



Bundesministerium  
für Umwelt, Naturschutz  
und Reaktorsicherheit



**Förderprogramm des BMU zu Forschung und Entwicklung im Bereich  
Solarthermische Kraftwerke**

**Verbundprojekt: Entwicklung und Integration Thermischer Energiespeicher in  
Rinnenkraftwerken mit Solarer Direktverdampfung - ITES**

**FKZ: 03UM0064, 03UM0065, 03UM0066**

**Projektpartner:** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) -  
Institut für Technische Thermodynamik (ITT)  
(Kordinator); Ed. Züblin AG; Siemens Aktiengesellschaft  
- Power Generation (PG) ERIN

**Zuwendungssumme:** 2.433.887 EUR

**Laufzeit:** 01.05.2006 – 31.12.2009

## **Verbundvorhaben ITES: Entwicklung und Integration Thermischer Energiespeicher in Rinnenkraftwerken mit Solarer Direktverdampfung**

Verbundpartner: **DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.**  
**Ed. Züblin AG**  
**Siemens Aktiengesellschaft, Energy Sector**

Projektkoordinator  
Projektleiter  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Dipl.-Ing. Doerte Laing  
Institut für Technische Thermodynamik  
Pfaffenwaldring 38-40  
70569 Stuttgart  
Tel.: 0711/6862-608  
Fax: 0711/6862-747  
Email: [doerte.laing@dlr.de](mailto:doerte.laing@dlr.de)

Laufzeit: 1. Mai 2006 – 31. Dezember 2009

### **1. Einleitung und Zusammenfassung**

Solarthermische Kraftwerke (STKW) wandeln konzentrierte Solarstrahlung in Hochtemperaturwärme um, die den fossilen Brennstoff im Kraftwerksprozess ersetzt. Um hierbei eine gesicherte Leistung garantieren zu können, sind Energie-Speicher erforderlich. Hochtemperatur-Solarthermie kann in Deutschland selbst, mangels hinreichender Direktstrahlung, nicht wirtschaftlich angewendet werden, sondern stellt eine neue Chance dar, schlüsselfertige Anlagen, Komponenten und Engineering auf dem Weltmarkt zu exportieren. Die südeuropäischen EU-Mitglieder Spanien, Portugal, Italien und Griechenland haben mit der Verabschiedung neuer Einspeisegesetze die Grundlage für solarthermische Kraftwerksprojekte gelegt. Auch die Weltbank hat Anreize für den Bau von 4 solarthermischen Kraftwerken in Indien, Ägypten, Marokko und Mexiko geschaffen. Darüber hinaus interessieren sich Südafrika, Israel und Iran für solarthermische Kraftwerke. Auch die Südweststaaten der USA haben nach der Energiekrise in Kalifornien die Chancen wiederentdeckt, die Stromerzeugung mit Hilfe der Solarthermie zu diversifizieren. Ein erstes Rinnenkraftwerk mit 64 MW wurde bereits in Nevada errichtet und ist 2007 ans Netz gegangen. Algerien verhandelt als erstes nordafrikanisches Land mit der EU über Anreize für den Export von Solarstrom nach Europa und will ein nationales Einspeisegesetz schaffen.

Gegenüber der bereits kommerziell eingesetzten Öl-Rinnentechnik weist die solare Direktverdampfung ein signifikantes Potential zur Kostensenkung und zur Wirkungsgrad-Erhöhung auf und gilt daher als aussichtsreichste Option zur Verbesserung der solarthermischen Parabolrinnen-Kraftwerkstechnik. Ein wichtiger Meilenstein, den es auf dem Weg zur technologischen Umsetzung zu erfüllen bedarf, ist die Entwicklung einer technisch und wirtschaftlich machbaren Speichertechnik.

Besonders für Prozesse mit dem Arbeitsmedium Dampf sind Latentwärmespeicher eine äußerst attraktive Option, wenn die Phasenwechsel von Arbeits- und Speichermedium entsprechend angepasst werden. Hierdurch können große Wärmemengen in einem schmalen Temperaturbereich gespeichert werden. Bisherige Ansätze konzentrieren sich auf diesen Zweiphasenbereich der Verdampfung und Kondensation. Für die Wärmespeicherung im Bereich der Vorwärmung und Überhitzung bieten sich sensible Feststoffspeicher als günstigste Speichervariante an.

