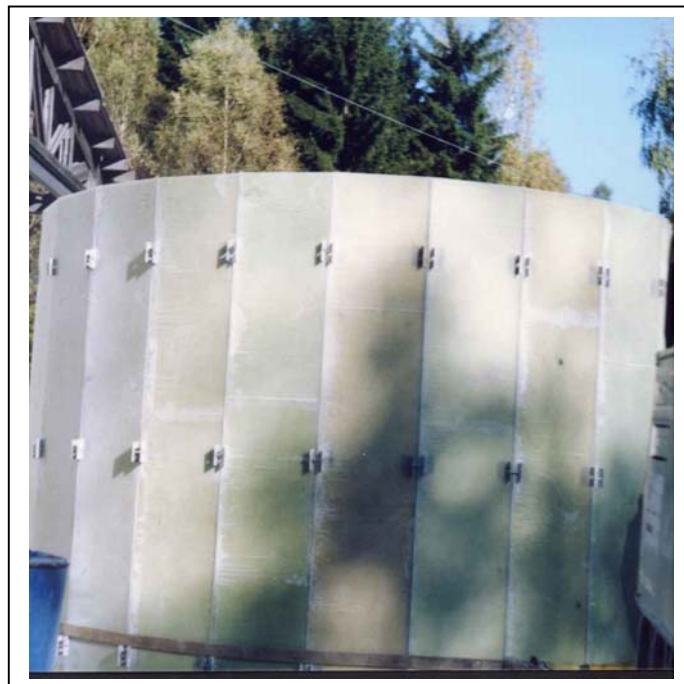


Abbildung 37: Segmente mit Montagehilfen zusammengefügt



Abbildung 38: Fertig gestellter 20 m³ GFK – Musterspeicher NT in Schönbrunn



Abbildung 39: Musterspeicher und 30 m² Kollektorfeld

Für den Versuchsbetrieb des 20 m³ Musterspeichers zusammen mit der 30 m² Solaranlage und dem vorhandenen Heizsystem der Fa. VKA Schönbrunn musste ein umfangreiches Hydraulik-, Mess- und Regelsystem (Siehe Abbildung 40) aufgebaut werden. Mit der Einbindung der Heizungsanlage war es möglich den Speicher auch in der einstrahlungsarmen Jahreszeit definiert aufzuheizen. Bei solarthermischem Angebot wurde die Solaranlage genutzt. Die Entladung erfolgte anfangs über die Heizungsanlage durch Anbindung im Rücklauf, die hier vorhandene Rücklauftemperatur begrenzte die Entladetemperatur, deshalb wurde wie bei den Anlagen des ST2000 Programms eine Brauchwasservorwärmung genutzt

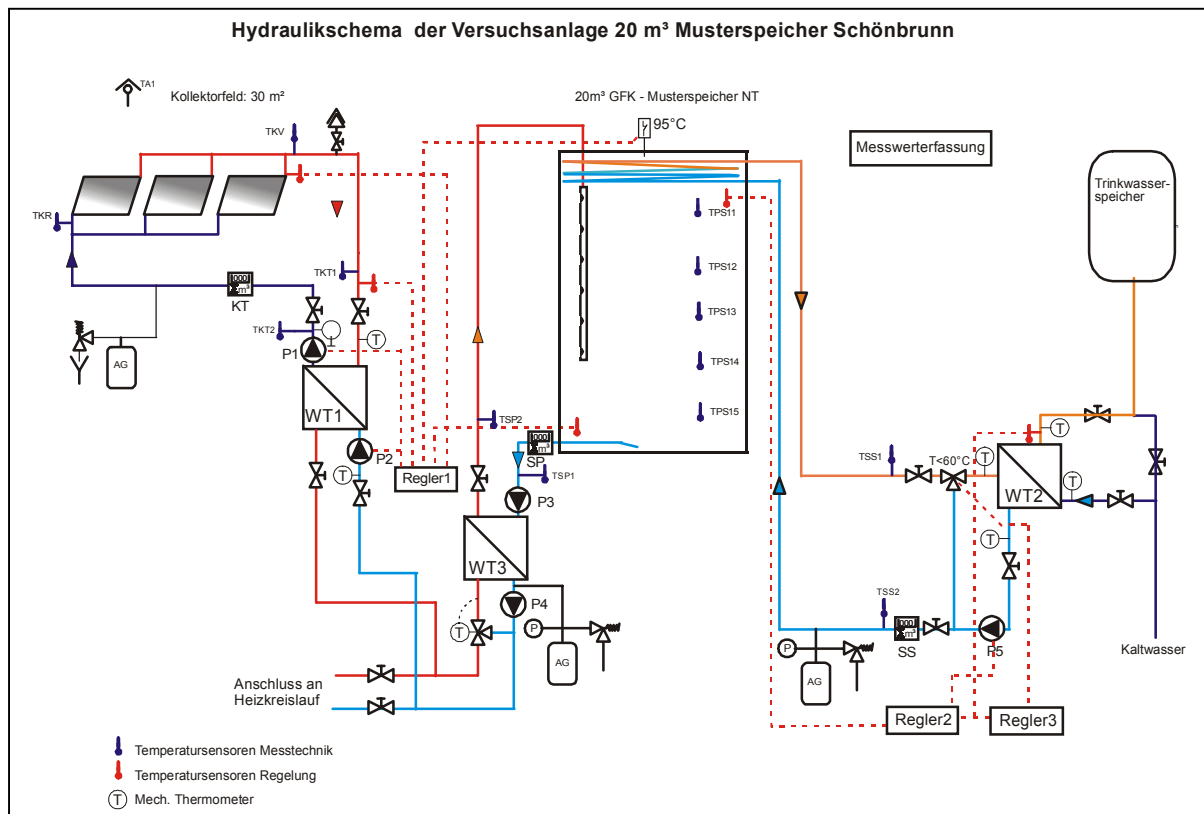


Abbildung 40: Schema der Versuchsanlage am 20 m³ Musterspeicher

Auch am 20 m³ Musterspeicher NT wurden verschiedene Be- und Entladezyklen durchgeführt und zur Bestimmung der Speicherzeitkonstante die Langzeitabkühlkurve aufgenommen. Der dabei ermittelte Wärmedurchgangskoeffizient lag bei $U = 0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$, dieser hohe Wert war nicht erwartet worden. Eine Ursache ist ein schlechteres Oberflächen / Volumenverhältnis (Siehe Abbildung 41) als beim 300 m³ Pilotspeicher und vor allem noch größeren Speichern.

Zusätzlich hat die am Musterspeicher verwirklichte Technologie (Siehe Abbildung 42) von 26 senkrecht stehenden Einzelsegmenten im Verhältnis zu größeren Speichern mit gleicher Segmentanzahl einen erhöhten Anteil von Wärmebrücken. Deshalb sollte der Speicher „Neuer Technologie“ nur bei Speichern größer 70 m³ eingesetzt werden, bis zu dieser Größe ist die kostengünstigere Wickeltechnologie anwendbar, eingeschränkt durch den maximalen Durchmesser $\varnothing = 3,2 \text{ m}$ bei normalem Straßen-transport.

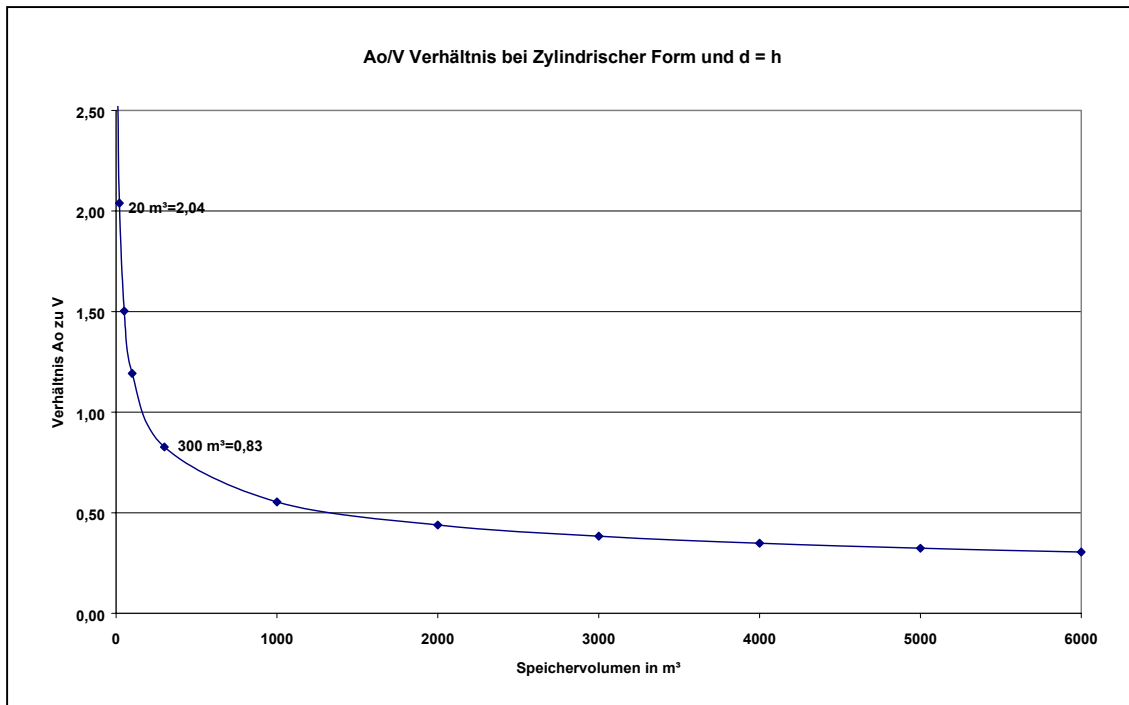


Abbildung 41: Oberflächen / Volumenverhältnis für Zylinderform

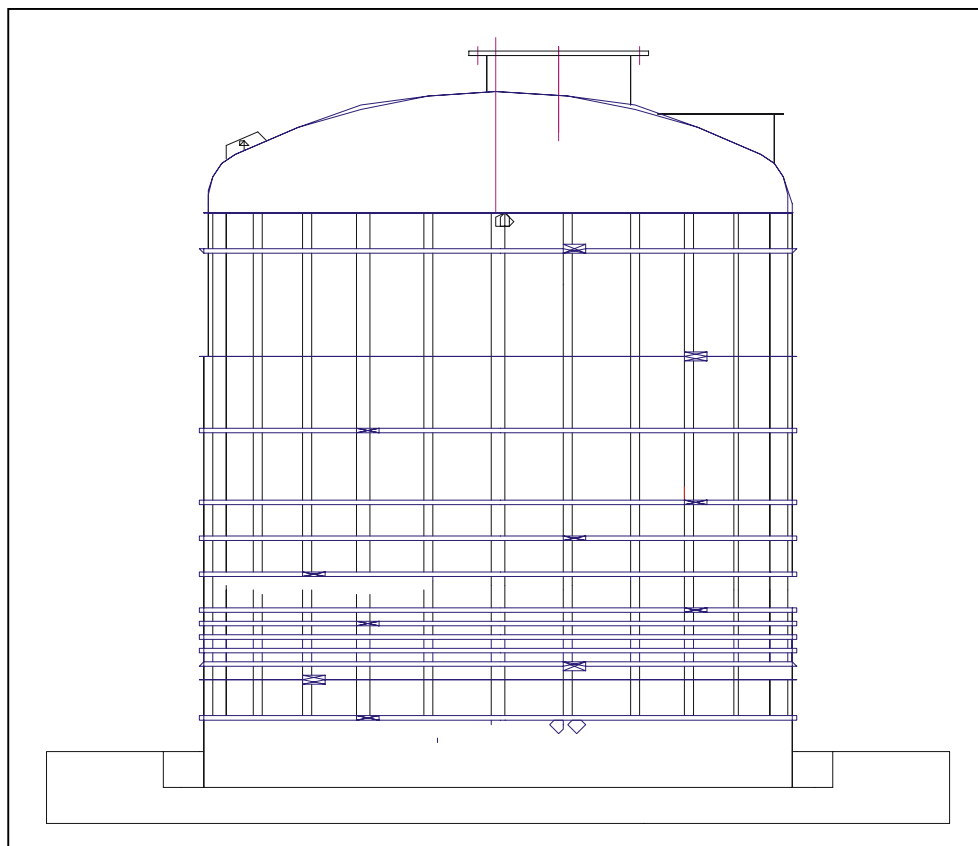


Abbildung 42: 20 m³ GFK-Musterspeicher (NT) Seitenansicht

Zur weiteren Schwachstellenanalyse wurden Thermografieaufnahmen angefertigt (Siehe Abbildungen 43-45).

