

# Herausforderung Wärmespeicher

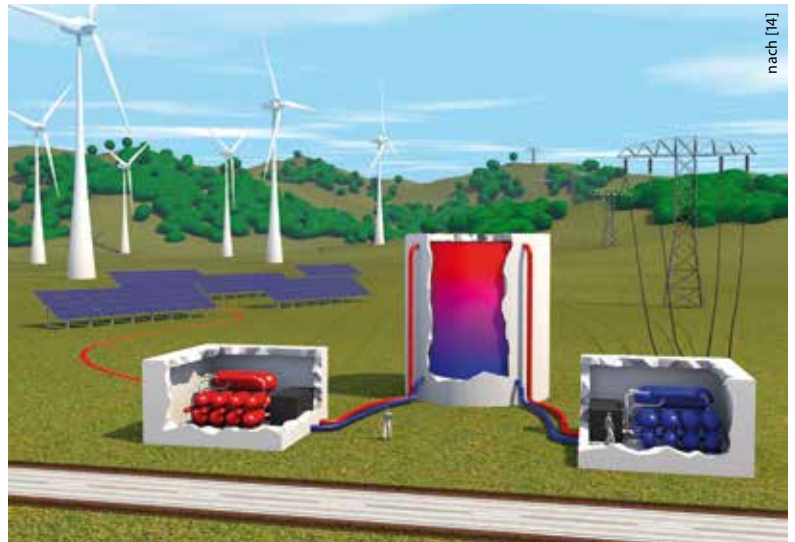
Thermische Speicher sind die Mauerblümchen der Energieforschung, in ihnen stecken aber viele offene physikalische Fragen.

André Thess, Franz Trieb, Antje Wörner und Stefan Zunft

Thermische Energiespeicher – im Volksmund „Wärmespeicher“ – erwecken bei den meisten Menschen die Vorstellung von Nachtspeicheröfen, Thermosflaschen, Handwärmern oder Omas Bügeleisen mit feuerbeheiztem Eisenkern. Keines dieser Beispiele spiegelt allerdings die aktuelle Forschung angemessen wider, denn hinsichtlich physikalischer Komplexität und praktischer Bedeutung stehen Wärmespeicher den uns allgegenwärtigen Batterien keineswegs nach.

Ein Wärmespeicher im engeren Sinne des Wortes ist ein geschlossenes thermodynamisches System, dessen Gleichgewichtszustand  $X = (U_1 \dots U_N, V_1 \dots V_M)$  nur durch Ändern der Energiekoordinaten  $U_i$ , jedoch nicht durch Ändern der Arbeitskoordinaten  $V_i$  verändert wird [1]. Nach dieser zugegebenermaßen abstrakten Definition besteht der einfachste Wärmespeicher aus einem System mit konstantem Volumen  $V$  (Arbeitskoordinate), dessen einzige relevante Zustandsfunktion die Innere Energie  $U$  (Energiekoordinate) als Funktion der Temperatur oder der Entropie ist. Im Gegensatz dazu verkörpert ein adiabatisch komprimiertes Gasvolumen keinen Wärmespeicher im Sinne dieser Definition, weil seine innere Energie  $U$  durch Manipulation an der Arbeitskoordinate  $V$  erhöht worden ist. Im weiteren Sinne des Wortes gehören zu einem Wärmespeicher auch z. B. elektrische Heizwendel beim Nachtspeicherofen („Beladeeinrichtungen“) oder ein Dampfkraftprozess bei einem Solarkraftwerk („Entladeeinrichtungen“). Charakterisieren lässt sich ein Wärmespeicher über die Speichertemperatur  $T_H$ , die Energiespeicherdichte  $q$  in Wh/kg, den Speicherwirkungsgrad in Prozent, die maximale Zyklenzahl und die spezifischen Investitionskosten in Euro/Wh.

Der Vergleich mit anderen Speichertechnologien wie Batterien, Supercaps oder Schwungrädern zeigt schnell, dass sich Wärmespeicher nicht durch eine besonders hohe Energiespeicherdichte auszeichnen. Ihre drei wichtigsten Vorzüge sind vielmehr ihr niedriger Preis sowie die Tatsachen, dass sie ihre Eigenschaften auch über viele Zyklen behalten (hohe Zyklenfestigkeit) und dass Wärmespeichermaterialien (Infokasten) im Unterschied zu Lithium, Platin oder Kupfer nicht importiert werden müssen und in großen Mengen zur Verfügung stehen (Ressourcengenügsamkeit). Diese Vorteile gelten gleichermaßen für die drei nachfolgend



Elektrischer Strom aus erneuerbaren Quellen könnte sich effizient speichern lassen in sog. isentropen Strom-Wärme-Strom-Speichern. Dazu wird der Strom mit einer Wärmepumpe (links) in Wärme

umgewandelt. Diese wird gespeichert (Mitte) und bei Bedarf mit einer Wärmekraftmaschine (rechts) wieder in Strom umgewandelt.

beschriebenen Typen von Wärmespeichern und geben den Ausschlag für ihr großes Anwendungspotenzial.

## Sensible Wärmespeicher

Ein Kilogramm flüssiges Wasser kann eine Wärmemenge von 418 000 Joule (116 Wh) speichern, wenn es vom Gefrierpunkt bis zum Siedepunkt erwärmt wird. Solange kein Phasenübergang stattfindet, führt die Energiezufuhr zu einer höheren Temperatur. Man

Alle Artikel der Serie zur Energiewende sind gemeinsam mit weiteren passenden Beiträgen in einem Online-Dossier unter [www.pro-physik.de/physik/physik/dossier.html](http://www.pro-physik.de/physik/physik/dossier.html) zu finden.

### KOMPAKT

- Sensible Wärmespeicher beruhen darauf, ein Medium wie Wasser oder Gestein zu erwärmen. Nutzt man einen Phasenübergang aus, handelt es sich um einen Latentwärmespeicher. Thermochemische Speicher basieren auf chemischen Reaktionen.
- Wärmespeicher erlauben es, erneuerbare Energie zwischenspeichern und damit bedarfsgerecht zu regeln.
- Eine besondere Rolle könnten in Zukunft isentrope Speicher spielen, die im Idealfall eine Speicherwirkungsgrad von 100 Prozent besitzen. Solche Speicher könnten sich als Druckluftspeicher oder mithilfe von Wärmekraftmaschinen als Strom-Wärme-Strom-Speicher realisieren lassen.

Prof. Dr. André Thess, Dr. Franz Trieb, Dr. Antje Wörner und Dr. Stefan Zunft, Institut für Technische Thermodynamik, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Pfaffenwaldring 38–40, 70569 Stuttgart

spricht deshalb im Alltag von „fühlbarer“ und in der Wissenschaft von „sensibler“ Wärme.

Die beiden am weitesten verbreiteten sensiblen Wärmespeicher sind Warmwasserspeicher zur Energieversorgung von Gebäuden und Winderhitzer („Cowper“) für die Luftvorwärmung an Hochöfen. Das Speichermedium ist flüssiges Wasser bzw. feuerfestes Gestein und scheint keinen Nährboden für interessante Forschung zu bieten. Bei Warmwasserspeichern für Einfamilienhäuser ist das auch der Fall. Doch bei Speichern mit Volumina über 100 m<sup>3</sup> wie dem 27 000 m<sup>3</sup> fassenden Speicher am Heizkraftwerk Nord in Salzburg (Speicherkapazität 1,1 GWh, spezifische Investitionskosten 15 Euro/kWh) oder künftigen unterirdischen Warmwasserspeichern liegen die Dinge anders. Systeme dieser Größe könnten im Zuge der Elektrifizierung der Wärmeversorgung eine wichtige Rolle spielen, um überschüssige erneuerbare Energie zu nutzen. Wenn der Anteil fluktuierender Elektroenergie in Zukunft wächst, kann es ökonomisch sinnvoll sein, überschüssigen Strom in Wärme zu verwandeln. Bei großen Warmwasserspeichern ist es aus Kostengründen vorteilhaft, sie wie im genannten Beispiel als Schichtenspeicher mit nur einem Behälter auszulegen, anstatt mit zwei Behältern für kaltes bzw. heißes Wasser. Sollen dann die Speicherwirkungsgrade auf deutlich über 90 Prozent bei noch geringeren Investitionskosten als heute steigen, so führt kein Weg an einem kniffligen Turbulenzproblem vorbei.

In einem idealen Schichtenspeicher ist das Wasser stabil geschichtet, und der Speicherwirkungsgrad wird vom Verhältnis der gewünschten Speicherzeit  $\tau$

zur thermischen Diffusionszeit  $L^2/\kappa$  für den Wärmeausgleich bestimmt. Dabei ist  $L$  die Speicherhöhe und  $\kappa \approx 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$  die thermische Diffusivität von Wasser. In einem idealen zehn Meter hohen Speicher ( $L^2/\kappa = 10^9 \text{ s} \approx 30 \text{ Jahre}$ ) wäre eine saisonale Wärmespeicherung ( $\tau \approx 10^7 \text{ s}$ ) scheinbar kein Problem. Doch turbulente Durchmischung beim Be- und Entladen sowie turbulente Konvektionsströmungen an der Behälterwand und an Einbauten zerstören die stabile Schichtung. Dadurch kann sich schon bei Speicherzeiten von Tagen ( $\tau \approx 10^5 \text{ s}$ ) der Speicherwirkungsgrad erheblich verringern. Die Details der dabei ablaufenden turbulenten Wärmetransportprozesse sind bislang kaum verstanden.

Ozeanographen und Meteorologen befassen sich zwar umfassend mit Mischungsprozessen in geschichteten Strömungen. Gleichwohl unterscheiden sich die strömungsmechanische Kennzahl (Rayleigh-Zahl) und die thermischen Randbedingungen zwischen Ozean und Energiespeicher erheblich. Hier könnte eine interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Geowissenschaftlern und Energieforschern dazu beitragen, die grundlegenden Prozesse zu verstehen. Im Übrigen existieren z. B. im spanischen Solarkraftwerk Andasol bereits heute große Flüssigsalzspeicher, und Schichtenspeicher auf der Basis von Flüssigsalz werden erforscht [2]. Für kleinere Volumina könnten sogar Flüssigmetalle als Speichermedien infrage kommen.

Auch das periodische Erwärmen und Abkühlen eines „Steinhaufens“ in einem Winderhitzer scheint zunächst wenig spannende Physik zu enthalten. Doch auch hier trügt der Schein. Hochtemperaturspeicher aus Natursteinen oder Keramik, sog. Regeneratorspei-

ZAHLENBEISPIELE ZUM WÄRMESPEICHERVERMÖGEN

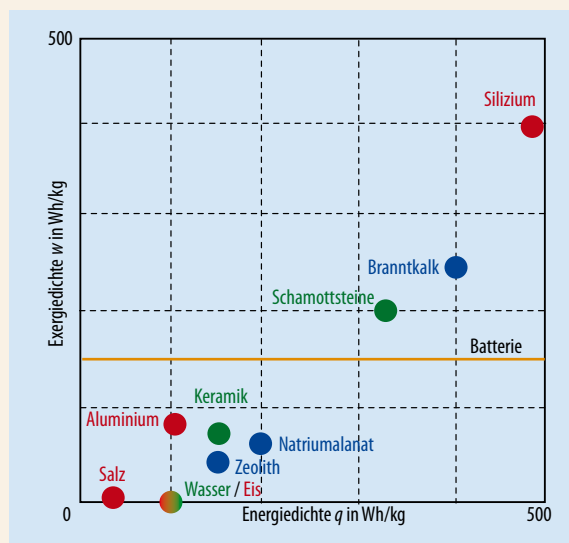
Beim Verbrennen von einem Liter Benzin werden 31 Megajoule (8,61 Kilowattstunden) Wärme frei. Damit kann man

- 93 kg Wasser von Raumtemperatur auf Siedetemperatur erwärmen,
- 55 kg Keramik in einem Nachtspeicherofen von Raumtemperatur auf 650°C erhitzen,
- 26 kg Schamottsteine in einem Winderhitzer von Raumtemperatur auf 1200°C erhitzen,
- 93 kg Eis bei 0°C schmelzen,
- 287 kg Solarsalz bei 222°C schmelzen,
- 78 kg Aluminium bei 660°C schmelzen,
- 18 kg Silizium bei 1410°C schmelzen,
- 54 kg wasserhaltiges Zeolith bei 150°C in 45 kg trockenes Zeolith und 9 kg Wasserdampf umwandeln,
- 43 kg Natriumalanat (NaAlH<sub>4</sub>) bei 160°C aufspalten und dabei 1,5 kg Wasserstoff freisetzen,
- 22 kg Branntkalk bei 505°C in 17 kg Löschkalk und 5 kg Wasserdampf verwandeln.

Die Abb. zeigt die **Energiespeicherdichten**  $q$  sowie die **Exergiespeicherdichten**  $w$  für diese sensiblen (grün), latenten (rot) bzw. thermochemischen Speichermedien (blau). Die Größe  $q$  beschreibt das spezifische Wärmespeichervermögen des Materials, die Größe  $w$  den maximal in mechanische (oder elektrische) Energie umwandelbaren Anteil der Wärme. Daher kann  $q$  als effektive elektrische Energiespeicherdichte eines Wärmespeichers interpretiert werden.

Für sensible Wärmespeicher ergibt sich die Exergiedichte aus  $w = q(\theta - 1 - \ln\theta)/(\theta - 1)$  wobei  $\theta = T_w/T_c$  das Verhältnis

von Maximaltemperatur des Speichermediums zur Außentemperatur ( $T_c = 20^\circ\text{C}$ ) ist [19]. Für latente und thermochemische Wärmespeicher gilt für die Exergie  $w = q\eta$  mit dem Carnotschen Wirkungsgrad  $\eta = 1 - \theta^{-1}$ . Beim Eisspeicher gilt  $T_c = 0^\circ\text{C}$ ,  $T_w = 20^\circ\text{C}$ . Die zum Vergleich eingetragene orangefarbene Linie bei  $w = 150 \text{ Wh/kg}$  zeigt einen Richtwert für die Energiespeicherdichte von Batterien.



Energie- und Exergiespeicherdichten verschiedener Materialien.

cher, spielen in der Metallurgie, der Zementherstellung oder anderen Hochtemperaturprozessen eine wachsende Rolle, um eine höhere Energieeffizienz zu erreichen [3]. Bei der Flexibilisierung von Gas- und Dampfkraftwerken (GuD) kommen Regeneratorspeicher schon heute zum Einsatz [4]. Physikalisch anspruchsvoll ist es dabei, eine hohe thermische Zyklenfestigkeit sicherzustellen.

Beim Erwärmen und Abkühlen entstehen in dem granularen Medium aufgrund der inhomogenen Temperatur mechanische Spannungen. Dadurch können sich Risse bilden, sodass die Steine zu Sand zerfallen. Dann lässt sich der Speicher nicht mehr nutzen, weil Wärmeübertragung und Strömungswiderstand nicht dem Auslegungsfall entsprechen. Überdies üben die sich ausdehnenden oder schrumpfenden Granulate auf die Speicherwand starke Druckkräfte aus und können diese im Extremfall schädigen oder gar zerstören [5]. Das Verständnis dieser Erscheinungen ist heute noch rudimentär. Ähnliche Phänomene treten auch bei der Entstehung des Regoliths auf Kometenoberflächen auf. Lange Zeit war es nicht zufriedenstellend möglich, die Größenverteilung von Oberflächengestein auf Kometen auf rein mechanischem Wege zu erklären. Erst vor kurzem ist es durch die Einbeziehung periodischer thermomechanischer Spannungen gelungen, den komplexen Zerbröselungsprozess zu verstehen [6].

Weitere Beispiele für die Anwendung von sensiblen Wärmespeichern sind Grundwasserleiter (Aquiferspeicher), Flüssigsalz- und Flüssigmetallreceiver bei Solarturmkraftwerken oder Regeneratormaterialien in Stirling-Motoren. Doch haben wir uns hier auf die Beispiele konzentriert, bei denen physikalischer Forschungsbedarf besonders deutlich wird.

## Latentwärmespeicher

Die eingangs erwähnte Wärmemenge von 418 000 Joule lässt sich alternativ auch speichern, indem man 1,25 kg Eis zum Schmelzen oder 0,185 kg Wasser zum Verdampfen bringt (siehe Infokasten für weitere Beispiele). Da die Energiezufuhr bei Schmelz- oder Verdampfungsprozessen nicht mit einer höheren Temperatur einhergeht, spricht man von latenter Wärme. Wärmespeicher, die den Phasenübergang fest/flüssig oder flüssig/gasförmig ausnutzen, heißen demgemäß Latentwärmespeicher.

Im Alltag begegnen uns Latentwärmespeicher neben dem bekannten Taschenwärmer (Schmelztemperatur 58 °C) beispielsweise in Gestalt von Gipskartonplatten mit paraffingefüllten Mikrowärmespeicherkapseln (Schmelztemperatur 25 °C) unter dem Handelsnamen Mikronal. Solche Baumaterialien besitzen eine hohe thermische Trägheit und können unter günstigen Umständen Klimaanlage ersetzen.<sup>1)</sup>

In der Energietechnik werden Latentwärmespeicher auf der Basis von Salzen zurzeit auf ihre Eignung für solarthermische Kraftwerke untersucht (Abb. 1). Systeme für die Nutzung von Hochtemperaturprozesswär-



Abb. 1 Mit den 14 Tonnen Natriumnitratsalz dieses weltgrößten Latentwärmespeichers lassen sich 700 kWh thermischer Energie bei 300°C speichern. Der Speicher wurde in ein Dampfkraftwerk im spanischen Carboneras integriert und absolvierte dort erfolgreich hundert Zyklen. Solche Konzepte eignen sich besonders für solarthermische Kraftwerke mit Direktverdampfung.

me befinden sich in der Entwicklung. Latentwärmespeicher besitzen gegenüber sensiblen Speichern den Vorteil, Wärme stets bei einer wohldefinierten Temperatur abzugeben.

Nachteilig ist die Tatsache, dass die Wärmeübertragung zwischen dem erstarrenden Speichermedium und der Wand, über die der Wärmestrom aus dem Speicher abfließt, zeitabhängig ist und der Wärmestrom beim Entladeprozess immer schwächer wird. Da das erstarrte Speichermedium die Wärme in der Regel schlechter leitet als das flüssige, wächst der Wärmeleitwiderstand zwischen der Erstarrungsfront und der Wand mit der Entladezeit an. Eine der wichtigen Herausforderungen für die Forschung besteht deshalb darin, die Grenzfläche zwischen Speichermedium und Wandmaterial mit verästelten Wärmeübertragungsstrukturen zu versehen, die einen möglichst zeitunabhängigen Wärmestrom gewährleisten.

Schwierig ist es zudem, die Speicherkapazität und den Wärmestrom zu entkoppeln. Bei einem sensiblen flüssigen Wärmespeichermedium wie etwa dem Flüssigsalz beim Solarkraftwerk Andasol 3 ist es durch Verdopplung der Materialmenge von 30 000 auf 60 000 Tonnen problemlos möglich, die Speicherkapazität bei unveränderten Wärmeübertragern, also bei konstantem Wärmestrom, zu verdoppeln. Bei latenten Wärmespeichern ist eine solche Entkopplung hingegen wegen des Phasenübergangs nicht ohne Weiteres möglich. Die Entwicklung frei skalierbarer Latentwärmespeicher ist deshalb Gegenstand aktueller Forschung.

Weitere Herausforderungen insbesondere bei höheren Temperaturen sind die Erosion von Wandmate-

1) vgl. Physik Journal Oktober 2011, S. 42



rialien sowie das detaillierte Verständnis und die Simulation des zyklischen Schmelzens und Erstarrens des Speichermediums. Hier könnten sich Synergien mit der numerischen Simulation metallurgischer Prozesse entwickeln.

### Thermochemische Speicher

Erwärmt man Löschkalk ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) auf Temperaturen von etwa  $550\text{ }^\circ\text{C}$ , so wandelt er sich in Wasserdampf und Branntkalk ( $\text{CaO}$ ). Umgekehrt entsteht bei Vermischung von Branntkalk mit Wasserdampf Wärme. Die umkehrbare chemische Reaktion  $\text{CaO} + \text{H}_2\text{O} \leftrightarrow \text{Ca}(\text{OH})_2$  eignet sich somit zur Wärmespeicherung. Speicherkonzepte, die auf dieser oder anderen chemischen Reaktionen wie etwa Zeolith-Wasser [7] oder Metallhydrid-Wasserstoff [8] beruhen, bezeichnet man als thermochemische Speicher (Infokasten).

Thermochemische Speicher besitzen gegenüber sensiblen und latenten Wärmespeichern den Vorteil, dass die Wärme in chemischer Form gebunden ist und sich deshalb unbegrenzt lange speichern lässt. Von allen Wärmespeichern sind sie jedoch bislang am wenigsten entwickelt. Intensive Forschungsarbeiten haben zum Ziel, neue Reaktionssysteme zu identifizieren, die gekoppelten Vorgänge aus Wärmetransport und Stofftransport in reagierenden Speicherbetten (die meistens aus einer Schüttung bestehen) zu beherrschen, die thermophysikalischen, chemischen und reaktionstechnischen Eigenschaften im Einzelpartikel und in der Schüttung zu bestimmen. Außerdem gilt es, auf die jeweilige Anwendung hin angepasste Speicherreaktor-konzepte sowie die stoffliche und thermische Integration thermochemischer Systeme in Kraftwerke, industrielle Prozesse oder Fahrzeugklimaanlagen zu entwickeln. Dass es trotz der vielen offenen Fragen bereits erfolgreiche Anwendungen thermochemischer Speicher gibt, zeigen Beispiele wie das selbstkühlende Bierfass<sup>2)</sup>, der selbsterhitzende Kaffeebecher sowie der Geschirrspüler (Abb. 2).

Nachdem wir die physikalischen Grundlagen der Wärmespeicherung erläutert haben, wollen wir nun zwei komplexe Energiesysteme diskutieren: Systeme zur Erzeugung regelbarer erneuerbarer Energie und isentrope Energiespeicher zur Speicherung elektrischer Energie im Gigawattstundenmaßstab.

### Regelbare erneuerbare Energie

Bei der Diskussion über erneuerbare Energie entsteht oft der Eindruck, als ließen sich diese Energiequellen nicht bedarfsgerecht regeln. Diese Aussage gilt für Windenergie und Photovoltaik, doch für die bereits erwähnten solarthermischen Kraftwerke gekoppelt mit Wärmespeichern trifft sie nicht zu. Bei CSP-Kraftwerken (*Concentrated Solar Power*) wird ein Fluid wie Thermoöl in Parabolrinnen durch konzentrierte Sonnenenergie erwärmt und in einem nachgeschalteten Dampfkraftprozess elektrische Energie erzeugt. Dass die Energie zunächst als Wärme anfällt, scheint ein Nachteil gegenüber Windenergie und Photovoltaik zu sein. Doch Wärme lässt sich wesentlich billiger speichern als Strom. So wird schon heute solar erzeugte Wärme in Parabolrinnenkraftwerken preiswert gespeichert, indem flüssiges Solarsalz [2] von ca.  $200\text{ }^\circ\text{C}$  auf  $400\text{ }^\circ\text{C}$  erwärmt und in mehrere zehntausend Kubikmeter großen Speichern aufbewahrt wird. Da sich bei fehlendem Sonnenschein aus der gespeicherten Wärme elektrische Energie erzeugen lässt, handelt es sich bei diesem Kraftwerksprinzip um eine regelbare erneuerbare Energiequelle. CSP erlaubt es, elektrische Energie ebenso bedarfsgerecht und grundlastfähig bereitzustellen wie ein Kohle- oder Kernkraftwerk. Das gilt sogar, wenn keine Sonne scheint und der thermische Speicher leer ist, indem für kurze Zeit Dampf für die Turbine mit konventionellem Brennstoff erzeugt wird (Hybridbetrieb mit fossilen Brennstoffen oder Biomasse).

In Deutschland ist die Sonneneinstrahlung zu gering, um CSP wirtschaftlich zu betreiben. Auch in sonnenreichen Regionen wie Südeuropa, Nordafrika, Nevada, Ostchina oder Südafrika ist CSP-Strom derzeit teurer als Strom aus konventionellen Kraftwerken. Doch stimmen Fachleute weitgehend darin überein, dass steigende Preise für fossile Energieträger und fallende Preise für CSP diese regelbare Energieform in Zukunft wettbewerbsfähig machen werden.

CSP-Kraftwerke bilden auch die Basis des Desertec-Konzepts zur Übertragung regelbarer erneuerbarer Energie von Nordafrika nach Europa über Hochspannungstrassen [10–12]. Dabei handelt es sich bei Desertec nicht um ein Konzept „aus einem Guss“, sondern um eine Vielzahl von Varianten (Abb. 3). Jede ist Resultat einer numerischen Simulation mit unterschiedlichen Voraussetzungen für Verteilung von Produzenten und Konsumenten. Unter Energiesystemanalytikern herrscht heute noch keine Einigkeit über die optimale Konfiguration von Kraftwerken und Trassen.

Desertec wurde in der Öffentlichkeit aggressiv beworben und zuweilen sogar mit dem Apollo-Pro-

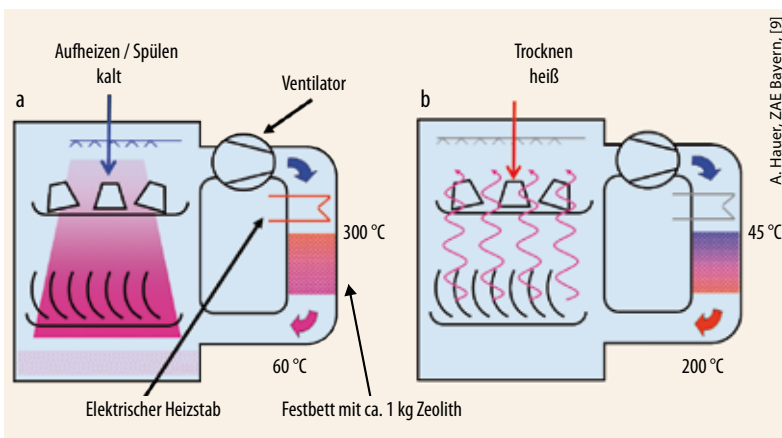


Abb. 2 Neuartige Geschirrspüler setzen Zeolith zur Wärmespeicherung und Trocknung ein. Beim Aufheizen (a) wird Wasser aus einem Zeolith-Festbett ausgetrieben, beim Trocknen (b) wird feuch-

te Luft im Zeolith entfeuchtet und gleichzeitig erwärmt. Der Prozess ermöglicht einen energieeffizienteren Betrieb als bei konventionellen Geschirrspülern.

gramm verglichen. Mit der Schließung der Münchner Zentrale der Betreibergesellschaft Dii GmbH im Oktober 2014 entstand umgekehrt der Eindruck, Desertec sei gescheitert. Es sei aber betont, dass sich die Fachwelt – einschließlich der Autoren dieses Artikels – weitgehend darüber einig ist, dass die oben beschriebene technische Basis machbar und möglicherweise auch ökonomisch tragfähig ist. Allerdings sollte die Wissenschaft aus Desertec die Lehre ziehen, Technologieprojekte ideologiefrei voranzutreiben und Revolutionen nicht vorher anzukündigen.

### Isentrope Energiespeicher

In Zukunft könnten isentrope Energiespeicher eine wichtige Rolle spielen, um elektrische Energie in der Größenordnung einiger Gigawattstunden zu speichern. Diese thermischen Energiespeicher sind mit einer Be- und Entladeeinrichtung versehen und besitzen im Idealfall einen Speicherwirkungsgrad von 100 Prozent. Ein Druckluft-Speicherkraftwerk illustriert dies am besten.

In herkömmlichen Druckluftspeichern wie in Huntorf (Niedersachsen) und McIntosh (Alabama, USA) wird Luft mittels überschüssiger elektrischer Energie auf einen Druck von rund 60 bar komprimiert, abgekühlt und in einer unterirdischen druckfesten Kaverne gespeichert. Bei Bedarf wird die komprimierte Luft mit fossiler Heizung über eine Turbine entspannt und dabei elektrische Energie ins Netz zurückgespeist. Eine elementare Rechnung mit der Formel für die Entropie eines idealen Gases zeigt, dass bei einer adiabatischen Kompression Entropie entsteht, wenn die Kompressionswärme an die Umgebung abgeführt wird. Gleiches gilt bei einer adiabatischen Expansion (verbunden mit einer Abkühlung) und einer anschließenden Auf-

nahme von Wärme aus der Umgebung. Diese beiden entropieproduzierenden Prozesse sind dafür verantwortlich, dass der Wirkungsgrad herkömmlicher Druckluftspeicher auf etwa 50 Prozent beschränkt ist.

Könnte man die Luft hingegen unendlich langsam und isotherm komprimieren, würde die Entropie des thermodynamischen Systems aus komprimierter Luft und Umgebungsluft konstant bleiben. Die Zustandsänderung wäre mithin reversibel, und elektrische Energie ließe sich verlustfrei in Form von Druck und Umgebungswärme speichern. Dies wäre ein isentroper Energiespeicher. In der Praxis ist das nicht möglich. Deshalb besteht die technische Realisierung als sog. adiabatischer Druckluftspeicher darin, die beim Komprimieren erzeugte Wärme zu speichern, um sie bei der Expansion wieder verwenden zu können. In dem laufenden Projekt ADELE (Adiabatische Druckluftspeicherung von Elektrizität) wird dieses Konzept im Detail erarbeitet (Abb. 4). Eine der zentralen Herausforderungen besteht darin, einen Wärmespeicher zu entwickeln, der preiswert und druckstabil ist. Der Bau eines Demonstrators ist geplant.

Ein zweites Beispiel für isentrope Energiespeicher sind Strom-Wärme-Strom-Speicher (SWS). Auf den ersten Blick scheinen solche Systeme einen inakzeptabel niedrigen Wirkungsgrad zu besitzen. Zwar lässt sich elektrische Energie vollständig in Wärme umwandeln. Die Rückverwandlung in Strom ist jedoch durch den Carnotschen Wirkungsgrad  $\eta = (T_H - T_C)/T_H$  begrenzt, mit der Speichertemperatur  $T_H$  und der Umgebungstemperatur  $T_C$  (in Kelvin). Würde man beispielsweise Wasser mit überschüssigem Strom von 20 °C auf 100 °C aufheizen und die Wärme anschließend mit einer Carnot-Maschine verstromen, ergäbe sich ein idealer Speicherwirkungsgrad von ca. 27 Prozent. Davon ist in der Praxis bestenfalls die Hälfte technisch machbar. Lässt sich dieses Carnot-Dilemma umgehen?

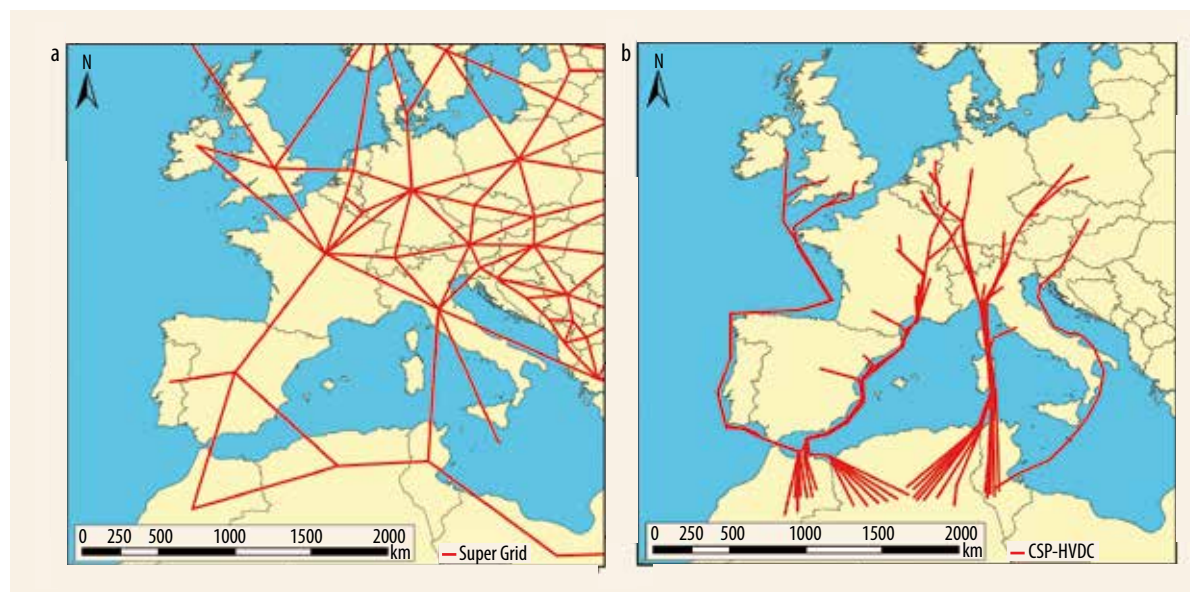


Abb. 3 Zum Import elektrischer Energie aus Solarkraftwerken in Nordafrika nach Europa mittels Hochspannungs-Gleichstromübertragung gibt es verschiedene

Konzepte: Das „Supergrid“ (a) ist gekennzeichnet durch ein flächendeckendes europäisches Netz („Kupferplatte“), das „Trans-CSP-Konzept“ (b) [10–12] durch

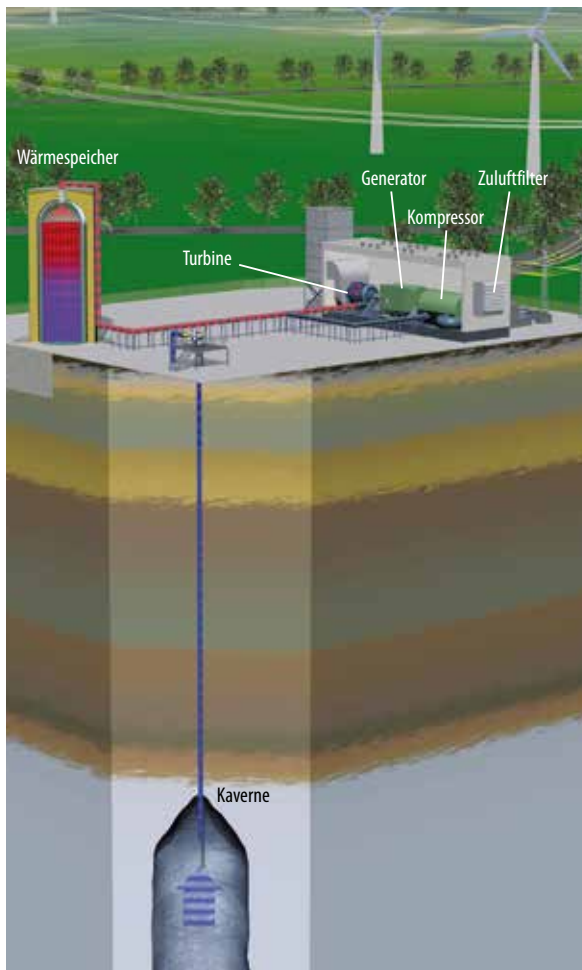
Punkt-zu-Punkt-Verbindungen. Beide Infrastrukturen sind zusätzlich zum konventionellen europäischen Netzverbund gedacht (nicht dargestellt).

Interessanterweise ist in der Fachwelt nahezu unbekannt, dass es auch isentrope SWS-Energiespeicher gibt [13]. Wandelt man die elektrische Energie  $W$  nicht mittels elektrischer Heizung, sondern mittels einer Carnotschen Wärmepumpe mit dem Leistungsfaktor  $\beta = T_H/(T_H - T_C)$  in Wärme um, so lässt sich eine größere Wärmemenge, nämlich  $Q = \beta W = (T_H/(T_H - T_C))W$ , in den Wärmespeicher einspeisen. Wird diese gespeicherte Wärme bei Bedarf mittels einer Carnotschen Wärmekraftmaschine wieder in Arbeit  $W'$  zurückverwandelt, so ergibt sich für die wiedergewinnbare Energie  $W' = \eta Q = \beta\eta W$ , wobei  $\eta$  der oben definierte Carnotsche Wirkungsgrad ist. Da das Produkt aus Carnotschem Leistungsfaktor  $\beta$  und Carnotschem Wirkungsgrad  $\eta$  gleich eins ist, folgt daraus  $W' = W$ ! Ein durch Kombination aus Carnotscher Wärmepumpe und Carnotschem Wärmekraftprozess bestehender SWS-Speicher verkörpert also einen isentropen Energiespeicher. Diese einfache thermodynamische Überlegung zeigt im Übrigen auch, dass die landläufige Aussage, derzufolge elektrische Energie „die Energieform mit dem höchsten Wert“ sei, nicht korrekt ist.

In der kraftwerkstechnischen Praxis gibt es weder Carnotsche Wärmepumpen noch Carnotsche Wärmekraftmaschinen. Wie groß ist der Wirkungsgrad eines

realen SWS-Speichers? Diese Frage ist bis heute noch nicht umfassend beantwortet. Die endoreversible Thermodynamik zeigt jedoch für ein einfaches thermodynamisches Modell, dass der reale Wirkungsgrad von SWS-Speichern eine monoton mit der Speichertemperatur ansteigende Funktion ist [14]. Ihr Wert beginnt bei 35 Prozent für Temperaturen in der Nähe der Umgebungstemperatur ( $T_C = 20^\circ\text{C}$ ), liegt oberhalb von  $T_H = 400^\circ\text{C}$  bei über 50 Prozent und nähert sich für  $T_H \rightarrow \infty$  asymptotisch dem Wert 100 Prozent an. Derzeit wird an mehreren Konzepten für SWS-Energiespeicher geforscht. Die Firma Isentropic Inc. aus Cambridge (UK) untersucht Feststoffwärmespeicher, die an eine Kolbenmaschine angekoppelt sind [15]. Eine französisch-belgische Arbeitsgruppe forscht an einem ähnlichen Prozess mit Gasturbinen. Noch existieren jedoch keine umfassenden experimentellen Validierungsdaten.

Abschließend sei bemerkt, dass nach heutigem Wissen SWS-Speicher einen etwas geringeren Wirkungsgrad als adiabatische Druckluftspeicher bei gleicher Wärmespeichertemperatur haben. SWS-Speicher erfordern jedoch keine unterirdischen Kavernen und sind somit vom Standort unabhängig. Belastbare Daten über die Speicherwirkungsgrade beider Technologien werden jedoch erst nach der Realisierung von Demonstrationsanlagen vorliegen.



**Abb. 4** Der adiabatische Druckluftspeicher ADELE soll aus einer unterirdischen druckfesten Speicherkaverne (Speicherdruck 50 bis 70 bar) und einem oberirdischen Hochtemperatur-Wärmespeicher (max. Temperatur  $600^\circ\text{C}$ ) bestehen.

## Energie für Raumfahrtvisionen

Zur Versorgung einer kleinen besiedelten Mondbasis mit elektrischer Energie sind etwa 40 kW nötig. Nach aktuellen Plänen der NASA lässt sich diese Aufgabe durch Kopplung eines kleinen Kernreaktors zur Wärmeerzeugung mit einem Stirling-Motor zur Umwandlung der Wärme in mechanische Arbeit lösen [16]. Alternativ kämen auch Photovoltaikmodule infrage. Doch bedürfte es zur Überbrückung der Mondnacht zusätzlich eines Speichers für etwa 15 MWh. Es ist schwer vorstellbar, hierfür ein 100 Tonnen schweres Batteriesystem von der Erde anzuliefern.

Sensible oder thermochemische Wärmespeicher lassen sich hingegen mit Steinen beziehungsweise  $\text{CaO}$  realisieren. Beides ist auf dem Mond reichlich vorhanden. So gibt es Konzepte für ein solarthermisches Energiesystem mit einem thermochemischen Speicher auf der Basis von Branntkalk [17]. SWS-Energiespeicher wären sowohl für den Mond als auch für den Mars denkbar. Hier könnten Wärmespeicher und SWS-Technologie ihre Vorteile – Ressourcengenügsamkeit und Zyklensfestigkeit – ausspielen. Doch davor werden diese Technologien sicher ihre Rolle bei der Energieversorgung auf der Erde finden.

### Literatur

- [1] E. H. Lieb und J. Yngvason, Phys. Rep. **310**, 1 (1999)
- [2] T. Bauer et al., in: F. Lantelme und H. Groult (Hrsg.), Molten Salts Chemistry from Labs to Application, Elsevier, Amsterdam (2013) S. 415
- [3] D. Laing und S. Zunft, in: Woodhead Publishing Series in Ener-



gy No 66, *Advances in Thermal Energy Storage Systems*, hrsg. von L. F. Cabeza, Woodhead Publishing/Elsevier (2014), S. 65

[4] K. Stahl et al., in: VDI-Konferenz „GuD-Kraftwerke im dynamischen Betrieb“, VDI Wissensforum GmbH, Köln (2011) S. 147

[5] V. Dreißigacker, S. Zunft und H. Müller-Steinhagen, *Applied Energy* **111**, 1020 (2013)

[6] M. Delbo et al., *Nature* **508**, 233 (2014)

[7] K. Edem N'Tsoukpoe et al., *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **13**, 2385 (2009)

[8] I. Utz et al., *Int. J. Hydrogen Energy* **37**, 7645 (2012)

[9] A. Hauer und F. Fischer, *Chem. Ing. Tech.* **83**, 61 (2011)

[10] F. Trieb und H. Müller-Steinhagen, in: *Clean Power from Deserts - The DESERTEC Concept for Energy, Water and Climate Security*, WhiteBook, 4. Aufl. (2009)

[11] F. Trieb, T. Fichter und M. Moser, *Sustainability Science* **9**, 47 (2014)

[12] F. Trieb et al., *Energy Policy* **42**, 341 (2012)

[13] B. Wolf, *Method for storing and recovering energy*, Patent EP 1987299 B1 (2007)

[14] A. Thess, *Phys. Rev. Lett.* **111**, 110602 (2013)

[15] A. White, G. Parks und C. N. Markides, *Appl. Thermal Engin.* **53**, 291 (2013)

[16] D. T. Palac, *Fission Surface Power Systems (FSPS) Project Final Report for the Exploration Technology Development Program (ETDP)*, NASA/TM-2011-216975 (2011)

[17] M. E. Perez-Davis und F. DiFilipo, *NASA Technical Memorandum* 103145 (1990)

[18] S. Zunft et al., *Transactions of the ASME - Journal of Solar Engineering*, ASME **133**, 1019 (2011)

[19] A. Thess, *Das Entropieprinzip*, De Gruyter Oldenbourg (2014)

**DIE AUTOREN**

**André Thess** (FV Dynamik und Statistische Physik, Physik sozio-ökonomischer Systeme) hat an der TU Dresden Physik studiert, am Zentralinstitut für Kernforschung Rossendorf (heute HZDR) promoviert und als Postdoc in Lyon, Grenoble und Princeton gearbeitet. Nach 15 Jahren als Professor an der TU Ilmenau leitet er seit April 2014 das Institut für Technische Thermodynamik am DLR und ist Professor für Energiespeicherung an der Universität Stuttgart.



**Franz Trieb** hat nach dem Ingenieurstudium an der TU Clausthal im Rahmen seiner Dissertation an der Uni Oldenburg ein autonomes Wasserstoff-Energiespeichersystem für Solar- und Windstrom aufgebaut. Seit 1994 arbeitet er in der Abteilung Systemanalyse und Technikbewertung am Institut für Technische Thermodynamik des DLR.



**Antje Wörner** hat an der Universität Stuttgart Verfahrenstechnik studiert und dort über die solare Reformierung von Methan promoviert. Sie leitet die Abteilung Thermische Prozesstechnik am Institut für Technische Thermodynamik des DLR.



**Stefan Zunft** hat an den Universitäten Hannover und Stuttgart Maschinenbau studiert und an der Universität Stuttgart promoviert. Seit 1991 ist er am Institut für Technische Thermodynamik des DLR tätig und leitet dort das Fachgebiet Thermische Kraftwerkskomponenten.