Der Betrieb eines solarthermischen Kraftwerkes mit solarer Direktverdampfung stellt neue Herausforderungen an das Betriebsmanagement, die sich gegenüber der etablierten Öl-Rinnentechnologie deutlich unterscheiden. Die Anforderungen werden durch den Einsatz eines dualen Speicherkonzeptes noch erhöht. Daher muss frühzeitig ein angepasstes Betriebsmanagement identifiziert und am Gesamtsystem validiert werden.

## 2. Projektziele

Im Rahmen des Projektes soll erstmalig ein Speicherkonzept für Solarthermische Kraftwerke mit solarer Direktverdampfung entwickelt werden, welches den Bereich Vorwärmung, Verdampfung und Überhitzung einschließt und damit den gesamten Temperaturbereich von 200 - 500°C abdeckt.

Ein Speichersystem, bestehend aus Verdampfer und Überhitzer bis 400°C, mit einer Gesamtgröße von mindestens 1 MWh Speicherkapazität, soll am Kraftwerk Litoral von Endesa in Carboneras, Spanien realisiert und getestet werden. Als Voraussetzung für den Einsatz der Feststoffspeichertechnologie für die Überhitzung wird die Machbarkeit der Feststoffspeichertechnologie in großen Modulen durch einen Testbetrieb an einem repräsentativen Speichertestmodul in der Thermoöl-Testanlage in Stuttgart nachgewiesen. Zudem soll auf das im Rahmen des BMU Projekts WANDA entwickelte Know-how zur sensiblen Betonspeichertechnik und auf das im Rahmen des EU Projekts DISTOR entwickelte Know-how zu Latentwärmespeichern zur Bereitstellung der Verdampfungsenergie aufgebaut werden.

Um das Potential der Direktverdampfung mit Überhitzung bis 500 °C zu erschließen, soll ein temperaturfester Hochtemperatur-Beton entwickelt werden, der bis 500 °C eingesetzt werden kann. Die bisherigen Entwicklungen im Rahmen von WESPE und WANDA waren durch das verwendete Thermoöl auf maximal 400 °C begrenzt.

Die Auslegung eines Speichersystems erfordert die dynamische und stationäre Betrachtung des Gesamtsystems bestehend aus Kollektorfeld, Speicher und Kraftwerksblock. Für mindestens zwei Referenzsysteme wird das Gesamtsystem thermodynamisch ausgelegt. Die notwendigen Simulationswerkzeuge werden erstellt bzw. erweitert. Die optimale Ausnutzung des Gesamtsystems insbesondere des Speichers ist nur mit einer angepassten Betriebsstrategie möglich. Für die ausgelegten Referenzsysteme werden Betriebsstrategien entwickelt und mit Hilfe der entwickelten Werkzeuge bewertet. Die spezifischen Anforderungen solarthermischer Kraftwerke an die Prozessleittechnik werden identifiziert und bestehende Systeme auf ihre Einsatzfähigkeit hin untersucht.

Vor dem Hintergrund der Spanischen Kraftwerksplanungen wird exemplarisch für ein 5 MW Kraftwerk mit solarer Direktverdampfung das wirtschaftliche Potenzial der Online Prozessoptimierung ermittelt.

## 3. Arbeitsinhalte

### 3.1. Betriebsanalyse des Gesamtsystems und Entwicklung einer angepassten Leittechnik

Solarthermische Kraftwerke stellen ungewöhnliche Anforderungen an den Kraftwerksblock. Aufgrund des teuren solaren Dampferzeugers werden Kraftwerksblöcke mit hohen Wirkungsgraden gefordert, die in dieser Form bei konventionellen Kraftwerken nicht wirtschaftlich wären. Gleichzeitig müssen die Kraftwerksblöcke für tägliches An- und Abfahren und häufige Lastwechsel geeignet sein. Die Integration eines Speichers in das Kraftwerkssystem führt zu höheren Anforderungen an die Prozessführung, eröffnet aber auch die Möglichkeit eines ertragsoptimierten Betriebsmanagements. Bei dem Gesamtsystem bestehend aus Kollektorfeld, Kraftwerksblock und Speicher sind zahlreiche Verschaltungsmöglichkeiten denkbar.

