



Nachtstrom aus dem Solarkraftwerk

Latentwärmespeicher liefert Wärme für die Dampfturbinen, wenn die Sonne nicht scheint



Forscher des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt haben gemeinsam mit dem Industriepartner Linde einen Latentwärmespeicher auf Nitratsalzbasis weiterentwickelt. In Kombination mit einer Kaskade sensibler Speicher soll er die Stromproduktion solarthermischer Kraftwerke nachts und in strahlungsarmen Zeiten aufrechterhalten. Dafür entwickelten die Wissenschaftler ein Speichersystem, welches darüber hinaus auch für konventionelle Dampfkraftwerke und industrielle Prozesse genutzt werden kann.

Mit Wärmespeichern können Solarkraftwerke rund um die Uhr Strom liefern – nahezu wie ein konventionelles Kraftwerk. Sie werden besser planbar und stellen Regelkapazität für das Stromnetz bereit. Das optimierte Wärmemanagement verbessert zudem das Betriebsverhalten, vermindert den Teillastbetrieb und nutzt den Kraftwerksblock effizienter. In der Summe steigt so auch die Wirtschaftlichkeit. Besonders effizient und kostengünstig arbeitet ein solarthermisches Kraftwerk, wenn es bei möglichst hohen Temperaturen betrieben wird. Das ist mit der solaren Direktverdampfung von Wasser möglich. Dabei wird der überhitzte Wasserdampf für die Dampfturbinen schon im Kollektor erzeugt. Er erreicht bei einem Druck von 120 bar Temperaturen von über 500 °C. Dies sind nahezu Dampfparameter, wie sie in konventionellen Kraftwerken üblich sind.

„Mit Direktverdampfung in solarthermischen Kraftwerken sind höhere Effizienzgrade möglich. Allerdings wäre eine Kopplung mit einem thermischen Energiespeicher für den Abendbetrieb am sinnvollsten. Hierfür muss ein Speichersystem entwickelt und optimiert werden“, erklärt Maïke Johnson, Leiterin des Projektes DSG-Store. DSG-Store steht für „Direct Steam Generation Storage“. Die direkte Verdampfung und Überhitzung des Speisewassers im Solarfeld wird heute bereits kommerziell in Parabolrinnen-, Fresnel- und Turmkraftwerken angeboten.

Dieses Forschungsprojekt wird gefördert vom

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi)

Der Hauptnachteil sind bisher fehlende Wärmespeicher. Damit diese zuverlässig für die Direktverdampfung eingesetzt werden können, müssen verschiedene Komponenten fortentwickelt, der Systemaufbau optimiert und Betriebskonzepte erprobt werden. Innerhalb des Forschungsprojektes entwickelte das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zusammen mit Linde eine neue Generation Wärmespeichersysteme.

Das von den Forschern entwickelte System besteht aus einer Kaskade aus einem Latentwärmespeicher für die Kondensation bzw. Verdampfung und drei sensiblen Flüssigsalzspeichern für die Überhitzung. Die Forscher halten dies für die technisch und wirtschaftlich aussichtsreichste Lösung. Das Gesamtsystem soll für alle solarthermischen Kraftwerke mit Direktverdampfung einsetzbar sein, unabhängig vom verwendeten Konzentratorsystem. Es eignet sich also sowohl für Parabolrinnen, für Linear-Fresnel-Kollektoren als auch für Turmreceiver. Darüber hinaus kann das System in industriellen Dampfprozessen und konventionellen Dampfkraftwerken genutzt werden.

Speicher-kaskade für verschiedene Temperaturen

Damit die Wärmeenergie aus dem Kollektor möglichst vollständig gespeichert wird, haben die Wissenschaftler das Konzept einer mehrstufigen Speicher-kaskade entwickelt. Diese besteht aus einem „heißen“ (527 °C), einem „warmen“ (400 °C) und einem „kalten“ (306 °C) Speicher. Sie nehmen die Wärme in geschmolzenen Salzen sensibel, also durch Temperaturerhöhung, auf. Die Salzschnmelzen befinden sich in isolierten Stahltanks, deren Bauteile und Materialien auf das Temperaturniveau und die Korrosivität der Salze angepasst sind. Als vierter und letzter Speicher kommt der Latentwärmespeicher zum Einsatz.