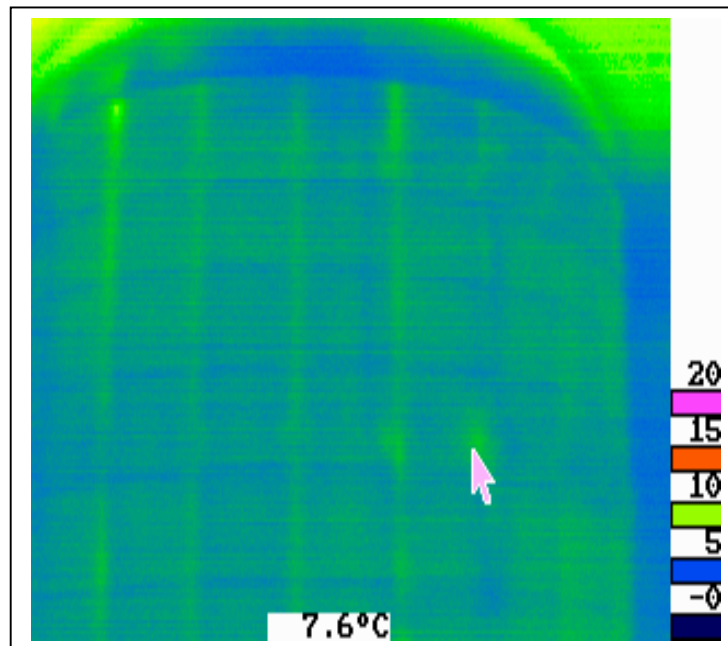


Abbildung 43: Qualitätsgerechte Ausführung der Montage am 20 m³ Speicher

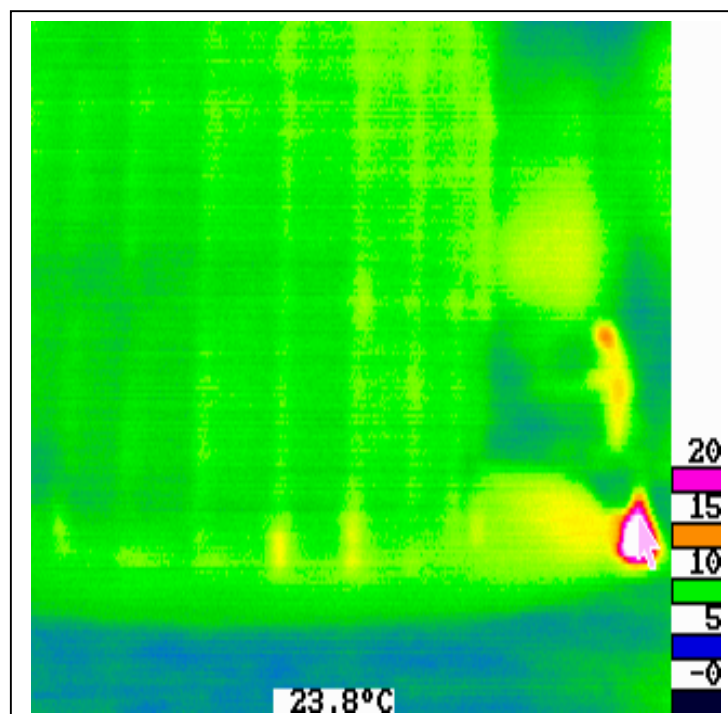


Abbildung 44: Ebenfalls qualitätsgerechte Ausführung der Speicherwandung (Südseite), sichtbar die noch nicht gedämmte Ablassarmatur

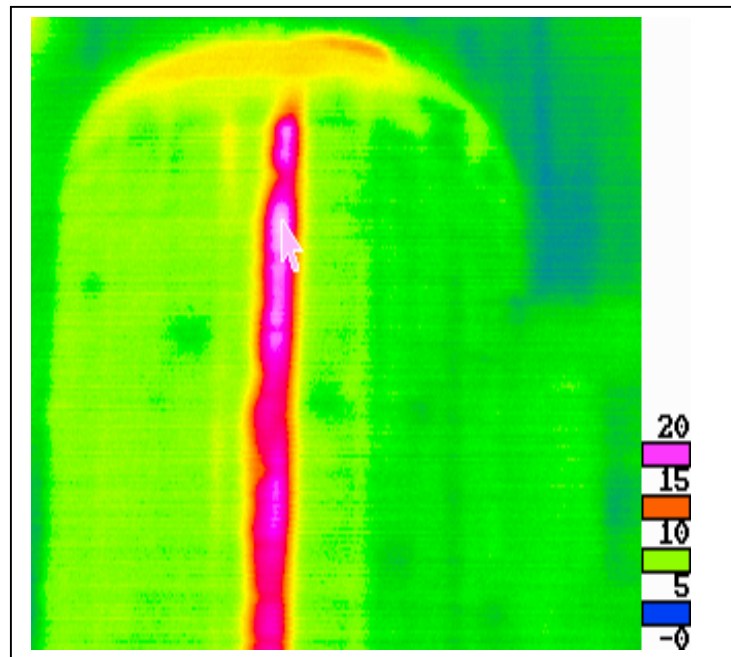


Abbildung 45: Nordseite des Musterspeichers mit „Wärmeleck“

In Abbildung 45 ist ein deutlicher Montagefehler bei der Verbindung zweier Module zu sehen, entstanden bei der Verklebung der Kontaktflächen. Konstruktionsbedingt führt das nicht zum Versagen der Hülle, aber der Wärmedurchgangswiderstand verringert sich.

Aus diesem Grund ist für eine Serienfertigung von Modulen ein hoher Vorfertigungsgrad unter definierten Fertigungsbedingungen anzustreben.



Abbildung 46: Einzelementausschäumung, Montagehilfen

In Abbildung 46 ist das Problem einer homogenen Dichte des Dämmmaterials deutlich zu sehen. Eine geringe Dichte des PUR – Hartschaums bedeutet einen geringen Wärmeleitwiderstand. Mit industriell gefertigten Dämmblöcken kann eine höhere Qualität mit einer Wärmeleitfähigkeit von $\lambda=0,03$ W/mK erreicht werden, beim Schaum – Gießen (Siehe Abbildung 46) wird ein $\lambda=0,05$ W/mK erreicht. Das Schaum – Gießen stellt eine kostengünstigere Variante dar, auch statisch gibt es durch die Verbindung Schaum zu GFK - Wandung Vorteile. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden beim Verbundpartner verschiedene mechanisch feste Alternativdämmstoffe einem Einsatztest unterzogen. Neben Schaumglas wurde auch Blähglasgranulat in Form von gebundenen Blöcken untersucht und musste leider wieder verworfen werden, da keine dauerhafte Verbindung zum GFK – Material hergestellt werden konnte. Die Technologie GFK – Heißwasserspeicher NT wurde vor allem in Richtung Kostendegression weiterentwickelt. Die Kostenentwicklung ist in Abbildung 47 dargestellt, die Ergebnisse liegen in der vom Projektträger Jülich vorgegebenen Lernkurve. Deutlich ist die Kostenreduzierung zwischen dem 300 m³ Pilotspeicher und einem 300 m³ GFK – Speicher NT von ca. 50 % hervorzuheben.

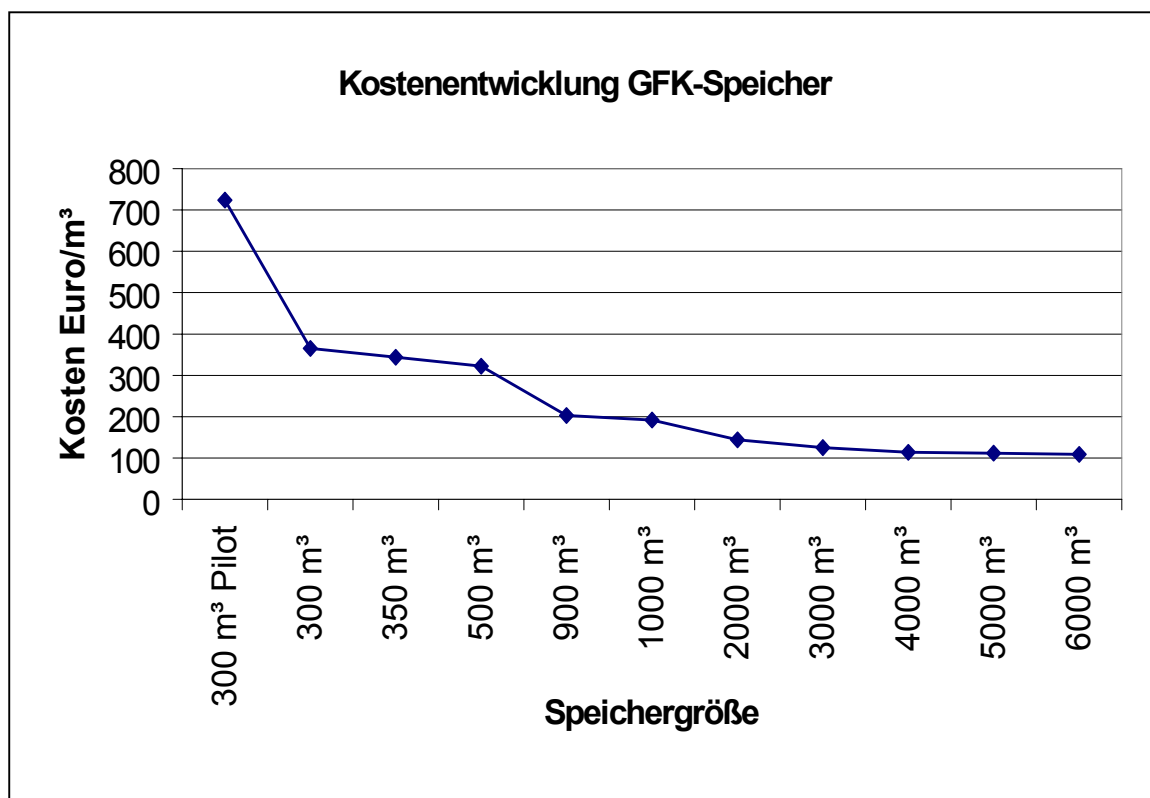


Abbildung 47: Kostenentwicklung bei GFK – Wärmelangzeitspeichern auf Basis von konkreten Angeboten, bzw. dem realisierten 300 m³ Pilotspeicher nach alter Technologie

2.4.2 GFK – Pufferspeicher in Wickeltechnologie bis 3,2 m Außendurchmesser

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde auch die Entwicklung und der Einsatz von kleinen GFK – Wärmespeichern bis zu einem maximalen Außendurchmesser von 3,2 m (Begrenzt durch die Transportmaße bei Straßentransport) vorangetrieben. Im Ergebnis gibt es einige Anwendungen für Pufferspeicher in solarthermischen Brauchwasseranlagen.

Das GFK – Material ist für schwierige Einsatzbedingungen, wie ganz oder teilweise im Erdreich vergraben, freistehend im Gelände (vandalensicher) besonders geeignet. Folgende Einsatzfälle sind:

- Münchenbernsdorf 5 m³ Pufferspeicher vollständig im Erdreich
- Oberweissbach 5 m³ Pufferspeicher zu 80 % im Erdreich
- Weißenfels 5 m³ Pufferspeicher freistehend im Wohngebiet (Abbildung 48)



Abbildung 48: 5 m³ Pufferspeicher in einer solarthermischen Anlage aus Solarthermie-2000, TP 2 (Förderkennzeichen 0329603) in Weißenfels

Bei den Speichern handelt es sich um drucklose (max. mit 0,5 bar belastbare) doppelwandige Pufferspeicher, hergestellt in Wickeltechnologie.

Für den in Weißenfels eingesetzten Pufferspeicher wurde eine angepasste Schichtenladevorrichtung aus GFK – Rohren entwickelt und eingebaut. Als Dämmmaterial wurde Blähglasgranulat, bekannt aus anderen Großspeicheranwendungen (Solarthermie-2000 TP3: Heißwasserwärmespeicher in Hannover, Stadtteil Kronsberg), eingesetzt. Bei der Wickeltechnologie für Speicher kleinen Durchmessers und Volu

men spielt aus statischen Gründen die feste Verbindung des Dämmmaterials mit der Speicherwandung keine Rolle. Der Speicher ist UV – beständig, korrosionsfest und wichtig bei Außenaufstellung, vollkommen vandalensicher.
Alle Rohrleitungen und Messkabel sind in der Dämmung integriert, es wird hier ein großer Vorfertigungsgrad erreicht (Siehe Abbildungen 49 und 50), der Behälter wird anschlussfertig angeliefert.

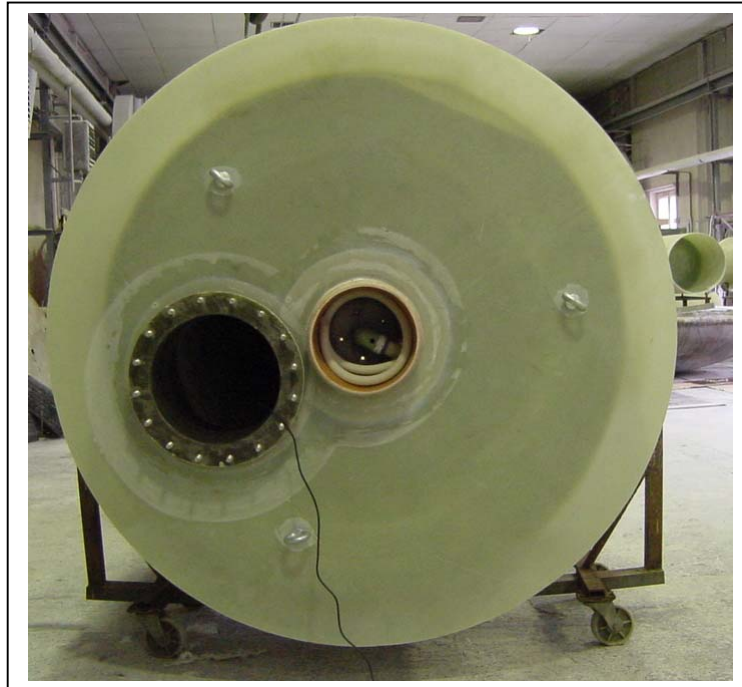


Abbildung 49: Dachgestaltung des 5 m³ GFK - Pufferspeichers



Abbildung 50: Bodengestaltung des 5 m³ GFK – Pufferspeichers

Der Einsatz der Wickeltechnologie erlaubt eine leichte Anpassung der Dämmstärke an die jeweils geforderten Einsatzbedingungen, vom Tagespufferspeicher bis zum Langzeitspeicher.

2.4.3 Ergebnisse der Entwicklung GFK – Wärmelangzeitspeicher

Folgende Entwicklungsziele wurden im Rahmen des Forschungsprojektes erreicht:

- Entwicklung eines Saisonalspeichers mit modularem Aufbau
- Es steht eine einsatzfähige Baureihe von 300 m³ bis 6000 m³ Speichervolumen zur Verfügung (Siehe Anhang)
- Wandaufbau aus einer Außenschicht GFK (ca. 6 mm), Kern aus PUR – Hartschaum mit Abmessungen von 100..150 mm entsprechend Anwendung, Innenschicht aus GFK (6.. 10 mm)
- Dachkonstruktion entsprechend Kundenanforderungen
- Boden wahlweise isoliert oder unisoliert zur Nutzung des Wärmespeichervermögens des darunter liegenden Erdreiches
- Nach innen führende Anschlussleitungen aus Kunststoff, zur Vermeidung von Wärmebrücken
- Aufstellung wahlweise komplett oberirdisch, in Gebäude integriert oder ganz/ teilweise eingegraben
- Verschiedene Be- und Entlademöglichkeiten (Schichtenladevorrichtungen)
- Kostendegression entsprechend Lernkurve
- 6 Jahre Langzeiterprobung des GFK Materials (Keine Korrosion, UV-Beständigkeit), eine Lebensdauer von mehr als 30 Jahren ist, nachgewiesen durch andere GFK - Anwendungen, zu erwarten

3. Entwicklung und Erprobung von Schichtenladevorrichtungen für große Heißwasserspeicher

Im Rahmen des Forschungsprojektes bestand ein Schwerpunkt in der Entwicklung von Be- und Entladeeinrichtungen für große saisonale Heißwasserspeicher. Hier wurde die Entwicklung und Erprobung am 300 m³ Pilotspeicher und am 20 m³ Musterspeicher durchgeführt. Nach der grundsätzlichen Erprobung von verschiedenen Be- und Entlademöglichkeiten am 300 m³ Pilotspeicher wurden ab Juli 2001 am 20 m³ Musterspeicher mehrere Varianten, auch in Zusammenarbeit mit Kooperationspartnern (Fa. Ratiotherm), eingebaut und erprobt.

Vorausgegangen war eine umfangreiche Patent- und Literaturrecherche im Rahmen einer Studienarbeit /9/.

Die einzelnen untersuchten Varianten werden nachfolgend beschrieben.

3.1 Zylinderbeladevorrichtung der Fa. VKA

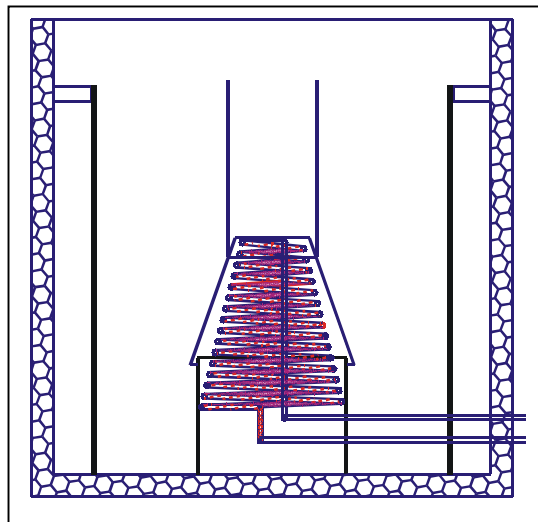


Abbildung 51: Zylinderbeladevorrichtung im 20 m³ Musterspeicher

Die hier gezeigte Beladevorrichtung wurde vom Kooperationspartner, der Firma VKA Schönbrunn GmbH dimensioniert und aufgebaut. Sie besteht aus einer Kupferrohrspirale umgeben von einem Zylinder/Trichter/Zylinder aus GFK – Material. Die beabsichtigte Funktionsweise konnte durch Messungen leider nicht bestätigt werden, auch nachfolgende Detailveränderungen führten zu keinem Erfolg. Die Messergebnisse sind in Abbildung 53 dargestellt.

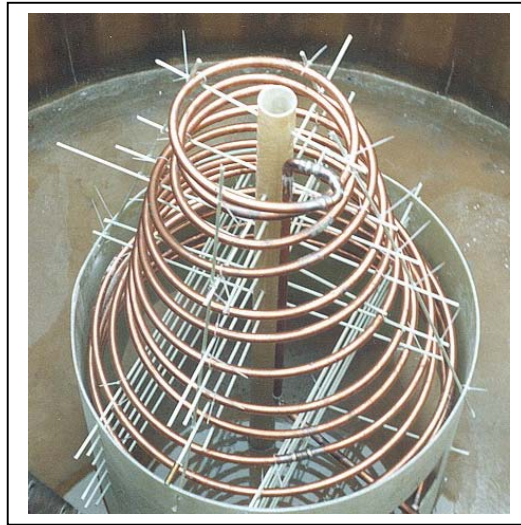


Abbildung 52: Zustand während der Montagephase

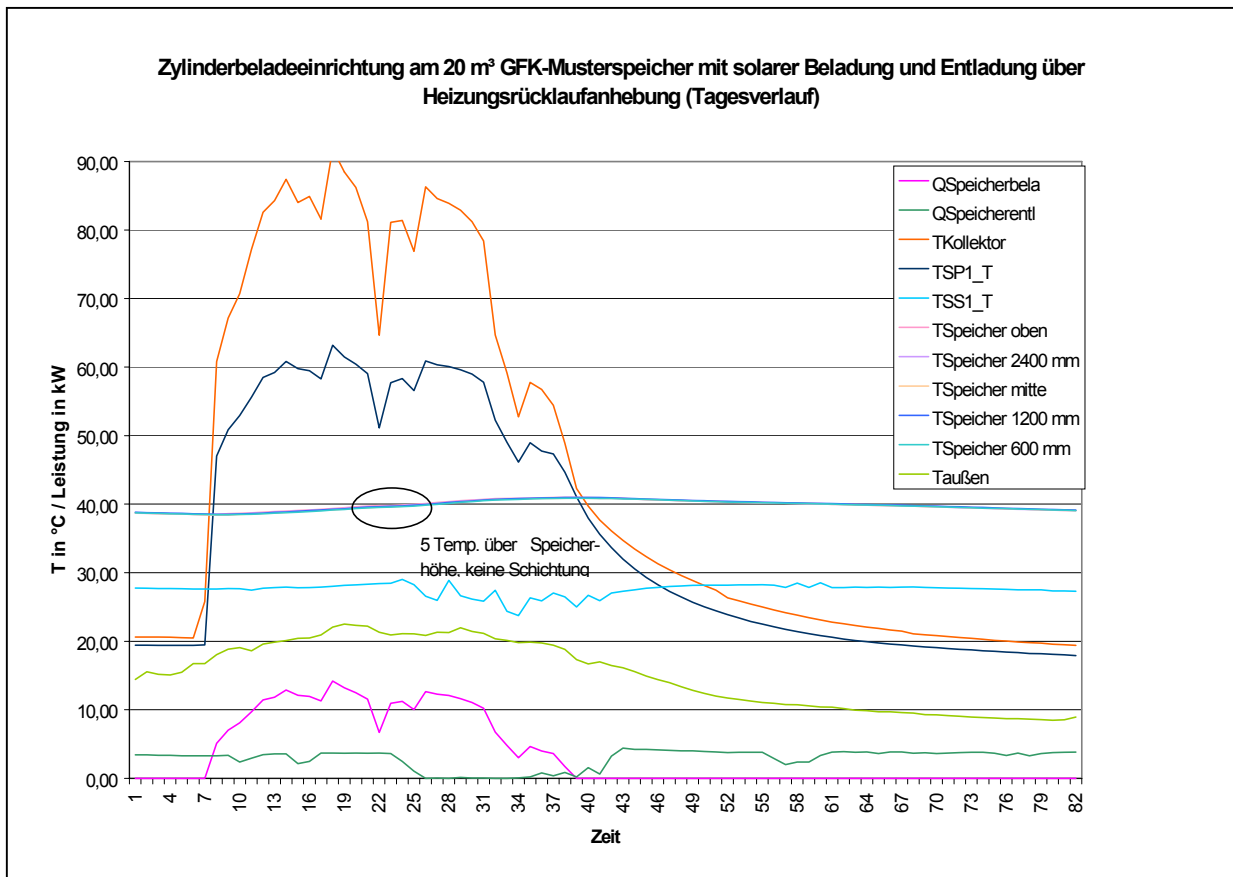


Abbildung 53: Tagesverlauf der solaren Beladung über Zylinderbeladevorrichtung

In Abbildung 53 ist ein Tagesverlauf mit solaren Beladung am 20 m³ GFK – Musterspeicher als Messdiagramm dargestellt. Es ist (siehe markiertes Feld) keine Schichtung über der Speicherhöhe (5 Temperaturen im vertikalen Abstand von je 600 mm) feststellbar. Die Zylinderbeladevorrichtung ist auch nach Detailänderungen nicht als Schichtenlader geeignet.

3.2 Schichtenladevorrichtung der Fa. Ratiotherm GmbH & Co. KG, Dollnstein

Mit aktiver Unterstützung der Fa. Ratiotherm GmbH & Co. KG, für die wir uns an dieser Stelle besonders bedanken möchten, war es uns möglich eine weitere Schichtenladevorrichtung am 20 m³ Speicher einzubauen und zu vermessen.

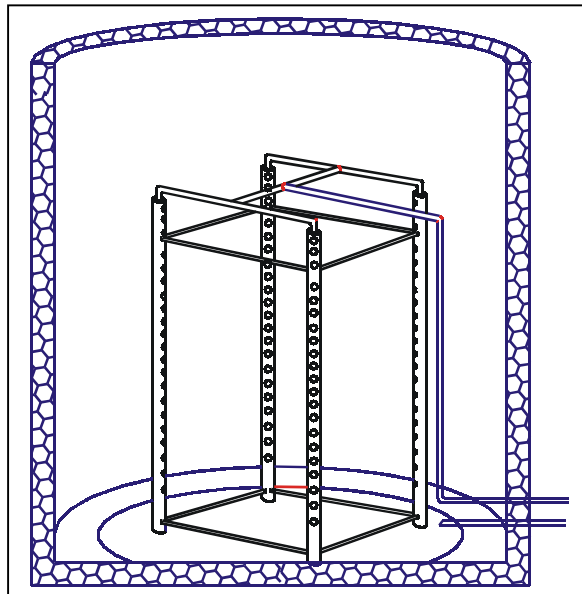


Abbildung 54: Schichtenlader "Ratiotherm" im 20 m³ Musterspeicher

Durch die Fa. Ratiotherm wurde die in Abbildung 54 dargestellte Schichtenladevorrichtung bereitgestellt und im 20 m³ GFK – Musterspeicher eingebaut. In Abbildung 55 ist der Montagezustand vor dem Einbau zu sehen. Die erreichten Ergebnisse mit einer Schichtung von $\Delta T = 25$ K bei einer Vorlauftemperatur von 60°C (Siehe Abbildung 56) waren überzeugend.

Konstruktiv ist die Schichtenladevorrichtung noch sehr aufwendig, deshalb wurde dem Ziel des Forschungsthemas entsprechend nach einer preiswerteren Vorrichtung mit mindestens gleichen Ergebnissen gesucht.



Abbildung 55: Schichtenladevorrichtung „Ratiotherm“ vor dem Einbau

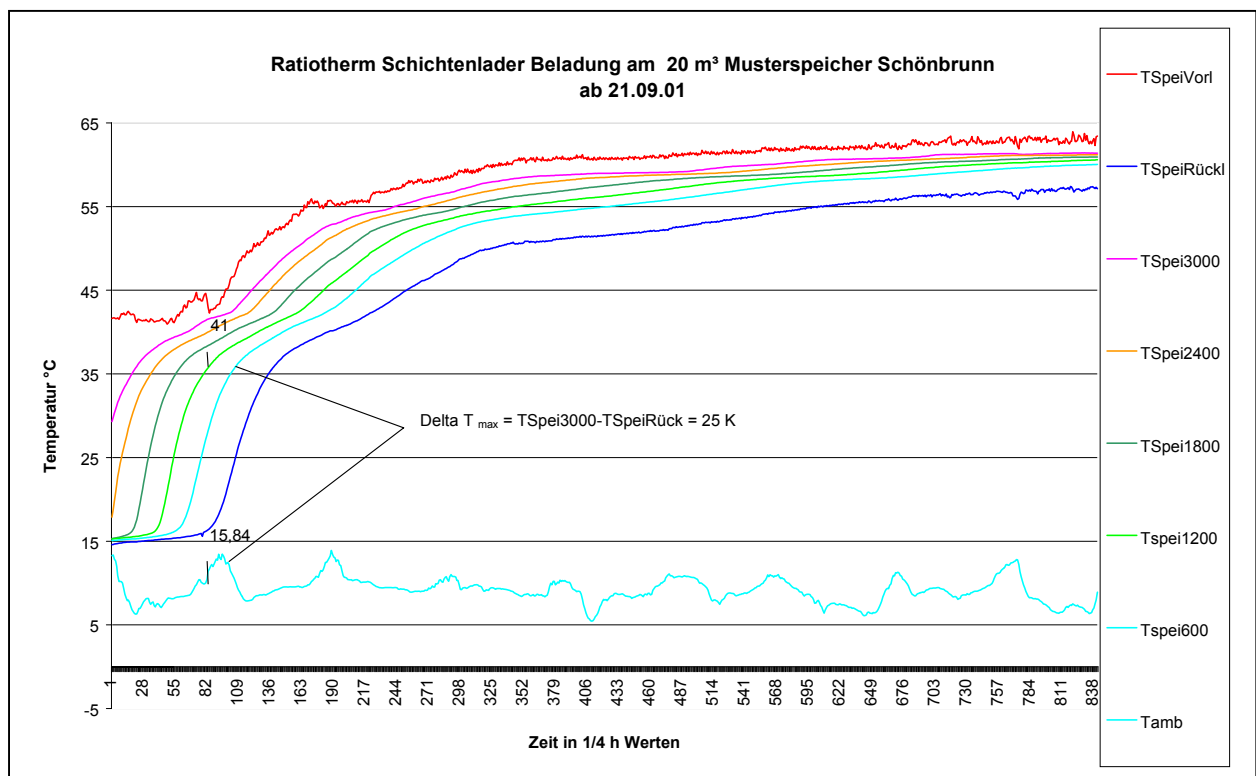


Abbildung 56: Messergebnisse beim Einsatz des „Ratiotherm“ Schichtenladers

3.3 Schichtenlader Typ "Consens"

Schon bei der Erprobung des 300 m³ GFK – Pilotspeichers (siehe Punkt 2.3 im Bericht) gab es erste Entwicklungsideen zu Schichtenladevorrichtungen durch Mitarbeiter der TU Ilmenau. Die hier gewonnenen Erfahrungen flossen in die möglichst kostengünstige Gestaltung des Schichtenladers Typ "Consens" ein, gefertigt aus handelsüblichen HT – Rohrsegmenten. Entscheidend für die Querschnittsberechnungen ist die Reduzierung der Strömungsgeschwindigkeit auf ≤ 50 mm/s. Bei den Abgängen (1..3 möglich) auf gleicher Ebene sollte in Summe der Querschnitt des Steigrohres erreicht werden. Auf diese Weise können Turbulenzen vermieden werden. Das Wirkprinzip beruht auf Druckunterschieden durch unterschiedliche temperaturabhängige Wasserdichten.

In Abbildung 57 ist die Einbausituation im Speicher und in Abbildung 58 die Ausführung dargestellt. Für den Dauereinsatz muss eine feste Kleb- oder Schweißverbindung eingesetzt werden, weil die allgemein verwendeten Gummidichtungen ver härten und versagen.

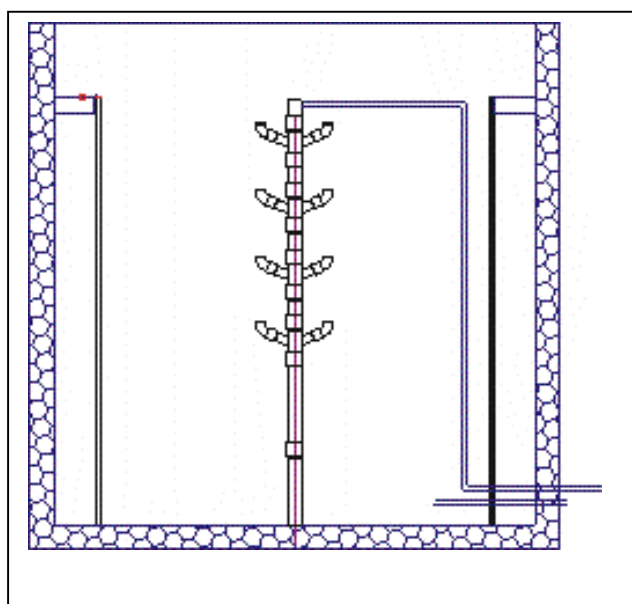


Abbildung 57: Schichtenlader Typ „Consens“ im 20 m³ Musterspeicher



Abbildung 58: Konstruktive Ausführung des Schichtenladers Typ "Consens"

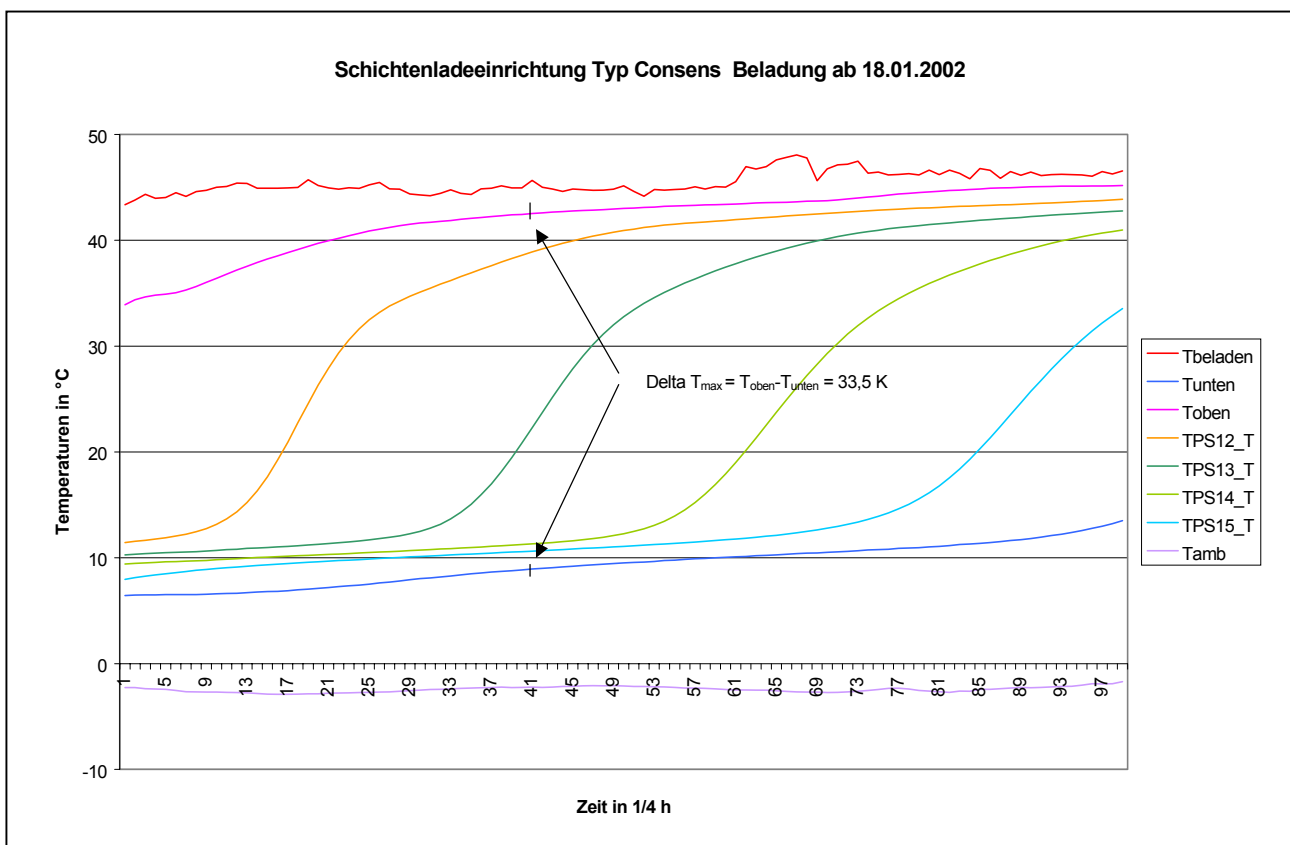


Abbildung 59: Messergebnisse der Beladung mit der Schichtenladevorrichtung Typ "Consens"

Die Schichtung mit dem größten ΔT bei den verglichenen Schichtenladevorrichtungen lieferte der Schichtenlader Typ "Consens", es konnte eine Schichtung von $\Delta T = 33,5$ K über eine Speicherhöhe von ca. 3 m erreicht werden. Die dabei gewonnenen Ergebnisse wurden zunächst auf Pufferspeicher angewendet und im Einsatzfall Weißenfels praktisch nachgewiesen. Hier (Siehe Abbildung 60) kommt eine Variante mit 3 Abgängen pro Ebene zum Einsatz.

Die Beschickung der Schichtenladevorrichtung erfolgt auch hier von oben. Aus unserer Sicht ist eine Speicherbeladung von oben günstiger, als aus Richtung Speicherboden, da hier kein unnötiger Wärmeaustausch mit kalten Wasserschichten erfolgt.

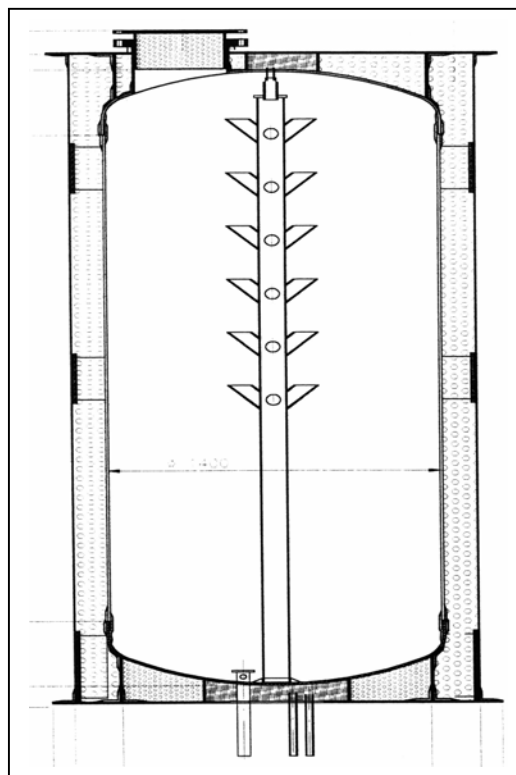


Abbildung 60: Einsatz einer Schichtenladevorrichtung in einem 5 m³ Pufferspeicher einer 100 m³ Solaranlage in Weißenfels

Die im laufenden Betrieb der Solaranlage in Weißenfels gewonnenen Messergebnisse (Siehe Abbildung 61) bestätigen, dass die vorgesehene Funktionsweise erreicht mit der Konstruktion erreicht werden konnte.

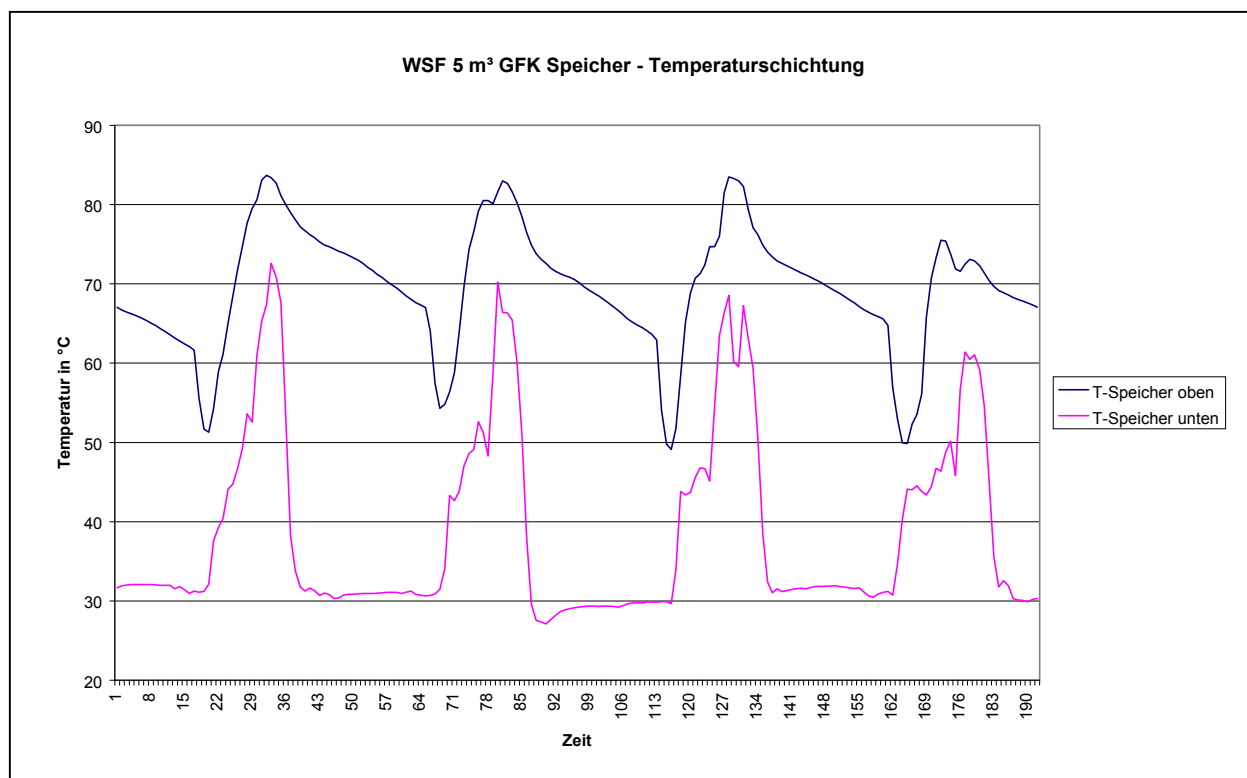


Abbildung 62: Temperaturverlauf im 5 m³ GFK – Pufferspeicher

3.4 “Solvis“ - Schichtenlader

Ein weiteres auf dem Markt befindliches System ist der “Solvis“ - Schichtenlader. Dieser besitzt einen einfachen aber äußerst funktionsfähigen Aufbau. In Abbildung 63 ist ein Segment abgebildet, deutlich zu sehen ist die Silikongummimembran, die eine Rückströmung sicher verhindert.

Diese Schichtenladevorrichtung ist über einen variierenden Volumenstrombereich sicher einsetzbar, im Gegensatz zu den anderen getesteten Systemen.

Innerhalb des ST 2000 , TP2 Programms sind in den Solaranlagen Jena und Hettstedt in 2 x 6 m³ bzw. 2x 5,5 m³ Pufferspeichern diese Systeme mit Erfolg im Einsatz. Es sind hier pro Speicher 2 Ladelanzen für ein Ladevolumen von ca. 1,5 m³/h eingesetzt.

Bei Großspeichern ist auch für das Solvis – System durch die Vielzahl der notwendigen Ladelanzen (pro m³/h Volumenstrom ist 1 Lanze notwendig) eine Einsatzgrenze erreicht.

Außerdem ist das System patentrechtlich geschützt und eine Zulieferung an weitere solare Komponenten gebunden. Aus diesen Gründen wurde das System nicht untersucht.



Abbildung 63: Einzelsegment einer "Solvis" - Schichtenladevorrichtung

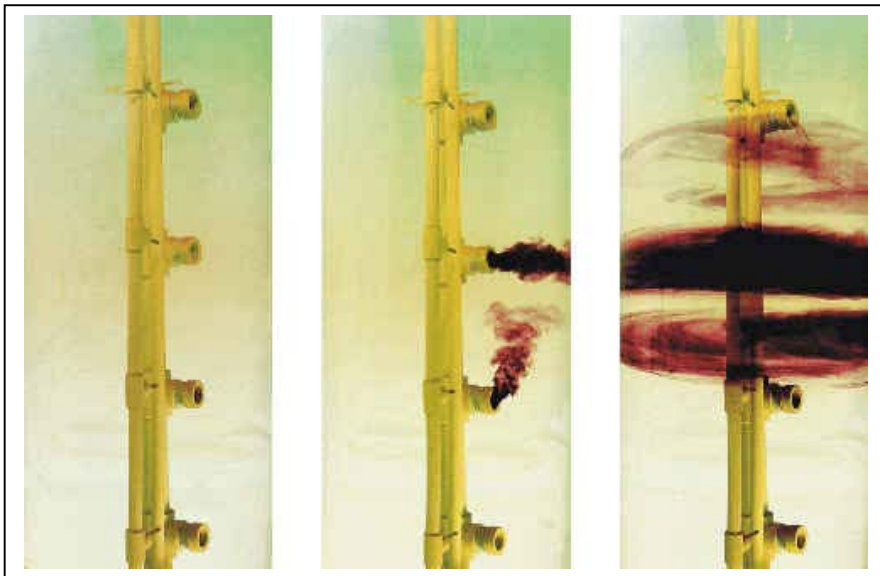


Abbildung 64: Funktionsweise der "Solvis"-Schichtenladevorrichtung visualisiert [10].

3.5 Entwicklung einer Beladeplatte für große Heißwasserspeicher

Die oben genannten Grenzen für die Schichtenladesysteme führten unter Nutzung der technologischen Möglichkeiten beim Verbundpartner zu der Entwicklung einer Beladeplatte. Verwendet wird GFK - Abstandsmaterial, das kostengünstig zur Verfügung steht und einen einfachen Ersatz der bisher in Großspeichern verwendeten Edelstahlbeladetassen darstellt. Am 20 m³ Musterspeicher wurde ein System eingebaut und erprobt. Die notwendige Strömungsverminderung kann sehr leicht über Durchmesseranpassung erreicht werden, so ist sichergestellt, dass nur laminare Strömung auftritt. In Abbildung 65 ist die Einbausituation dargestellt und in Abbildung 66 die Platte selbst.

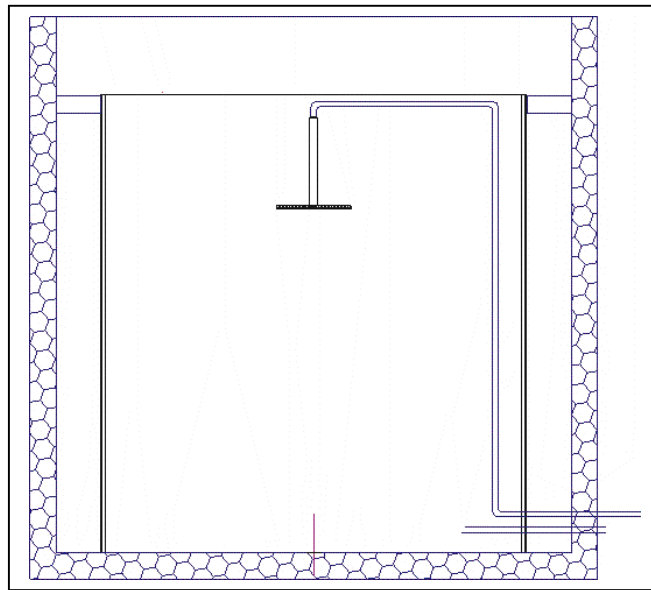


Abbildung 65: Anordnung der Beladeplatte im 20 m³ Musterspeicher



Abbildung 66: Beladeplatte aus GFK - Abstandsmaterial

Mit dieser Platte (Siehe Abbildung 67: Mit 12 K Temperaturdifferenz über eine Speicherhöhe von 3000 mm) können nicht die gleichen Ergebnisse im Vergleich zu den oben gezeigten Systemen erwartet werden, Ziel ist ein einsatzfähiges System für Speicher >100 m³ Speichervolumen mit deutlich geringen Kosten.

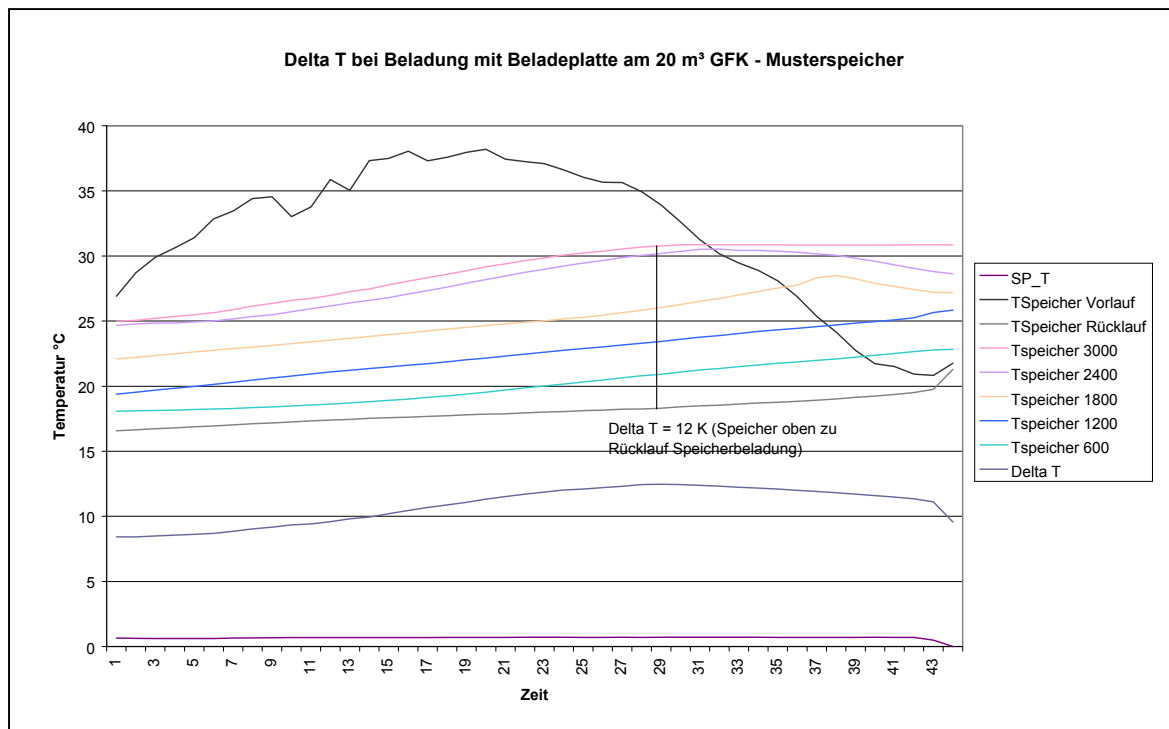


Abbildung 67: Temperaturverlauf bei Beladung mit Beladetasse

3.6 Ausblick zu Schichtenladevorrichtungen für große Heißwasserspeicher

Für den Einsatz von Schichtenladevorrichtungen in großen saisonalen Heißwasserspeichern kommen zur Zeit nur Beladetassen zum Einsatz. Alternativen dazu wurden mit der Beladepatte aus GFK – Abstandsmaterial aufgezeigt, ein direkter Vergleich mit den Edelstahlbeladetassen steht jedoch noch aus.

In die Betrachtungen wurden technisch aufwendige Systeme mit mechanisch beweglichen Komponenten und evtl. Regeleinrichtungen (u. a. Verstellventile) nicht aufgenommen. Große Heißwasserspeicher in Nahwärmesystemen sollen möglichst wartungsfrei über einen langen Zeitraum (> 30 Jahre) funktionieren, es muss schon bei der Konzeption auf die Vermeidung von möglicherweise später notwendigen Substitutionen geachtet werden.

Untersuchungen zu weiteren Alternativen sollten im Laborversuch am Modell (siehe Visualisierung beim Solvis – Schichtenlader) erfolgen, die notwendigen Laborvoraussetzungen stehen im Fachgebiet Thermo- und Fluidynamik der TU Ilmenau zur Verfügung.

4. Erfolgskontrollbericht

Der Bericht ist in den Exemplaren des BMWA als externe Anlage beigelegt.

5. Zusammenfassung und Ausblick

5.1 Zusammenfassung

Die Zuverlässigkeit der Einzelkomponenten von thermischen Solaranlagen hat beim aktuellerreichten Stand der Technik bereits ein bemerkenswertes Niveau erreicht: Neben der Entwicklung und Weiterentwicklung von Kollektorkomponenten und -Systemen (Solar-Roof, Dachintegrationskonzepte, ...) besteht hier der Anspruch in der effizienten Auslegung und Bemessung zu einem optimalen "Gesamtsystem Solaranlage" und dessen Einbindung in das konventionelle Heizungssystem, sowie die ausgewogene Optimierung der dazugehörigen Regelungstechnik.

Dies stellt in seiner Gesamtheit hohe Anforderungen an den Fachplaner und das installierende Handwerk.

Die adäquaten Lösungen werden zur Zeit nur von einem "kleinen Kreis" spezieller Anbieter beherrscht. Die Mehrheit verfügt noch nicht über das komplette Know How einschließlich der nötigen zusätzlichen Installationsfertigkeiten.

Die Solarenergienutzung im Bereich der Niedertemperaturwärme beschränkte sich (immer) noch aus Kostengründen überwiegend auf die Warmwasserbereitung.

Parallel zur zunehmenden Verbreitung von solaren Warmwasseranlagen wurden ab 1990 auch Systeme zur solaren Raumheizung entwickelt und erprobt [34, 35, 36].

Der Marktanteil dieser Kombianlagen (WW+RH) an der installierten Kollektorfläche betrug in Österreich 1998 bereits 50% [32]. Ähnliche Zuwachsraten sind auch in anderen europäischen Ländern zu verzeichnen.

Die thermische Nutzung der Solarenergie besitzt unter günstigen Voraussetzungen und Beibehaltung der Marktanziehung gute Marktchancen. Dies kommt auch in den erreichten Ergebnissen der bisher im Programm ST2000, TP2 errichteten Anlagen in der Phase 1 und Phase 2 [33] zum Ausdruck.

In der Verbesserung der Solarkomponenten und daraus resultierend einer deutlichen Verlängerung der Lebensdauer dieser Komponenten liegen deutliche Kostendegressionspotentiale.

Im Teilprogramm 1 von ST 2000 wurde durch die ZfS Hilden das Langzeitverhalten von thermischen Solaranlagen im bundeseigenen Bereich untersucht, die im Rahmen des Zukunftsinvestitionsprogrammes (ZIP) im Zeitraum von 1978 –1983 installiert wurden.⁴⁾

Ein wesentliches Ergebnis ist, daß eine Lebenserwartung der Solaranlagen von über 20 Jahren nachgewiesen werden konnte. Bei der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung konnte ab dem Zeitpunkt bei entsprechend angepaßter Annuität die Obergrenze für die solaren Nutzwärmekosten (für nach den Vorgaben von ST 2000 ausgelegten Anlagen) auf maximal 0,128 EUR / kWh (0,25 DM / kWh) von bisher 0,153 EUR / kWh (0,30 DM / kWh) reduziert werden.

Die weiteren Ergebnisse der Untersuchungen, die in 07/97 abgeschlossen wurden, wurden und werden u.a. im Verlauf der Installationsphasen der Teilprogramme 2 und 3, bei TP 2 in den Projektphasen 1...3 berücksichtigt. Dadurch sollen insbesondere die Langzeitbeständigkeit und damit die Wirtschaftlichkeit der Anlagen weiter verbessert, eine höhere Planungssicherheit erreicht und ein u.U. noch bestehender Forschungsbedarf ausgelotet werden.

Die überwiegend am Markt angebotenen Solarsysteme für die Warmwasserbereitung im Hausbereich zeigen die Tendenz zur Erreichung eines möglichst hohen solaren Deckungsanteils, d.h., der spezifische Energieeintrag des Systemes (kWh / m²_{Kollektorfläche}) soll durch hocheffiziente Komponenten maximiert werden. Im Ergebnis

wird das PreisLeistungsverhältnis (EUR / kWh_{Solare Nutzwärme}) dadurch bei kleinen und mittleren Anlagengrößen immer ungünstiger.

Die Ergebnisse aus der Projekt-Phasen 1 und 2 zeigen, daß solare Vorwärmanlagen mit geringerem solarem Deckungsgrad wirtschaftlich günstiger betrieben werden können, als die zuvor beschriebenen typisch am Markt angebotenen Systeme.⁶⁾

Daraus resultierend ist die beginnende Entwicklung von energie- und wassersparenden Sanitärkonzepten im Verbund mit Solaranlagen zur Warmwasserbereitung und Heizungsunterstützung mit spezialisierten Puffer- und Bereitschaftsspeicherlösungen für Alt- und Neubauten.

Im Zeitraum vom 01.09.1997 – 31.08. 1998 wurde in einem vom Thüringer Ministerium für Wissenschaft, Forschung Kultur (TMWFK) unter dem Bearbeitungskennzeichen B 303 – 96111 geförderten Projekt „Nahwärmeversorgung eines ausgewählten Referenzobjektes mittels solarer Heizungsunterstützung und Langzeitspeicherung mit einem neuartigen Speicherkonzept“ in Zusammenarbeit mit dem Verbundpartner VKA Schönbrunn und weiteren Partnern ein Langzeitwärmespeicher-Konzept auf der Basis von GFK - PUR - Sandwich - Systemen mit einem Speicherbereich von 60 ... 300 ...480 ... 600 m³ entwickelt und ein Pilotspeicher mit 300 m³ in der Nähe der TU Ilmenau gebaut und erprobt.

Der Wärmelangzeit-Speicher wurde für eine maximale Medientemperatur von 98 °C ausgelegt, das Zulassungs- und Genehmigungsverfahren und Bau und Erprobung durchgeführt.

Der Eignungsnachweis für das Konzept und die eingesetzten Materialien (statische und wärmetechnische Forderungen) konnte mit Abschluß dieses Projektes erbracht werden. Dringender Bedarf bestand an einer Langzeitvermessung des Pilotspeichers unter Einsatzbedingungen, verbunden mit der Weiterentwicklung des GFK-Konzeptes zur vorgesehenen möglichen Baureihe bis 6.000 m³ Speichervolumen mit entsprechenden Zwischengrößen und einer nachhaltigen Senkung der Gesamtkosten.

Diese Aufgabenbearbeitung erfolgte im Bundesprogramm Solarthermie-2000, Teilprogramm 3: Solare Nahwärme-Begleitforschung und wurde im Zeitraum vom 01.04.1998 – 31.01.2003 unter dem Förderkennzeichen 0329606Q/0 die „Durchführung eines Meßprogrammes an dem 300 m³ Pilotspeicher und Untersuchungen zur Optimierung des Wärmespeicherkonzeptes“ vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) und weiter vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

Die Arbeiten erfolgten in enger Zusammenarbeit mit dem Kooperationspartner VKA Schönbrunn (Entwicklung eines neuen Fertigungsverfahrens für saisonale Wärmespeicher aus GFK-Verbundmaterialien für Nahwärme-Versorgungssysteme mit einer Senkung der spezifischen Material-, Fertigungs- und Montagekosten / Förderkennzeichen 0329606 R) und in engem Kontakt zum im August 1999 vom Lenkungsausschuss Solarthermie-2000 initiierten Arbeitskreis „Langzeitwärmespeicher-Speicherkosten“. Von diesem Arbeitskreis sollen die Kosten und Kostensenkungspotentiale (der verschiedenen Konzepte, die innerhalb des Programmes TP3 bearbeitet werden) der Langzeitwärmespeicherung geprüft werden sollen. Für die Analyse wurden die Daten der in Deutschland gebauten oder sich im Bau bzw. der Planung oder auch Vorplanung befindlichen Pilot- und Demoanlagen zugrunde gelegt.

Während des Bearbeitungszeitraumes des Forschungsprojektes “Durchführung eines Messprogramms an dem 300 m³ GFK – Pilotspeicher und Untersuchungen zur Optimierung des Wärmespeicherkonzeptes“ wurden umfangreiche Untersuchungen am 300 m³ Pilotspeicher in Form von Langzeitmaterialtests, Be- und Entladezyklen mit verschiedenen Schichtenladevorrichtungen und unterschiedlichen Temperaturniveaus erfolgreich durchgeführt. Im Ergebnis entstand ein 20 m³ Musterspeicher in neuer Technologie auf GFK – Basis. Hier flossen die bisherigen Erfahrungen ein. Es steht nach der Erprobung dieses Musterspeichers eine anwendbare und vom Verbundpartner VKA Schönbrunn GmbH lieferbare Speicherbaureihe von (20)...100 ...6000 m³ Speicherinhalt zur Verfügung, die angepasst an die Anforderungen gebäudeintegriert, freistehend, oder im Erdreich vergraben eingesetzt werden kann.



Abbildung 68: Wärmespeicher 20 m³ nach “Neuer Technologie“ im Winter

Die erreichten Ergebnisse sind im vorliegendem Bericht dokumentiert:

- Entwicklung eines Saisonal-Wärmespeichers mit modularem Aufbau
- Es steht eine einsatzfähige Baureihe von (20) 300 m³ bis 6000 m³ Speichervolumen zur Verfügung
- Wandaufbau aus einer Außenschicht GFK (ca. 6 mm), Kern aus PUR – Hartschaum mit Abmessungen von 100..150 mm entsprechend Anwendung, Innenschicht aus GFK (6.. 10 mm)
- Dachkonstruktion entsprechend Kundenanforderungen
- Boden wahlweise isoliert oder unisoliert zur Nutzung des Wärmespeichervermögens des darunter liegenden Erdreiches
- Nach innen führende Anschlussleitungen aus Kunststoff, zur Vermeidung von Wärmebrücken
- Aufstellung wahlweise komplett oberirdisch, in Gebäude integriert oder ganz/ teilweise eingegraben
- Verschiedene Be- und Entlademöglichkeiten (Schichtenladevorrichtungen)
- 6 Jahre Langzeiterprobung des GFK Materials (Keine Korrosion, UV-Beständigkeit, hohes Dämmvermögen, geringe Wärmeverluste, wartungsarm, physiologisch unbedenklich), eine Lebensdauer von mehr als 30 Jahren ist, nachgewiesen durch andere GFK - Anwendungen, zu erwarten
- Kostendegression entsprechend Lernkurve (siehe hierzu auch Abschlußbericht des Verbundpartners VKA von 08/2002/FKZ 0329606R, insbesondere Anlage 7.2.1 / 7.3.1):
 - * Im Vergleich Pilotspeicher 300 m³ Basistechnologie (spezifische Kosten 715,8 € / m³ Wärmespeicher) zur Ausführung Speicher 300 m³ TNT in neuer Technologie (spezifische Kosten 366 € / m³ Wärmespeicher) ergibt sich beim Vergleich der Gesamtselbstkosten eine Einsparung von 49,5 %.
 - * Beim 6000 m³ Wärmespeicher liegen die spezifischen Kosten nur noch bei 109 € / m³ Speichervolumen.

Die Erreichung der Kosten entsprechend der vorgegebenen Lernkurve konnte nachgewiesen werden. Der Vergleich zum aktuellen Stand zeigt, dass die GFK-Speicher im unteren Kostenbereich liegen und damit wettbewerbsfähig sind.

- * “Klein-Wärmespeicher“: Nach Realisierung, erfolgreicher Inbetriebnahme und Erprobung des 20 m³ - Speichers nach “Neuer Technologie“ und der

Kenntnis zum wachsenden Bedarf an Wärmespeichern für Systeme zur solaren Raumheizung (-sunterstützung) [Quelle: 34, 35, 36] wurde der Einsatz von GFK-Wärmespeichern in den Bereichen von 5 ... 30 m³ Speichervolumen untersucht, sowohl für drucklose Systeme als auch für druckbelastete Systeme bis ca. 2 bar untersucht, wobei für die druckbelasteten Speicher das System mit Vollwand besser geeignet ist, als das beim Speicher NT angewendete Vakuum-Gieß-Press-Verfahren. Als Vergleichswerte dienen die

aus ST 2000, TP2 und anderen ausgeführten Anlagen bekannten Kosten für gedämmte Stahlspeicher.

Im Ergebnis zeigen sich durchaus wirtschaftliche Vorteile durch den Einsatz von GFK-Speichern mit bis zu 20% niedrigeren Kosten, mit nachfolgenden Vorteilen:

- gute Wärmedämmeigenschaften, geringe Verluste
- gute Integrationsmöglichkeiten in vielfältige Anlagenkonzepte
- physiologische Unbedenklichkeit
- ökologische Unbedenklichkeit der verwendeten Materialien
- korrosionsbeständig, UV-beständig
- wartungsarm, einfaches Handling

5.2 Ausblick und Vorschläge zur Weiterführung der Arbeiten

Die Entwicklungsziele wurden erreicht. Entstanden ist eine abrufbare Baureihe für Langzeitwärmespeicher aus GFK bis zu 6.000 m³ Speichervolumen. Die erwarteten technischen Daten wurden durch die begleitenden Messungen und Untersuchungen nachgewiesen.

In der Kenngröße Kosten pro umbauter Raum liegen die Werte deutlich im unteren Bereich der vorgegebenen Lernkurve. Beim Speicher mit 6.000 m³ betragen sie noch 109,00 € / m³.

Weitere Kostensenkungen sind denkbar, wenn eine erweiterte, dem freien Wettbewerb zugängliche Modulfertigung organisiert werden könnte, die z.B. die vorausberechneten Module zur Leistungserbringung ausschreibt und unter Leitmontagebedingungen die Realisierung vor Ort erfolgen würde.

Leider konnte ein Großspeicher nicht realisiert und vermessen werden, da es keine Projekte für den Einsatz derartig großer Wärmelangzeitspeicher derzeit und in absehbarer Zukunft in Deutschland gibt. Der vorgesehene Einsatz im Solardorf Thüringen konnte nicht verwirklicht werden, weil das vorgesehene Nahwärmeversorgungssystem und die dazugehörige Siedlung nicht realisiert wurden. Die Einsatzprüfung eines "großen" Speichers ist intensiv anzustreben, da die im Vergleich deutlich besseren Gebrauchswerte, wie Korrosionsbeständigkeit, absolut feuchtigkeitsunempfindliche Dämmung (damit langzeitstabil), niedrigste Betriebskosten, Langlebigkeit,.... im Vergleich zu den anderen Konzepten die Solaren Nutzwärmespeicherkosten auf Dauer auf ein kalkulierbares niedriges Kostenniveau halten können.

Intensiv wurde während der Bearbeitung an der Weiterentwicklung von thermischen Beladesystemen gearbeitet. Hier besteht ein weiterer Entwicklungsbedarf. Die Entwicklung sollte durch begleitende Forschungsmaßnahmen (Modelluntersuchungen, Kleinversuche und unterlegte Simulationen weiter geführt werden.

Die Recherchen zeigen, daß künftig durch die steigende Anzahl von Systemen zur Heizungsunterstützung es einen damit steigenden Bedarf an Wärmespeichern zur Wochen- und Monatsspeicherung geben wird.

Die Untersuchungen zeigen, daß das GFK-Konzept sich hierfür vorzüglich eignet. Es befinden sich z.Zt. bereits einige Speicher im Einsatz.

Hier sollte eine Weiterentwicklung zur Konzeptanpassung und zur weiteren Kostenreduktion betrieben werden. Hervorzuheben ist hierbei die Möglichkeit, ab

Werk unter industriemäßigen Fertigungsbedingungen einen maximalen Vorfertigungsgrad und den nötigen Prüfungen und Abnahmen zu erreichen.

Dipl.-Ing. J. Bühl

30.07.2003

Leiter AG regenerative Energien und Umweltmeßtechnik
Projektleiter

Dank

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, Forschung und Technologie bzw. des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit innerhalb des Forschungs- und Demonstrationsprogramms Solarthermie 2000 unter dem Kennzeichen 0329606Q/0 gefördert. Besonderer Dank gilt auch dem Projektträger PTJ für die Unterstützung des Vorhabens.

Literatur/Quellen:

- [1] Hahne, E. et. al.: Solare Nahwärme - Ein Leitfaden für die Praxis, BINE-Informationspaket, TÜV-Verlag, Köln, 1998, ISBN 3-8249-0470-5
- [3] Störing, S.: Projektarbeit – Simulation eines Musterspeichers 1,3 m³ mit TRNSYS 14.1 und Überprüfung auf der Grundlage der parallel aufgenommenen Messwerte am Musterspeicher, TU Ilmenau, 1998
- [3] K. Bonhoff, L. Jörissen, B. Milow, G. Stadermann.: Speicherung von Wasserstoff und Wärme, FVS Workshop 2001
- [4] Jean –Christophe Hadorn (Hrsg.: Schweizerischer Ingenieur- und Architekten - Verein), Wegleitung zur saisonalen Wärmespeicherung, SIA Dokumentation D028d
- [5] Fiberdur-Vanck GmbH, Vergleich GFK zu Stahl und Polyethylen, <http://www.fiberdur-vanck.de/>
- [6] H. Domininghaus.: Die Kunststoffe und ihre Eigenschaften, 5. Auflage, 1998, Springer Verlag
- [7] K. Oberbach, Saechtling, Kunststoff Taschenbuch, 28. Ausgabe, 2001, Carl Hanser Verlag München
- [8] Knauer, Prof. , Abschlußbericht: Entwicklung eines neuen Fertigungsverfahrens für saisonale Wärmespeicher aus GFK – Verbundmaterialien, BMWi Förderkennzeichen 0329606R
- [9] Klein, Rico, Theoretische Untersuchungen zu ausgewählten Schichtenladesystemen für Warmwasserspeicher, Studienarbeit TU Ilmenau, Fak. für MB, 2001
- [10] <http://www.frankensolar.de/Solarthermie/Anlagensysteme/Raumwarme/>
- [11] OTTI Energie-Kolleg, 12. Symposium Thermische Solarenergie, 2002, ISBN 3-934681-20-4
- [12] OTTI Energie-Kolleg, 13. Symposium Thermische Solarenergie, 2003, ISBN 3-934681-26-3
- [13] M. Benner, E.W.P. Hahne, Terrastock 2000, Proceedings Volume 1 und 2
- [14] Daniel Spreng, Energiebilanzen von Energiesystemen, Graue Energie, 1995, vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich und B.G. Teubner, Stuttgart, ISBN 3-519-02164-1
- [15] J. Bühl, A. Nilius, Langzeitwärmespeicher mit GFK-Verbundwerkstoffen für solar gestützte Wärmeversorgungssysteme, Energiespeicher, VDI - Berichte 1734, 2002, ISBN 3-18-091734-2

- [16] Projektinfo 02/03; Glasfaserverstärkte Kunststoffe für den Wärmespeicherbau, BINE Informationsdienst
- [17] Kübler, R. ; Guigas, M. ; Müller, F. ; Mazarella, L. (Uni Stuttgart, Institut für Thermodynamik und Wärmetechnik): Einsatz von solar unterstützten Nahwärmeversorgungssystemen mit saisonalem Wärmespeicher. Forschungsbericht zum BMFT Vorhaben 0328867 A. Juni 1992
- [18] Solar Heating with seasonal Storage - Some Aspekts of the Design and Evaluation of Systems with Water Storage Jan - Olof Datenbäck, Göteborg 1993
- [19] J. Nitsch u.a.: Solare Wärmeversorgung einschl. Großwärmespeicher in Baden-Württemberg Einzelgutachten im Rahmen des Projektes "Klimaverträgliche Energieversorgung in Baden-Württemberg" der Akademie für Technikfolgeabschätzung, Stuttgart 1994
- [20] Klim, S. K. , ; Steiner, D. ; Groll, M. (Uni Stuttgart IKE): Untersuchungen zum thermischen Verhalten eines Salzkeramik-Latentwärmespeichers DGS 1994 ISF Stuttgart 1994
- [21] Fisch, N.; Kübler,R.: " Wärmespeicher " Verlag TÜV Rheinland Köln, 2.Auflage 1992
- [22] BINE Informationsdienst – themen/info 02/03 "Glasfaserverstärkte Kunststoffe für den Wärmespeicherbau", Hrsg. Fachinformationszentrum Karlsruhe – ISSN: 0937 – 8367
- [23] Reuß, M.; u.a.: ZAE Bayern, "Solare Nahwärme mit saisonaler Wärmespeicherung in Attenkirchen – Erfahrungen beim Bau und Betrieb", 13. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz 14.-16.05.2003
- [24] Schmidt, T., u.a.; Solar – Wärmetechnik Stuttgart (SWT), "Solarthermie-2000 Teilprogramm 3 – Ergebnisse aus den Pilotanlagen in Friedrichshafen, Neckarsulm und Rostock", 13. Symposium Thermische Solarenergie, Kloster Banz 14.-16.05.2003
- [25] E.A.Drapala, Einbindung eines Wärmelangzeitspeichers in ein solargestütztes Nahwärmeversorgungssystem und Diskussion der Möglichkeiten der hydraulischen Einbindung, Projektarbeit TUI, 07/2003
- [26] P.Schultheis, J.Bühl, Nahwärmeversorgung eines ausgewählten Referenzobjektes mittels solarer Heizungsunterstützung und Langzeitspeicherung mit einem neuartigen Speicherkonzept, Abschlußbericht, TUI, 14.01.1999
- [27] J.Bühl, Langzeitwärmespeicherung mit einem neuartigen Speicherkonzept für solargestützte Nahwärmesysteme, FVS Workshop 2001, ISSN: 0949-1082
- [28] Buschmann, S., Wittwer, u.a.: "Heizungsunterstützung mit solarthermischen Großanlagen ", Fraunhofer Institut für solare Energiesysteme ISE Freiburg,

13. Symposium Thermische Solarenergie, 14. - 16.05.03, Kloster Banz, Bad Staffelstein

- [29] Stryi-Hipp, G.: "Standortbestimmung der Solarthermiebranche", Bundesverband Solarindustrie, BSI Berlin, 13. Symposium Thermische Solarenergie, 14. - 16.05.03, Kloster Banz, Bad Staffelstein
- [30] Knauer, B., u.a.: "Schlußbericht zum Forschungsvorhaben Solarthermie2000-Teilprogramm 3: Solare Nahwärme- Begleitforschung: "Entwicklung eines neuen Fertigungsverfahrens für saisonale Wärmespeicher aus GFK-Verbundmaterialien für Nahwärmeversorgungssysteme mit einer Senkung der spezifischen Material-, Fertigungs- und Montagekosten", VKA GmbH Schönbrunn, 08/02
- [31] Peuser, F.A.; Croy, R.; Schumacher, J.; R. Weiß: "Langzeiterfahrungen mit thermischen Solaranlagen"- Eigenveröffentlichung der: ZfS - Rationelle Energietechnik GmbH Hilden 1997
- [32] Faninger, G.: Solarmarkt in Österreich, BMWV, 1999
- [33] Bühl, J.: Zwischenbericht ST 2000, Teilprogramm 2 in Thüringen für das Jahr 2002
- [34] Weiß, W.; Institut für nachhaltige Technologien, A -8200 Gleisdorf, Solare Kombianlagen im europäischen Vergleich – Ergebnisse der IEA Task 26, Zwölftes Symposium Thermische Solarenergie, 24. bis 26. April 2002, Kloster Banz
- [35] Kerskes, H.; Universität Stuttgart / ITW, Über das thermische Verhalten von Kombianlagen – Ergebnisse des "Kombianlagen-Projekts" Zwölftes Symposium Thermische Solarenergie, 24. bis 26. April 2002, Kloster Banz
- [36] Drück, H.; Universität Stuttgart / ITW, Solare Kombianlagen der nächsten Generation Advanced solar combisystems, Zwölftes Symposium Thermische Solarenergie, 24. bis 26. April 2002, Kloster Banz