Das DLR analysiert verschiedene Schaltungsvarianten hinsichtlich ihres Be- und Entladeverhaltens, ihrer erforderlichen Speicherkapazitäten, der erforderlichen Investitionen und des erwarteten Betriebsaufwandes, definiert unterschiedliche Betriebsstrategien und bewertet deren Einfluss auf den Stromertrag bzw. den Erlös des Gesamtsystems exemplarisch für einen Standort in Spanien mit der dortigen Tarifstruktur. Die Übertragbarkeit auf andere Standorte mit den entsprechenden Tarifstrukturen wird diskutiert.

Siemens untersucht und bewertet die Auswirkungen der definierten Betriebsstrategien auf die konzipierten Kraftwerksblöcke mit Hilfe der dynamischen Simulation und identifiziert Maßnahmen um die Betriebsstrategien optimal an die untersuchten Konzepte anzupassen. Auf Basis dieser Prozessanalyse werden von Siemens leittechnische Konzepte entwickelt und die entsprechenden

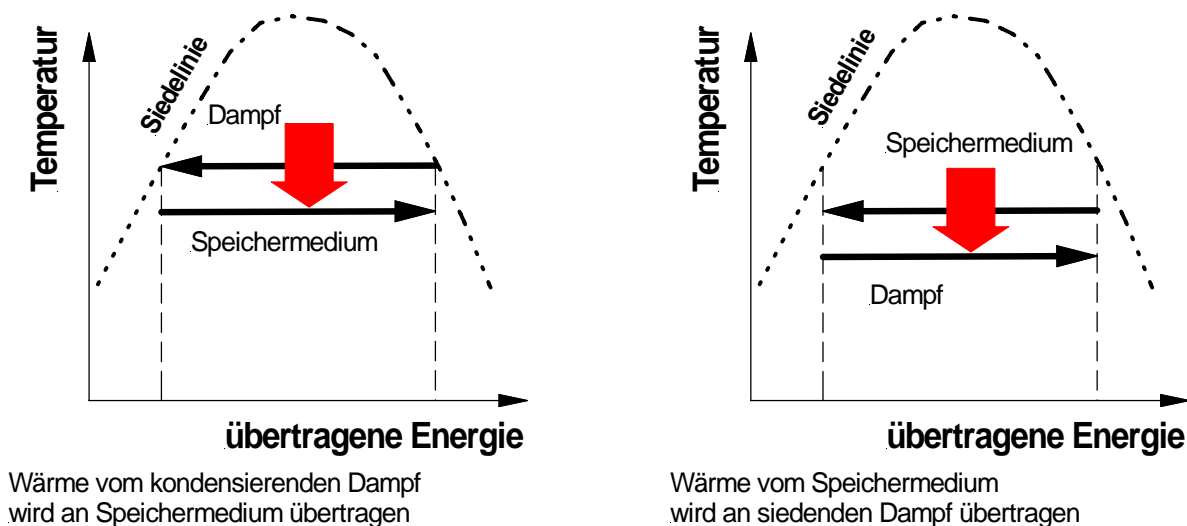
Aufgabenstellungen definiert. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Einsetzbarkeit der konzipierten Hardware unter den Betriebsbedingungen solarthermischer Kraftwerke (aride Gebiete mit extremen Temperaturschwankungen zwischen Tag und Nacht, große räumliche Ausdehnung der Anlagen) gelegt. Diese Entwicklungsarbeiten werden im Hinblick auf die Größe künftiger kommerzieller solarthermischer Kraftwerke für Turbinen der Leistungsklasse 50 MW durchgeführt. Die Übertragbarkeit auf die geplante 5 MW Demo Anlage wird aufgezeigt.