Wenn das Solarsystem mehr Dampf liefert, als das Kraftwerk benötigt, können die Speicher geladen werden: Der überhitzte Dampf gelangt mit 550 °C in den ersten Rohrbündelwärmeübertrager. Dort heizt er Flüssigsalz auf, das aus dem warmen Speicher gepumpt und danach in den heißen Speicher geleitet wird. In gleicher Weise bringt der nun kältere Dampf im zweiten Wärmeübertrager Salzschnmelze aus dem kalten Speicher auf das Temperaturniveau des warmen Speichers. Nach diesem Schritt ist der Dampf so weit heruntergekühlt, dass nur noch die Kondensationsenergie ausgekoppelt werden kann. Da die Kondensation bei einer konstanten Temperatur stattfindet, würde ein sensibler Speicher die Energie nur mit Temperatur- und damit Exergieverlust aufnehmen können. Deshalb setzen die Wissenschaftler einen hierfür optimierten Latentwärmespeicher ein. Er arbeitet mit Salzen, deren Schmelztemperatur zu der Temperatur des Kondensationsprozesses passt. Nachts und bei bedecktem Himmel liefern die Speicher die Energie für das Dampfkraftwerk. Um den Dampf für die Turbinen zu erzeugen, werden sie in umgekehrter Reihenfolge entladen. Zunächst wärmt der Latentwärmespeicher das Speisewasser vor. Anschließend heizen die beiden Wärmeübertrager den Dampf mit Energie aus dem warmen und dem heißen Tank weiter auf. Dabei kühlen die Salzschnmelzen ab und werden jeweils in den nächstkälteren Tank gepumpt.

Wie ein Schneekristall geformt

Obwohl der überhitzte Dampf 550 °C erreicht, werden etwa 65 % der Solarenergie alleine für den Verdamp-

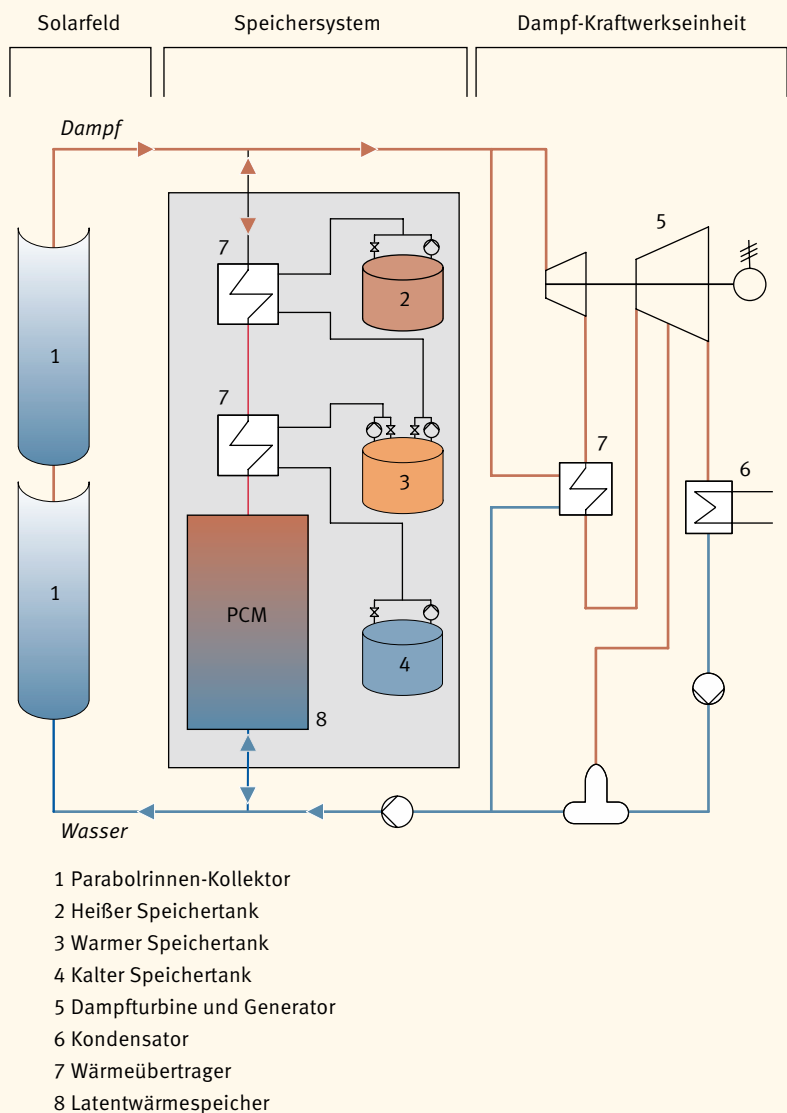


Abb. 1 Integration der Speicher-kaskade in ein Parabolrinnenkraftwerk mit Direktverdampfung.

fungsprozess aufgewendet. Entsprechend wichtig ist der Latentwärmespeicher, der diesen Energieanteil aufnimmt. Speichermedium ist Natriumnitrat, das bei 306 °C, etwa 10 Grad Kelvin, unterhalb der Kondensationstemperatur des Dampfes, schmilzt. Es befindet sich in einem wärmege-dämmten Behälter im direkten Kontakt mit Wärmeübertragerrohren, durch die der Dampf bei der Beladung strömt. Dabei kühlt der Dampf ab und kondensiert. Die latent gespeicherte Energie wird frei und das Salz schmilzt mit einer Phasenwechselenthalpie von 175 kJ/kg. Zur Entladung strömt Speisewasser durch die Übertragerrohre. Das flüssige Salz erstarrt und überträgt die Kristallisationsenergie auf das Wasser.

So einfach das Speicherprinzip ist, so schwierig erweisen sich manche Details der praktischen Umsetzung. Beispielsweise ist das Salz bei hohen Temperaturen besonders korrosiv und erfordert eine sorgfältige Materialauswahl für die verschiedenen Bauteile. Gleichzeitig sollen aber die Material- und Fertigungskosten gering bleiben. Ein spezielles Problem dieses Speichertyps ergibt sich aus der geringen Wärmeleitfähigkeit der verwendeten Salze. Wird der Speicher entladen, so erstarrt das Salz zuerst dort, wo die Wärme entzogen wird – also am Wärmetauscher. Eine zunehmend dickere Salzkruste bildet sich und behindert als Isolierschicht den Wärme-fluss immer mehr. Abhilfe schafft eine möglichst große Oberfläche des



Abb. 2 Die Abbildung zeigt den untersuchten Latentwärmespeicher im Technikumsmaßstab.

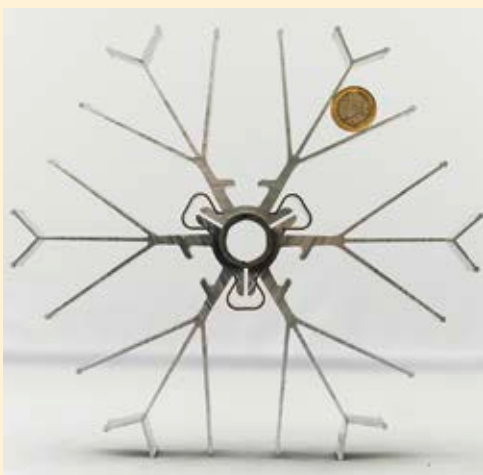


Abb. 3 Durch das axial berippte Rohr strömt Dampf bei hohem Druck durch den Latentwärmespeicher. Die Wärme wird über die Rippenstruktur auf das Salz übertragen.

Wärmetauschers durch Wärmerippen. Sie sollten thermisch gut und zuverlässig an den Wärmeübertrager angebunden sein, möglichst weite Bereiche des Speichers erfassen, jedoch das aktive Volumen nicht zu stark reduzieren.

Mit einem Versuchsspeicher im Technikumsmaßstab optimierten die Wissenschaftler sowohl den geometrischen Aufbau als auch die einzelnen Komponenten. Dabei konnten sie auf den Erkenntnissen der vorangegangenen Projekte DISTOR und ITES sowie das parallel laufende Projekt TESIN aufbauen. Im Blick der Forscher waren neben der technischen Leistungsfähigkeit des Speichermoduls stets auch ökonomische Gesichtspunkte.