Aufgrund ständig wechselnder Strahlungs- und Umgebungsbedingungen, ändern sich kontinuierlich die Betriebsbedingungen Solarthermischer Kraftwerke. Die Betriebsführung muss auf diese schwankenden Einflussgrößen angemessen reagieren. Für jeden Betriebspunkt können unterschiedliche Prozessparameter zu optimalen Betriebsergebnissen führen. Das DLR untersucht und bewertet an Hand des geplanten 5 MW Demo-Kraftwerks ohne Speicher exemplarisch das wirtschaftliche Potenzial einer Online Optimierung des Anlagenbetriebs.

### 3.2. Entwicklung eines Latentwärmespeichers zur Verdampfung

Für dampfbetriebene Prozesse sind Latentwärmespeicher eine äußerst attraktive Option. Diese Art der Speicher nutzen eine Phasenumwandlung im Speichermedium (PCM – Phase Change Material), zum Beispiel vom festen zum flüssigen Zustand aus. Dadurch können große Wärmemengen in einem schmalen Temperaturbereich gespeichert werden. Voraussetzung ist, dass die Phasenwechseltemperaturen von Arbeits- und Speichermedium entsprechend angepasst werden.

Abbildung 1 zeigt das Grundkonzept eines Latentwärmespeichers: Das linke Diagramm zeigt die Wärmeübertragung bei der Beladung des Latentwärmespeichers, wo bei die Wärme des kondensierenden Dampfes bei konstanter Temperatur mit praktisch konstanter Temperaturdifferenz an das PCM übertragen wird, welches dabei aufgeschmolzen wird. Das rechte Diagramm zeigt den Entladevorgang, bei dem die Wärme vom PCM an das Wasser/Dampf-Gemisch übertragen wird. Dabei erstarrt das PCM und das Wasser wird verdampft. Auch dieser Prozess läuft bei konstanter Temperatur ab.



**Abbildung 1 Grundkonzept Latentwärmespeicher: Wärmeübertragung bei konstanter Temperatur**

Als Phasenwechselmaterialien eignen sich im Temperaturbereich zwischen 130 °C und 340 °C besonders Nitratsalze und deren Eutektika. Das Hauptproblem bei der technischen Umsetzung der Latentwärmespeicherung im Hochtemperaturbereich liegt in der unzureichenden Wärmeleitfähigkeit der Nitratsalze. Diese liegen typischerweise um 0,5 W/(mK). Will man Latentwärmespeicher mit ausreichend hohen Lade- und Entladeleistungen erreichen, so benötigt man entweder sehr große, unwirtschaftliche Wärmeübertragungsflächen oder Speichermedien mit erheblich höherer Wärmeleitfähigkeit. Durch Wärmeleitstrukturen aus hochleitfähigem Graphit oder Metall, welche in das Phasenwechselmaterial integriert sind, kann ein ausreichender

Wärmedurchgang erzielt werden. Im Frühjahr 2006 wurde ein derartiges Speichersystem bei 145°C im 20 kW-Bereich erfolgreich demonstriert. Eine Weiterentwicklung und die Erprobung im 100 kW-Maßstab bei 225°C konnte erstmalig 2007 mit solar erzeugtem Dampf gezeigt werden.

In solarthermischen Kraftwerken liegt der Prozessdruck üblicherweise um 100 bar. Daher wurde Natriumnitrat ( $\text{NaNO}_3$ ) mit einer Schmelztemperatur von 306 °C als geeignetes Phasenwechselmaterial ausgewählt. Natriumnitrat wird unter anderem als Dünger und in der Industrie großtechnisch eingesetzt und ist zu niedrigen massenspezifischen Preisen verfügbar. Die Schmelzenthalpie ist 182 J/g und die Volumenänderung beim Aufschmelzen beträgt 10,7%.

In Laboruntersuchungen hat sich herausgestellt, dass die Oxidationsstabilität von Graphit bei den Anwendungstemperaturen bis 350°C nicht mehr ausreichend ist, daher wurde ein Konzept mit alternativen metallischen Lamellen entwickelt. Dieses Konzept wurde bereits im Labormaßstab realisiert (Abbildung 2). Der Nachweis der integralen Speichercharakteristik wurde im Sommer 2008 in einem Technikumsversuch am DLR erbracht (Abbildung 3).

Zusätzlich wurden viele verschiedene Materialuntersuchungen zur Charakterisierung der Materialien und zur Korrosionsbeständigkeit und Zyklenfestigkeit am DLR durchgeführt.

In einer wärmetechnischen Auslegung wurde ein Speichermodul mit ca. 700 kWh Speicherkapazität als Demonstrationsmodul ausgelegt. Die Lamellenentwicklung, das Detailed Engineering und die Fertigung des PCM-Speichermoduls wird in Zusammenarbeit mit der Fa. Spanner RE<sup>2</sup> GmbH durchgeführt.



Abbildung 2 PCM-Technikumsspeicher

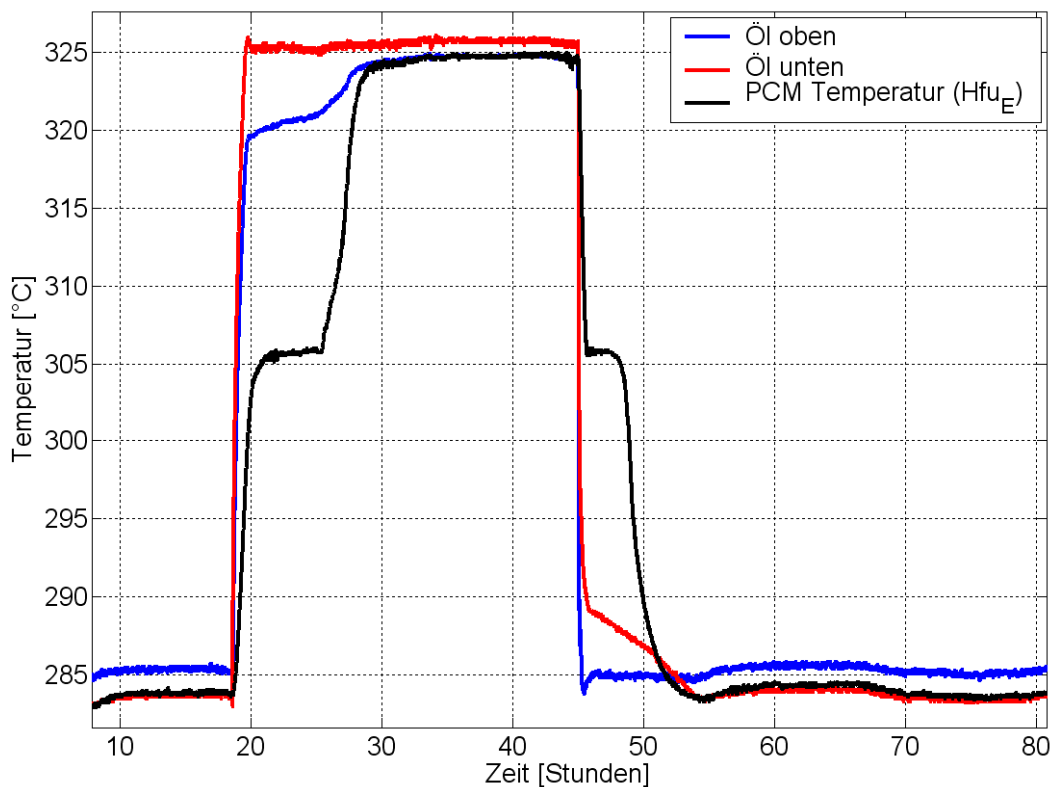


Abbildung 3 Typischer Lade-/Entladezyklus am PCM-Technikumsspeicher

### 3.3. Entwicklung eines sensiblen Wärmespeichers zur Vorwärmung und Überhitzung

#### Allgemeines

Für die Wärmespeicherung im Bereich der Vorwärmung und Überhitzung bieten sich sensible Speicher an. Aufgrund der guten wärmetechnischen Eigenschaften bei gleichzeitig geringem Preis wird ein Feststoffspeicher aus Hochtemperaturbeton entwickelt und getestet. Der Speicher besteht dabei aus dem Speicherbeton und einem Rohrregister durch welches das Wärmeträgermedium strömt.

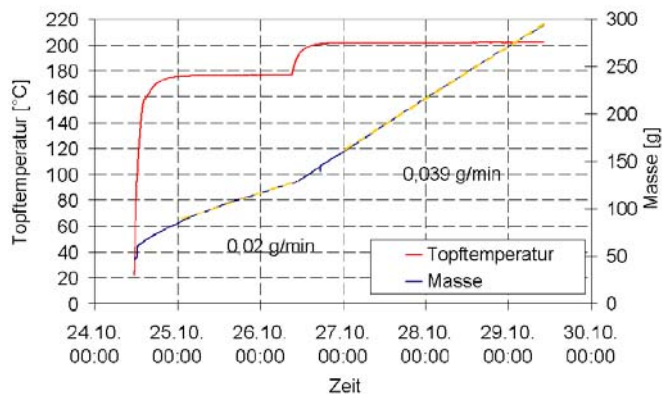
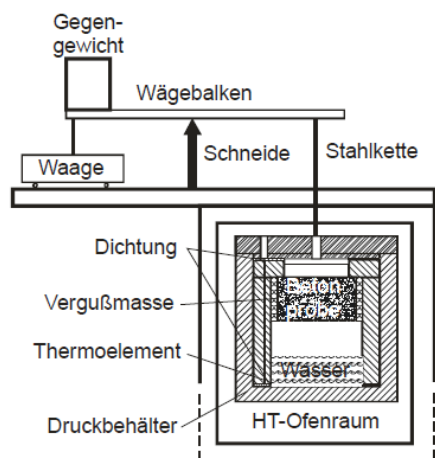
#### Materialentwicklung

Entscheidenden Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Speichers haben die Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit des Speicherbetons. Aufgrund der großen Mengen an Zuschlagstoff (Zuschlag etwa 80% der Masse des Betons), ist es aus wirtschaftlicher Sicht zwingend notwendig, regional verfügbaren Ausgangsstoffen zu verwenden. Damit sind einer Verbesserung dieser Eigenschaften sehr enge Grenzen gesetzt.

In Laborversuchen wurden verschiedene Betonrezepturen untersucht und deren Beständigkeit und Zyklenfestigkeit nachgewiesen.

Bei der ersten Aufheizung des Speichers muss das freie und teilweise das chemisch gebundene Wasser aus dem Speicherbeton ausgetrieben werden. Die Trocknung hängt dabei von der Aufheizzeit, den Speicherabmessungen bzw. dem durchströmten Weg und der Durchlässigkeit des Speichermaterials ab. Da die Aufheizzeit begrenzt ist und eine wirtschaftliche Herstellung der Speichermodule nur realisierbar ist, wenn Speichermodule mit großen Abmessungen hergestellt werden, sind zusätzliche Entspannungskanäle anzuordnen oder die Dampfdurchlässigkeit des

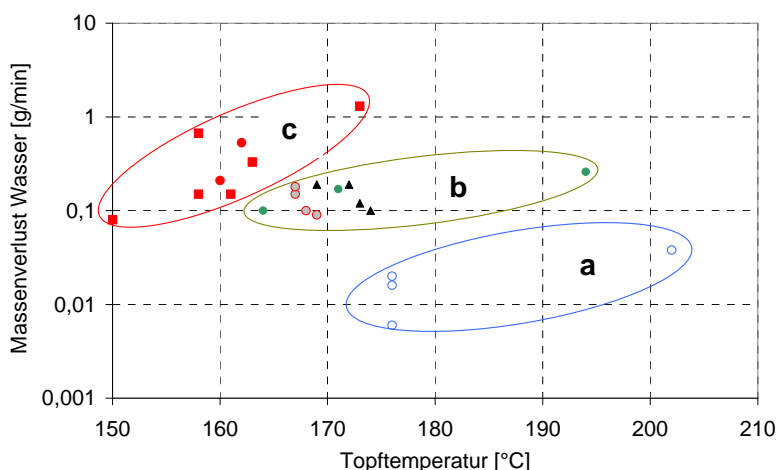
Speicherbetons ist zu erhöhen. Zur Ermittlung der Dampfdurchlässigkeit verschiedener Rezepturen wurde eine Apparatur (Abbildung 4) entwickelt die es ermöglicht, die Wasserdampfdurchlässigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur zu bestimmen. Abbildung 5 zeigt beispielhaft die Menge des Dampfdurchgangs durch den Probekörper bei unterschiedlichen Temperaturen.



**Abbildung 4 - Schematischer Aufbau der Apparatur zur Ermittlung der Dampfdurchlässigkeit**

**Abbildung 5 - Beispiel Messdaten Permeabilitätstest**

In Abbildung 6 sind die Ergebnisse der Permeabilitätsversuche für eine Basisrezeptur (a) und für Betone, die durch Zusätze und betontechnologische Maßnahmen im Hinblick auf eine hohe Durchlässigkeit optimiert wurden (b, c), dargestellt. Durch diese Versuche konnten Betone gefunden werden (c), bei welchen die Dampfdurchlässigkeit ausreichend groß ist, dass auf zusätzliche Maßnahmen zum Dampfdruckabbau verzichtet werden kann.



**Abbildung 6 - Ergebnisse Permeabilitätsversuche**

### Speicherdesign

Der Wärmespeicher besteht aus einem Rohrregister mit parallel angeordneten Rohren. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Dehnungen des Speicherbetons und des Rohrregisters ist zur Vermeidung von Zwängungen und den damit verbundenen unzulässigen Beanspruchungen auf den Beton bzw. das Rohrregister eine Entkoppelung beider Komponenten erforderlich. Um durch die Entkoppelung eine Beeinträchtigung des Wärmeübergangs zwischen Rohr und Beton zu vermeiden, wird eine Umwicklung der Rohre mit expandiertem Graphit vorgesehen.

### Testmodul

Zur Demonstration der technischen Realisierbarkeit und Leistungsfähigkeit des Betonwärmespeichers wurde von Züblin auf dem Gelände der Universität Stuttgart ein erstes Testmodul (mit Wärmeträgeröl, Abbildung 7) errichtet, erfolgreich in Betrieb genommen und erste Zyklen gefahren (Abbildung 8). Im Hinblick auf die schadlose Ableitung des bei der Aufheizung freierwerdenden Wassers wurde besonderes Augenmerk auf ein entsprechendes Aufheizregime und die Kontrolle der Dampfdruckentwicklung gelegt. Weiterhin konnte die Wirksamkeit der Entkopplung Rohr / Speichermaterial nachgewiesen werden.



Abbildung 7 - Testmodul (ohne Wärmedämmung) auf dem Gelände der Universität Stuttgart

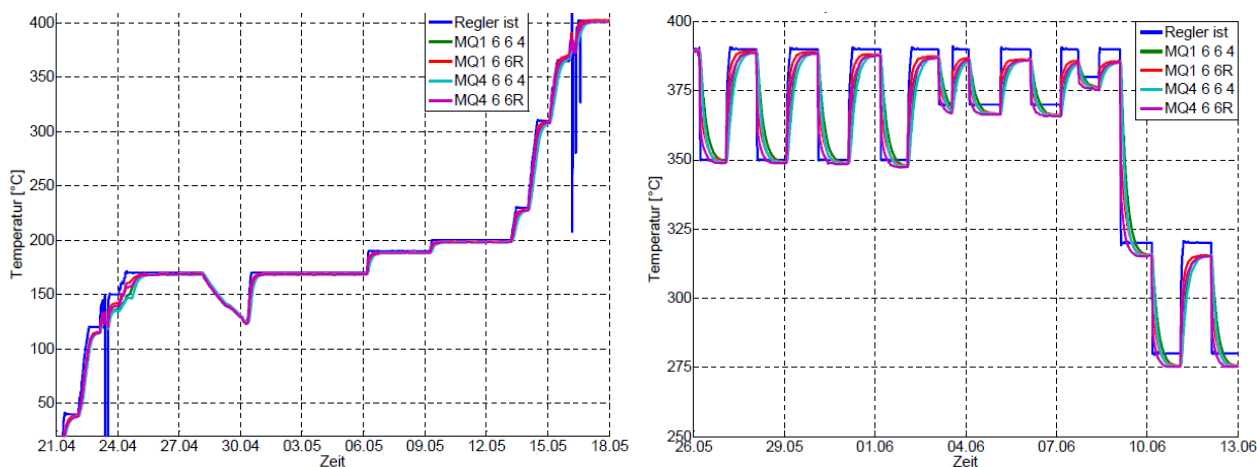


Abbildung 8 - Aufheizung / Zyklisierung Testmodul

### Thermo-Mechanisches Stoffgesetz

Für die numerische Simulation des thermo-mechanischen Verhaltens des Betonwärmespeichers wird bei Züblin ein angepasstes Stoffgesetz entwickelt. Ziel der Entwicklung des numerischen Modells und des thermo-mechanischen Stoffgesetzes ist es, die Parameter mit Hilfe von numerischen Simulationen zu identifizieren, die das Verhalten des Betonwärmespeichers maßgebend beeinflussen. Über einfache Materialversuche lassen sich die Materialparameter des Stoffgesetzes bestimmen und an unterschiedliche Betonsorten anpassen. Anwenden lässt sich das numerische Modell mit dem thermo-mechanischen Stoffgesetz zur Optimierung des Betonwärmespeicherdesigns und zur Prognose des Verhaltens bei Temperaturzyklen.

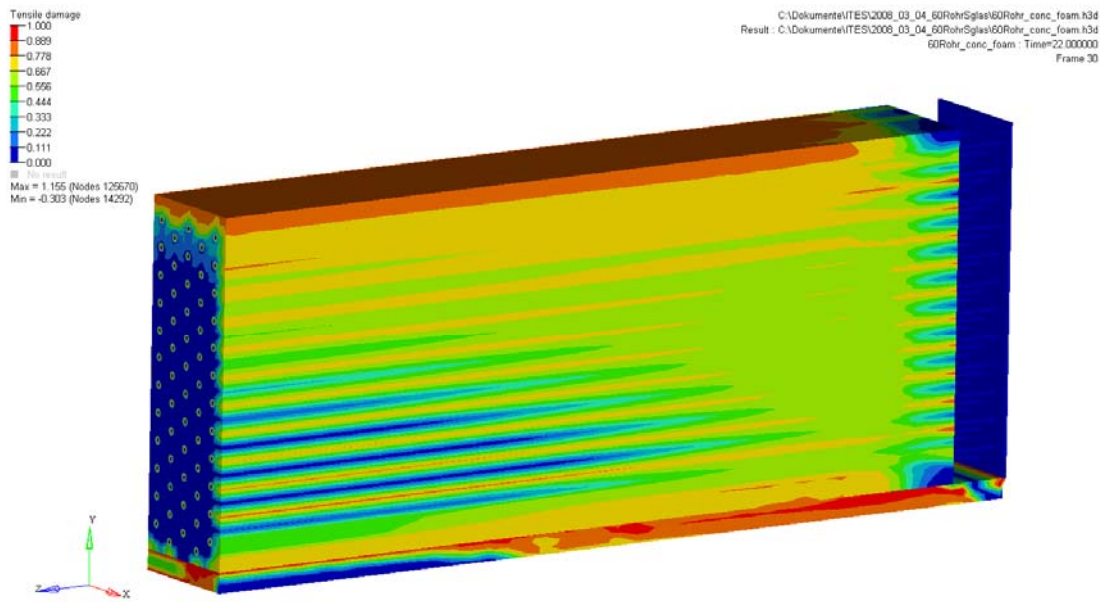


Abbildung 9 - Simulierter Zustand eines möglichen Betonwärmespeicherdesigns bei 400 °C

### 3.4. Demonstration eines Speichersystems für die solare Direktverdampfung

Angekoppelt an das Verbundvorhaben REAL-DISS wird ein Speichersystem, bestehend aus einem 700 kWh PCM-Speichermodul zur Verdampfung und einem 300 kWh Beton-Speichermodul zur Überhitzung in einem 100 bar Testloop am Kraftwerk Litoral von Endesa in Carboneras, Spanien getestet. Hierfür wird der Betonwärmespeicher an die Besonderheiten der solaren Direktverdampfung angepasst. Mit dem Bau des Testloops und der Speichermodule wurde im Herbst 2008 begonnen. Der Testbetrieb beginnt im Frühjahr 2009.