In einigen bisher getesteten PCM-Modulen sorgten ringförmige Lamellen für den Wärmefluss zwischen den Wärmeübertragungsrohren und dem Salz. Die Forscher kamen zu dem Schluss, dass sich axiale Rippen aus stranggepresstem Aluminium viel günstiger herstellen lassen. Sie sollten mindestens die gleiche Leistungsfähigkeit besitzen, wie die radiale Variante. Im Verlauf der Arbeit untersuchten die Wissenschaftler mehr als 20 unterschiedliche Rippenprofile, die sie in unterschiedlichen geometrischen Anordnungen des Rohrregisters optimierten und im Labor auf ihre Praxistauglichkeit testeten. Simulationsmodelle und Versuche führten zu einem sechsarmigen Aluminiumprofil, das einem Schneekristall ähnelt. Die Struk-

Direktverdampfung statt Thermoöl

Die meisten solarthermischen Kraftwerke arbeiten mit Thermoöl, das die Wärme von den Parabolrinnenkollektoren zum Kraftwerk transportiert und dort Dampf erzeugt. Die Wärmeträgerflüssigkeit begrenzt die Betriebstemperatur, da sie sich bereits bei etwa 400 °C zersetzt. Bei einigen Kraftwerken dieses Typs werden bereits Wärmespeicher eingesetzt. So verfügen beispielsweise die Andasol-Kraftwerke in der spanischen Provinz Granada über Speichertanks mit Salzschnmelze. Sie speichern Energie für eine Betriebszeit der Kraftwerksturbinen von 8 Stunden unter der Volllast von 50 MW_{el}.

Durch die höheren Temperaturen erreicht die Direktverdampfung deutlich höhere Wirkungsgrade. Mit gleicher Spiegelfläche lässt sich also viel mehr Strom erzeugen und Wärmespeicher erreichen bei gleicher Größe höhere Kapazitäten. Auch der Systemaufbau wird einfacher: Während das Thermoöl den Dampf erst im Kraftwerk über einen Wärmeübertrager erzeugt, kann der direkt erzeugte Dampf ohne Umwege auf die Dampfturbinen des Kraftwerks geleitet werden.

Ebenfalls hohe Temperaturen erreichen „Molten Salt“-Kraftwerke. Sie nutzen Salzschnmelze, die sich auf 565 °C erhitzen lässt, als Wärmeträgerfluid. Jedoch kann die Schmelze erstarren, wenn ihre Temperatur unter etwa 240 °C fällt. Sie kann dann nur mit hohem Aufwand wieder verflüssigt werden. Deshalb werden die dünnen Receiverrohre nachts mit hohem Energieaufwand beheizt oder – nach einem neuen Konzept – entleert, wobei der Wärmeträger in gut isolierten Behältern zwischenspeichert wird.

tur setzt sich aus drei Teilen zusammen, die durch Klammern am Übertragerrohr befestigt sind. Diese Klammer-technik hatte sich in den Experimenten als die beste Rohrbefestigung erwiesen. Die gute Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse mit den Berechnungen zeigen zudem, dass das Simulationsmodell die neuen Strukturen gut abbilden kann.

Praxistest und Optimierung

„Wir wollen die Speicher für eine konstantere Entladeleistung optimieren und den Temperaturunterschied zwischen der Be- und Entladung minimieren. Damit könnte die Dampfturbine im Speicherbetrieb eine höhere Leistung erzielen und der ineffiziente Gleitdruckbetrieb würde minimiert“, erläutert Maik Johnson die weiteren Forschungsziele. Die Wissenschaftler des DLR sehen in aktiven Latentwärmespeicher-Konzepten das technologische Potenzial dafür. Bisher gibt es noch wenige Untersuchungen hierzu, sodass die Möglichkeiten noch nicht ausreichend geklärt und ausgeschöpft sind. Thermische Energiespeicher-Konzepte können einen Beitrag für flexiblere Stromnetze leisten und die schwankende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energiequellen ausgleichen. „Ein interessanter Forschungsbereich ist beispielsweise die Umwandlung von überschüssigem Strom zu Wärme und die Rückverstromung bei Bedarf“, erläutert die Forscherin.



Salz als Wärmeträger und Speicher

Hohe Temperaturen und gute Wirkungsgrade erreicht auch die „Molten-Salt“-Technologie, die geschmolzene Salze für den Wärmetransport nutzt. Innerhalb des Projektes High Performance Solar (HPS 2) untersuchen federführend Wissenschaftler des DLR die Wirtschaftlichkeit und Betriebssicherheit von Parabolrinnenkraftwerken mit flüssigem Salz.

In einem neuartigen Durchlaufdampferzeuger gibt das Salz seine Energie an einen angeschlossenen Wasser-Dampf-Kreislauf ab. Durch die erhöhten Dampfparameter Druck und Temperatur sind höhere Wirkungsgrade im Kraftwerksblock und auch überkritische Dampfzustände für kommerzielle Anwendungen möglich. Die Komponenten und das Gesamtsystem der Testanlage im portugiesischen Évora werden für das geschmolzene Salz als Wärmeträgermedium speziell an den Betrieb angepasst. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

Dampf und Abwärme nutzbar machen

Forscher des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE entwickelten einen salzbasierten Latentwärmespeicher, der mit einem Tank für die Schmelze sowie einem für das feste Salzgranulat arbeitet. Ein neuartiger Schneckenwärmeübertrager entkoppelt die Speicherkapazität von der installierten Wärmeübertragerfläche. Das System wurde bereits in das südspanische Fresnel-Kraftwerk PE1 integriert und getestet. Ziel des BMWi-Projektes „Salzbasierter Latentwärmespeicher für solare Dampferzeugung und Abwärmenutzung“ – kurz SALSA – ist, einen funktionsfähiger Speicher für direktverdampfende solarthermische Kraftwerke und industrielle Prozesse zu entwickeln.

Latentwärmespeicher für die Industrie

Im Projekt TESIN erforschen Wissenschaftler des DLR die Einsatzmöglichkeiten von Hochtemperatur-Latentwärmespeichern. Diese sollen die Energieeffizienz von industriellen Prozessen, von Kraftwerken und bei der Wärmeversorgung steigern. In einem ersten Schritt wurden die möglichen technischen und wirtschaftlichen Potenziale der Speicherintegration in Stahlwerken und Heizkraftwerken ermittelt. Ein für diesen Zweck weiterentwickelter Speicher für hohe Leistungsdichte und Überhitzung ersetzt den in der Besicherung vorgehaltenen Heizkessel. Dazu muss er für mindestens 15 Minuten den überhitzten Dampf produzieren können. Bisherige Speicher liefern nur Sattdampf und sind für längere Entladezeiten bzw. geringere Leistungen ausgelegt.

Projektbeteiligte

- » **Projektleitung:** Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) – Institut für Technische Thermodynamik, Stuttgart, Maïke Johnson, Maïke.Johnson@dlr.de, www.dlr.de/tt
- » **Industriepartner:** Linde AG, Pullach, Stefan Hübner, stefan.huebner@linde.com, www.linde.com

Links und Literatur

- » forschung-energiespeicher.info
- » Johnson, M.; Hübner, S.; Lücknerath, P. u. a.: DGS-Store. Weiterentwicklung und industrielle Umsetzung eines thermischen Speichersystems für solarthermische Kraftwerke mit Direktverdampfung. Projektabschlussbericht. FKZ 0325333A; 0325333D. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Stuttgart. Institut für Technische Thermodynamik (Hrsg.); Linde AG, Pullach (Hrsg.). Aug. 2016. 131 S. doi: 10.2314/GBV:871999897

Mehr vom BINE Informationsdienst

- » Solarthermische Kraftwerke. BINE-Themeninfo I/2013
- » Die Sonnenseiten des Sattdampfes. BINE-Projektinfo 11/2011
- » Dieses Projektinfo gibt es auch online und in englischer Sprache unter www.bine.info/Projektinfo_11_2017

BINE Informationsdienst berichtet aus Projekten der Energieforschung in seinen Broschürenreihen und dem Newsletter. Diese erhalten Sie im kostenlosen Abonnement unter www.bine.info/abo

Impressum

Projektorganisation
Bundesministerium
für Wirtschaft und Energie (BMWi)
11019 Berlin

Projektträger Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH
Dr. Hermann Bastek
52425 Jülich

Förderkennzeichen
0325333A,D

ISSN
0937-8367

Herausgeber

FIZ Karlsruhe · Leibniz-Institut
für Informationsinfrastruktur GmbH
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Autoren

Anna Riesenweber
Dr. Franz Meyer

Urheberrecht

Titelbild und alle weiteren Abbildungen:
DLR

Eine Verwendung von Text und
Abbildungen aus dieser Publikation ist
nur mit Zustimmung der BINE-Redaktion
gestattet. Sprechen Sie uns an.

Kontakt · Info

Fragen zu diesem Projektinfo?
Wir helfen Ihnen weiter:

0228 92379-44
kontakt@bine.info

BINE Informationsdienst

Energieforschung für die Praxis
Ein Service von FIZ Karlsruhe

Kaiserstraße 185–197
53113 Bonn
www.bine.info

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages