

BINE-Fachbuch

Wärmespeicher

5., vollständig überarbeitete Auflage

Andreas Hauer
Stefan Hiebler
Manfred Reuß

LESEPROBE

Herausgeber

 **FIZ Karlsruhe**
Leibniz-Institut für
Informationsinfrastruktur

Fraunhofer IRB  **Verlag**

 **BINE**
Informationsdienst

BINE Informationsdienst berichtet über Themen der Energieforschung: Neue Materialien, Systeme und Komponenten, innovative Konzepte und Methoden. BINE-Leser werden so über Erfahrungen und Lerneffekte beim Einsatz neuer Technologien in der Praxis informiert. Denn erstklassige Informationen sind die Grundlage für richtungweisende Entscheidungen, sei es bei der Planung energetisch optimierter Gebäude, der Effizienzsteigerung industrieller Prozesse oder bei der Integration erneuerbarer Energien in bestehende Systeme.

BINE Informationsdienst ist ein Service von FIZ Karlsruhe und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert.

Für weitere Fragen steht Ihnen zur Verfügung:

Dr. Franz Meyer (Redaktion)

BINE Informationsdienst, FIZ Karlsruhe, Büro Bonn

Kaiserstraße 185–197, 53113 Bonn

Tel. +49 2 28 92379-0, E-Mail: bine@fiz-karlsruhe.de, www.bine.info

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über www.dnb.de abrufbar.

ISBN (Print): 978-3-8167-8366-4 | ISBN (E-Book): 978-3-8167-8751-8

Layout: Dietmar Zimmermann | Umschlaggestaltung: Martin Kjer | Herstellung: Tim Oliver Pohl

Satz: Mediendesign Späth GmbH, Birenbach | Druck: DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg

Alle Rechte vorbehalten.

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Titelfoto: Mobiler Sorptionsspeicher

(Quelle: Andreas Krönauer, ZAE Bayern)

© by FIZ Karlsruhe

Verlag und Vertrieb:

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB

Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart

Telefon +49 7 11 970-2500

Telefax +49 7 11 970-2508

irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

Hinweis zu den Abbildungen: Soweit nachfolgend keine anderen Quellen genannt werden, stammen die Abbildungen von den Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	9
1 Einleitung / Motivation	11
1.1 Wozu braucht man Energiespeicher?	11
1.1.1 Angebot und Nachfrage	11
1.1.2 Zeitliche Abweichung von Bereitstellung und Bedarf	12
1.2 Wie kann Energie gespeichert werden?	13
1.2.1 Elektrische/elektro-chemische Energiespeicher	14
1.2.2 Mechanische Speicher	14
1.2.3 Chemische Energiespeicher	15
1.2.4 Thermischer Energiespeicher	15
1.2.5 Möglichkeiten durch Umwandlung der Energien	16
1.2.6 Vergleich der Energiespeichertechnologien	16
2 Charakteristische Größen eines thermischen Energiespeichers	19
2.1 Prolog: Was ist thermische Energie? (Physik der Wärme)	19
2.2 Sensibel – Latent – Thermochemisch	22
2.3 Speicherkapazität	24
2.4 Lade- und Entladeleistung	24
2.5 Nutzungsgrad	25
2.6 Speicherzyklen	25
3 Aufbau eines Speichers und Integration in ein Energiesystem	27
3.1 Vom Speichermaterial zum Speichersystem	27
3.1.1 Material	27
3.1.2 Komponente	28
3.1.3 System	28
3.1.4 Zusammenspiel der Ebenen	29
3.2 Kosten und wirtschaftliche Betrachtung	29
4 Speicherklassifikation	33
4.1 Was soll der Speicher in der Anwendung leisten?	33
4.1.1 Klassifikation nach Einsatzbereich	33
4.1.2 Klassifikation nach Temperaturniveau	34
4.1.3 Klassifikation nach Speicherkapazität, thermischer Leistung und Speicherdauer	35
4.2 Das physikalische Speicherprinzip	35
4.2.1 Spezifische Wärmekapazität	36
4.2.2 Schmelzwärme	36

4.2.3	Reaktionsenthalpie	38
4.3	Autarke – nicht-autarke thermische Speicher	40
4.3.1	Thermodynamische Betrachtung nicht-autarker Speicherprozesse	42
4.4	Empirische Regeln zur Abschätzung der Speicherkapazität	44
4.4.1	Sensible Wärmespeicherung	44
4.4.2	Latente Wärmespeicherung	47
4.5	Typische Speichermaterialien	48
4.5.1	Sensible Speichermaterialien	48
4.5.2	Latentwärmespeichermaterialien	50
4.5.3	Thermochemische Speichermaterialien	56
4.6	Speicherdesign: Technische Bauformen	58
4.7	Dämmmaterialien	65
4.7.1	Allgemeines	65
4.7.2	Konventionelle Speicherdämmung	67
4.7.3	Vakuumdämmung und Vakuumsuperisolation (VSI)	69
5	Thermische Energiespeicher in der Anwendung	71
5.1	Sensible Speichersysteme	71
5.1.1	Saisonale Speicherung solarer Wärme	71
5.1.2	Superisolierter Speicher	80
5.2	Latentwärmespeichersysteme	85
5.2.1	Passive Kühlung mit PCM	85
5.2.2	Latentwärmespeicher zur Rückkühlung einer Absorptionskältemaschine	90
5.2.3	PCM-Slurries	96
5.3	Thermochemische Speichersysteme	102
5.3.1	Mobiler Adsorptionsspeicher zur Nutzung industrieller Abwärme	102
5.3.2	Kälte speichern und Klimatisieren mit Salzlösungen	110
5.3.3	Adsorptionsspeicher in einem Geschirrspüler	119
6	Stand der Forschung und Entwicklung	125
7	Nachwort	133
7.1	Mit thermischen Energiespeichern ist es wie mit Handschuhen	133
7.2	Thermische Energiespeicher können die Welt retten	134
8	Zitierte Literatur und Abbildungsverzeichnis	137
8.1	Zitierte Literatur	137
8.2	Abbildungsverzeichnis	141

9	Forschungsvorhaben der Bundesregierung	143
9.1	Laufende und kürzlich abgeschlossene Forschungsvorhaben	143
9.2	Forschungsberichte	145
10	Weiterführende Literatur	147
10.1	BINE Informationsdienst	149
11	Autoren	151

LESEPROBE

Vorwort

Wärmespeicher begegnen uns überall in der Natur, ohne dass wir sie bewusst als solche wahrnehmen. Dabei können sie von existenzieller Bedeutung für uns sein. Die Speicherfähigkeit der Weltmeere verhindert zum Beispiel Extremtemperaturen und trägt damit zu einem lebensfreundlichen Klima auf der Erde bei.

Jeden Tag nutzen wir technische Wärme- und Kältespeicher. Die ständige Verfügbarkeit von warmem Wasser aus dem Wasserspeicher der Heizung ist für uns ebenso selbstverständlich, wie die Behaglichkeit, die aus der thermischen Trägheit der Gebäude in Kombination mit der Wärmedämmung resultiert. Auch wenn uns das Speicherprinzip unkompliziert erscheint, ist schon ein einfacher Solarspeicher heute ein exakt auf seine Aufgabe abgestimmtes, hochentwickeltes technisches System.

Wärmespeicher ermöglichen es, das Wärmeangebot im Zeitverlauf und in der Leistung dem Bedarf anzupassen. Erst durch Wärmespeicher lassen sich viele Energiequellen wie Sonnenenergie oder industrielle Abwärme effizient nutzen. Auch im Bereich der Versorgungssicherheit und beim Wärmetransport spielen sie eine wichtige Rolle. Mit dem Beschluss der Bundesregierung zum Umbau der Energieversorgung in Deutschland ergeben sich neue Aufgaben für Wärme- und Kältespeicher, so etwa zum Lastausgleich in elektrischen Netzen.

Die 5. Auflage des BINE Fachbuchs »Wärmespeicher« wurde mit neuen Schwerpunkten vollständig überarbeitet und trägt den Ergebnissen der aktuellen Forschung Rechnung. Es führt in die physikalischen Grundlagen ein, erläutert die charakteristischen Kenngrößen thermischer Speicher und stellt die Bandbreite verfügbarer Wärmespeicher vor. Diese reicht von kleinen Kurzzeitspeichern in Geschirrspülern bis hin zu saisonalen Wärmespeichern, die Siedlungen ganzjährig mit Wärme versorgen. Kältespeicher für die Klimatisierung werden ebenso vorgestellt wie Hochtemperaturspeichern für die Industrie. Im Fokus stehen insbesondere neue Technologien, wie zum Beispiel verschiedene Phasenwechselmaterialien oder Sorptionsspeicher.

FIZ Karlsruhe
BINE Informationsdienst

LESEPROBE

1 Einleitung / Motivation

Das Fachbuch gibt eine Einführung in das Thema »thermische Energiespeicherung«. Es spannt den Bogen von grundsätzlichen Überlegungen zur Energiespeicherung und den charakteristischen Größen thermischer Energiespeicher bis zum Aufbau solcher Speicher und ihrer Integration in ein Energiesystem. Der Schwerpunkt liegt auf physikalischen und technischen Fragestellungen. Wirtschaftliche Aspekte werden nur kurz gestreift.

Durch die Einführung einer Klassifikation der verschiedenen Technologien und Anwendungsbereiche thermischer Energiespeicher sollen klare Begrifflichkeiten geschaffen werden, die es letzten Endes ermöglichen, den passenden Speicher für die jeweilige Anwendung zu identifizieren.

Ausführliche Beispiele dokumentieren den Stand der Technik und Forschung.

1.1 Wozu braucht man Energiespeicher?

1.1.1 Angebot und Nachfrage

Immer dann, wenn Energie bereitsteht, aber nicht unmittelbar genutzt werden kann, kann ein Energiespeicher eingesetzt werden. Er nimmt die Energie auf und gibt sie zu einem späteren Zeitpunkt (oder an einem anderen Ort), wenn eine Nutzung möglich ist, wieder ab. Energiespeicher stellen also nutzbare Energie zur Verfügung und sind damit äquivalent zu anderen Energiequellen, wie z.B. fossilen Energieträgern, und stehen in Konkurrenz zu diesen. Die konventionellen Energieträger – Erdöl, Erdgas und Kohle – besitzen hingegen in hohem Maße die Qualitäten eines Energiespeichers, können aber nicht regeneriert werden. Sie lassen sich ohne Verluste nahezu beliebig lagern und verfügen über hohe Energiedichten, z.B. Erdöl und Steinkohle 40 GJ/m^3 . Vor diesem Hintergrund müssen Energiespeicher ähnliche Eigenschaften oder andere wirtschaftliche oder ökologische Vorteile aufweisen.

Am Beispiel der Elektromobilität lässt sich zeigen, wie ein Energiespeicher unmittelbar mit fossilen Energieträgern in Konkurrenz steht. Der Speicher, in diesem Fall die Batterie, sollte aus ökologischen Gründen Elektrizität aus erneuerbaren Quellen aufnehmen und dann bereitstellen, wenn der Verbraucher es wünscht. Gleichzeitig muss der Speicher dafür sorgen, dass der Verbraucher auch räumlich unabhängig von den Energiequellen agieren kann. Neben einem rein wirtschaftlichen Vergleich zwischen Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor und Elektrofahrzeugen, spielen hier unter Umständen umweltpolitische Argumente, wie die Reinhaltung der Luft eine entscheidende Rolle zugunsten des Energiespeichers.

Die Kosten für einen Energiespeicher sind in der Regel zusätzliche Kosten, die sich zu den Kosten der Energieerzeugung addieren. Der Preis für eine gespeicherte Energiemenge darf nicht deutlich über dem Preis direkt bereitgestellter Energie liegen. Die Preise variieren allerdings mit der momentanen Nachfrage. Besonders interessant sind Speicher dann, wenn Energie günstig aufgenommen und bei großer Nachfrage zu hohen Preisen wieder abgegeben werden kann.



■ **Abb. 1:** Pumpspeicherwerk Wendefurth im Harz

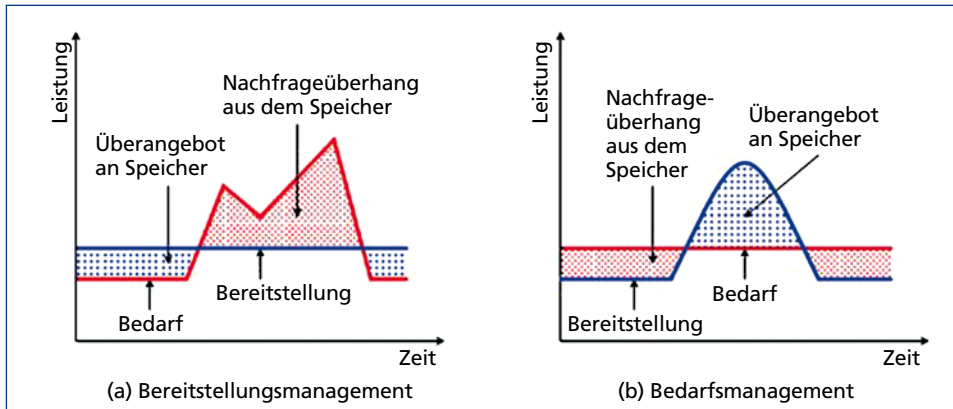
Beispiel: Windstrom im Pumpspeicherwerk

Ein sehr anschauliches Beispiel, wenn es auch nicht häufig vorkommt, ist das Laden eines Pumpspeicherwerks zum Zeitpunkt negativer Strompreise. In den Weihnachtsfeiertagen 2009 fiel der Strompreis bei hohem Angebot, z. B. aus Windkraftanlagen an der Küste, in negative Bereiche. Der Strom konnte also mit Gewinn für das Pumpen des Wassers in das höher gelegene Reservoir genutzt werden. Nach einigen Tagen wurde dann, bei jetzt wieder positiven Strompreisen, die potenzielle Energie des Wassers in Elektrizität umgewandelt. So wurde tatsächlich beim Laden und beim Entladen Geld verdient. Dieses Beispiel zeigt, dass die ökonomischen Randbedingungen entscheidend für die Amortisierung von Energiespeichersystemen sind.

1.1.2 Zeitliche Abweichung von Bereitstellung und Bedarf

Ein Speicher kann immer da eingesetzt werden, wo ein Leistungsunterschied zwischen Bereitstellung und Bedarf besteht, der ausgeglichen werden muss. Ohne Speicher müsste der Nutzer die Energie so abnehmen, wie sie anfällt, oder der Anbieter muss die Energie so liefern, wie sie benötigt wird. Dies ist in der Realität selten der Fall. Abbildung 2 zeigt zwei Fälle, bei denen einmal die bereitgestellte Leistung und einmal der Leistungsbedarf konstant sind und die jeweils andere Größe zeitlich variiert.

Im Fall (a) wird Energie z. B. durch ein fossiles Kraftwerk bereitgestellt und der variierende Bedarf wird durch Energiespeicher so gedeckt, dass das Kraftwerk nicht darauf reagieren muss und gleichmäßig im optimalen Bereich gefahren werden kann. Da der Speicher in diesem Betriebsmodus die Leistungsspitzen abdeckt, können hier auch die höchsten Preise für die abge-



■ **Abb. 2:** Bereitstellungs- und Bedarfsmanagement (ZAE Bayern)

gebene Energie erreicht werden. Ein weiteres Beispiel wäre ein Blockheizkraftwerk, das mit Biogas läuft und bei konstanter Stromeinspeisung Wärme speichert. Bei Wärmebedarf wird die thermische Energie aus dem Speicher bereitgestellt.

Im Fall (b) variiert die Energiebereitstellung, z. B. bei erneuerbaren Energiequellen wie Photovoltaik, Wind oder Solarthermie. Der Energiespeicher stellt in diesem Fall Energie zur Deckung der Grundlast (konstanter Bedarf) bereit. Speicher dienen in einem solchen Szenario der Integration erneuerbarer Energien.

Die Realität der Energieversorgung wird in Zukunft eine zeitliche Variation sowohl der Energiebereitstellung, aufgrund des wachsenden Anteils fluktuierender Energiequellen, als auch des Bedarfs sehen und damit eine wachsende Notwendigkeit für den Einsatz effizienter Energiespeicher.

Die Aufgabe eines Energiespeichers lässt sich auch beschreiben, indem man ihm zuweist, ob er sich auf der Angebotsseite oder auf der Nachfrageseite befindet. Auf der Angebotsseite ist der Speicher auf die Aufnahme von Energie ausgelegt. Dies wäre typischerweise eine Anwendung im Bereich erneuerbarer Energien oder die Nutzung industrieller Abwärme. Im Vordergrund steht die Aufgabe, Energie zu speichern, die sonst ungenutzt bleiben würde. Speicher auf der Verbraucherseite sind so gestaltet, dass sie dem Bedarfsprofil folgen können. Die Energieerzeugung muss dies dann nicht tun. In diesem Fall wird das Bedarfsprofil von der Erzeugung entkoppelt. Man spricht dann auch von »Demand Side Management«.

Speicher auf der Nachfrageseite sind in der Regel dezentrale Speicher, die sich vor Ort beim Verbraucher befinden. Oft handelt es sich um kleinere Speicher, da sie dem Bedarf eines Verbrauchers angepasst sind. Speicher auf der Angebotsseite sind dagegen meist zentrale, größere Speichersysteme, die direkt mit den Erzeugungseinheiten verbunden sind.

1.2 Wie kann Energie gespeichert werden?

Physikalisch muss zwischen verschiedenen Energieformen differenziert werden. In der Energietechnik wird unterschieden, in welcher Form die Energie dem Verbraucher bereitgestellt wird: Als elektrischer Strom, als mechanische (kinetische) Energie, als chemischer Energieträger oder

als thermische Energie. Dabei unterscheiden sich diese Formen in ihrem tatsächlich nutzbaren Anteil. Kann elektrischer Strom in der Regel zu 100 % genutzt werden, muss bei der Nutzung der kinetischen Energie (z. B. bei einem Schwungrad-Speicher) oder der chemischen Energie (z. B. in Wasserstoff) die Effizienz der Umwandlung in die benötigte Energieform berücksichtigt werden. Bei thermischer Energie, sofern sie nicht direkt als Wärme oder Kälte gebraucht wird, gelten die Gesetze der Thermodynamik für eine weitere Umwandlung. Das Maß für die Nutzbarkeit, der Arbeitsfähigkeit in diesem Zusammenhang, ist die Exergie [1].

1.2.1 Elektrische/elektro-chemische Energiespeicher

In Zukunft kann die Integration erneuerbarer Elektrizität aus Photovoltaik und Wind zum Teil von elektrochemischen Speichersystemen übernommen werden. Der Bedarf an elektrochemischen Speichern (Akkumulatoren, Redox-Flow-Batterien) und Hybridsystemen aus Batterien und Superkondensatoren mit hoher Leistungsdichte und langer Lebensdauer wird in den kommenden Jahren stark ansteigen, denn der Anteil an Strom aus dezentralen und fluktuierenden Quellen wird sich erhöhen, was den stationären Einsatz dieser Technologien forcieren wird. Gleichzeitig wird die Entwicklung leistungsstarker Batterien für mobile Anwendungen im Verkehr zunehmend an Bedeutung gewinnen. Die zukünftigen Herausforderungen liegen in einer nutzerfreundlichen Kostenstruktur elektro-chemischer Speicher und der Produktion von anwendungsorientierten Systemlösungen. Dies gilt insbesondere für eine stationäre elektrochemische Stromspeicherung für fluktuierende Einspeisungen aus Photovoltaik- und Windanlagen. Hier zeichnet sich eine Entwicklung ab, mit der überschüssiger Windstrom in große Batteriesysteme geleitet wird, um diese in ein Energiedienstleistungssystem einzubinden, das Spannung und Frequenz im Verteilnetz effizient stabilisiert.

1.2.2 Mechanische Speicher

Speicher mechanischer Energie zeichnen sich vor allem durch große Speicherkapazität (absolute, nichtspezifische) und Leistung aus. Darüber hinaus sind sie heute die wirtschaftlichste Lösung der Elektrizitätsspeicherung:

- **Pumpspeicherwerke:** Pumpspeicher können zur Vergleichmäßigung der durch Kraftwerke zu deckenden Last (Lastglättung) sowie zur Speicherung der Energieüberschüsse genutzt werden und so zu einem technisch effizienteren Einsatz der konventionellen Kraftwerke sowie der Vermeidung des Abregelns erneuerbarer Energien beitragen. Ihr Wirkungsgrad (in diesem Buch als »Nutzungsgrad« bezeichnet) liegt bei ca. 80 %.
- **Druckluftspeicher:** In Schwachlastzeiten speichern sie Strom aus Grundlastkraftwerken durch Kompression von Luft in unterirdische Kavernen. Beim Verdichten anfallende Wärme wird in die Umgebung abgegeben. Bei Spitzenlastbedarf wird der Kavernenspeicher entladen, indem die komprimierte Luft in einer Gasturbine unter Wärmezufuhr entspannt wird. Diese »konventionelle« Druckluftspeichertechnik benötigt für ihren Betrieb Erdgas für die Wärme bei der Entspannung. Damit bleibt der Nutzungsgrad auf ca. 40 % beschränkt. Als Weiterentwicklung zielt die so genannte adiabate Druckluftspeichertechnik darauf ab, eine lokal emissionsfreie, reine Speichertechnik mit hohem Wirkungsgrad zur Verfügung zu stellen. Dieses Konzept verwendet einen zusätzlichen Wärmespeicher. Damit wird es möglich, die für den Expansionsprozess benötigte Wärme durch die Kompressionswärme des Bela-

ungsprozesses bereitzustellen und so den bisher benötigten Gasbrenner zu vermeiden. Solche Anlagen könnten hohe Stromspeicherwirkungsgrade von etwa 70 % realisieren.

1.2.3 Chemische Energiespeicher

Neben der direkten Speicherung von Energie ist auch eine »stoffliche« Speicherung möglich. Dabei wird unter Energieeinsatz ein Energieträger produziert, der die Energie über einen beliebigen Zeitraum speichert. Bei den Energieträgern handelt es sich in der Regel um Wasserstoff oder Methan.

■ Wasserstoff als Energiespeicher

Durch Wasserelektrolyse kann z. B. der überschüssige Windstrom als chemische Energie gespeichert werden. Zentraler Punkt einer Wasserstoffwirtschaft ist die ökologisch und wirtschaftlich vertretbare Erzeugung des Wasserstoffs mit verschiedenen Verfahren (Elektrolyse aus erneuerbarem Strom, thermische Wasserspaltung oder Reformierung von aus regenerativen Ressourcen hergestellten Kohlenwasserstoffen (z. B. erneuerbares Methan)). Erneuerbarer Strom wird so in transportablen Energieträgern gespeichert, um ihn zeitlich oder räumlich versetzt zu nutzen. Der hergestellte und gespeicherte Wasserstoff kann so zur netzunterstützenden Rückverstromung eingesetzt werden und/oder als Kraftstoff für den mobilen Bereich. Im großen Maßstab wird die elektrische Pufferung z. B. von Strom aus Offshore-Windkraftparks über die Elektrolyse und Wasserstoffspeicherung in Kavernen mit einer Verstromung in Gasturbinen angedacht.

■ Erneuerbares Methan als Energiespeicher

Verschiedene Energieszenarien für Deutschland sehen in der Herstellung von erneuerbarem Methan einen besonders interessanten Lösungsweg zur Speicherung erneuerbarer Energien. Mit einem Reservoir von Methangasen kann auch zu Zeiten eines geringen Angebots an erneuerbaren Energien (z. B. Windflaute) die Energieversorgung für alle Verbrauchssektoren gedeckt werden. Das neue Konzept besteht darin, aus überschüssigem Windstrom über die Wasserstoffherzeugung via Elektrolyse und anschließender Methanisierung von CO₂ synthetisches Methan zu erzeugen, das ins Erdgasnetz eingespeist werden kann. Dieser neue Lösungsansatz zur saisonalen Speicherung von erneuerbaren Energien bietet die Möglichkeit, intelligente und bidirektional verbundene Strom- und Gasnetze zu entwickeln. Während sich die Speicherkapazität des Stromnetzes heute auf nur ca. 0,04 TWh beläuft – mit einer Speicherreichweite von unter einer Stunde – beträgt die Speicherkapazität des heute schon vorhandenen Gasnetzes in Deutschland über 200 TWh mit Speicherreichweiten im Bereich von Monaten.

1.2.4 Thermischer Energiespeicher

Die Speicherung thermischer Energie ist ein wichtiges Instrument für eine effiziente Energienutzung.

Thermische Speicher lassen sich nach unterschiedlichen Kriterien einordnen: Nach dem Einsatzbereich, z. B. Pufferspeicher zur reinen Leistungsanpassung der Energiebereitstellung. Weitere Kategorien sind der Speicherzeitraum, vom Kurzzeitspeicher bis hin zu saisonalen Speichern und auch der Temperaturbereich, z. B. von Niedertemperaturwärme für die Warmwasserberei-

tung bis zu Hochtemperaturspeichern bei der solarthermischen Elektrizitätserzeugung (Concentrated Solar Power). Thermische Speicher können stationär oder mobil zum Einsatz kommen. Ein großer Beitrag zur Steigerung der Energieeffizienz kann insbesondere bei der Abwärmenutzung erwartet werden.

Grundsätzlich kann thermische Energie in Form von sensibler oder latenter Wärme sowie in thermochemischen Prozessen gespeichert werden. Ausführliche Definitionen finden sich in Kapitel 2.2.

Thermische Energiespeicher speichern »Kälte« und »Wärme«. Letztere Begriffe unterscheiden sich dadurch, inwiefern die Temperatur der bereitgestellten thermischen Energie über (= Wärme) bzw. unter (= Kälte) der Umgebungstemperatur liegt. Ein Kältespeicher unterscheidet sich von einem Wärmespeicher dadurch, dass er beim »Speichern« Wärme abgibt statt aufnimmt. In diesem Buch verwenden wir daher bevorzugt den allgemeineren Begriff »Thermischer Energiespeicher«.

1.2.5 Möglichkeiten durch Umwandlung der Energien

Die Umwandlung der verschiedenen Energieformen – elektrisch, elektrochemisch, mechanisch, chemisch oder thermisch – bietet neue Möglichkeiten der effizienten Energiespeicherung. So kann z. B. erneuerbar erzeugte Elektrizität, wenn diese kurzzeitig nicht ins Netz eingespeist werden kann, nach der Umwandlung in Wärme oder Kälte dezentral, kostengünstig und effizient thermisch gespeichert werden. Auch Sonnenwärme von über 400°C kann in thermischen Speichern aufgehoben und in der Nacht der Turbine wieder zugeführt werden. Damit erhöht sich die Effizienz und vor allem die Laufzeit von solarthermischen Kraftwerken deutlich. Durch die Möglichkeit der Umwandlung der Energieformen, lassen sich die technisch und ökonomisch am besten geeigneten Speicherkonzepte realisieren. Allerdings sind alle Umwandlungsprozesse prinzipiell mit Verlusten behaftet.

1.2.6 Vergleich der Energiespeichertechnologien

Abbildung 3 zeigt verschiedene Speichertechnologien mit ihren Eigenschaften. Die Zahlen sind als Richtwerte zu verstehen, da bei vielen Energiespeichern die aktuellen Randbedingungen einen entscheidenden Einfluss haben. Darüber hinaus sind gerade im Bereich der elektrochemischen Speicher durch die verstärkten Forschungsaktivitäten in letzter Zeit sowohl eine Steigerung der Speicherkapazität als auch eine Reduktion der Kosten zu beobachten.

Die in der Abbildung 3 aufgelisteten Größen werden in den Kapiteln 2.3 bis 2.6 ausführlich eingeführt [2], [3].

Bei allen Unsicherheiten ist festzuhalten, dass thermische Energiespeicher in ihren spezifischen Kosten deutlich unter den anderen Speichertechnologien liegen. Damit kann es durchaus interessant sein, elektrische Energie bei Bedarf in Wärme oder Kälte umzuwandeln und dann zu speichern, auch über längere Zeiträume.

Bei der Umwandlung der Energieformen ist zu berücksichtigen, dass Wärme z. B. nur mit geringer Effizienz wieder in Elektrizität umgewandelt werden kann. Dies ist bei einer Batterie deutlich besser. Chemische oder »stoffliche« Speicher stellen letztendlich einen Energieträger bereit, was für Anwendungen in der Mobilität von Vorteil gegenüber Strom sein kann.

Speichertechnologie	Speicherprinzip	Leistung		Kapazität		Speicherdauer		Energiedichte		Effizienz	Lebensdauer	Kosten		
		MW	MW	MWh	Zeit	Zeit	kWh/t	kWh/m ³	%			Zykluszahl	\$/kW	\$/kWh
Lithium-Ionen Batterie (Li Ion)	Elektrochemisch	< 1,7	< 22	< 22	Tag – Monat	84–160	190–375	0,89–0,98	2960–5440	1230–3770	620–2760	17–102		
Natrium-Schwefel Batterie (NAS)	Elektrochemisch	1–60	7–450	7–450	Tag	99–150	156–255	0,75–0,86	1620–4500	260–2560	210–920	9–55		
Bleisäure-Batterie	Elektrochemisch	0,1–30	< 30	< 30	Tag – Monat	22–34	25–65	0,65–0,85	160–1060	350–850	130–1100	21–102		
Redox/Flow Batterie	Elektrochemisch	< 7	< 10	< 10	Tag – Monat	18–28	21–34	0,72–0,85	1510–2780	650–2730	120–1600	5–88		
Druckluftspeicher (CAES)	Mechanisch	2–300	14–2050	14–2050	Tag	–	2–7 at 20–80 bar	0,4–0,75	8620–17100	15–2050	30–100	2–35		
Pumpspeicherwerk	Mechanisch	450–2500	8000–190000	8000–190000	Tag – Monat	0,27 at 100 m	0,27 at 100 m	0,63–0,85	12800–33000	540–2790	40–160	0,1–18		
Wasserstoff	Chemisch	versch.	versch.	versch.	indefinite	34000	2,7–160 at 1–700 bar	0,22–0,50	1	384–1408	–	25–64		
Methan	Chemisch	versch.	versch.	versch.	indefinite	16000	10 at 1 bar	0,24–0,42	1	–	–	16–44		
Sensible Wasserspeicher	Thermisch	< 10	< 100	< 100	Stunde – Jahr	10–50	< 60	0,5–0,9	~5000	–	0,1–13	0,01		
Latentwärmespeicher (PCM)	Thermisch	< 10	< 10	< 10	Stunde – Woche	50–150	< 120	0,75–0,9	~5000	–	13–65	1,3–6		
Thermochemische Speicher (TCS)	Thermisch	< 1	< 10	< 10	Stunde – Woche	120–250	120–250	0,8–1	~3500	–	10–130	1–5		

■ **Abb. 3:** Eigenschaften der verschiedenen Energiespeichertechnologien [3], [4], [5], [6], [7], [8]

11 Autoren



Dr. Andreas Hauer

leitet die Garching Abteilung des Bayerischen Zentrums für Angewandte Energieforschung, ZAE Bayern. Nach seinem Physikstudium an der Ludwig-Maximilians-Universität und seiner Promotion an der TU Berlin leitete er viele Jahre die Gruppe »Wärmespeichersysteme« am ZAE Bayern. Seit über 10 Jahren ist er im Energiespeicherprogramm der Internationalen Energieagentur aktiv und ein im In- und Ausland anerkannter Experte für thermische Energiespeicherung.



Dr. Stefan Hieblers

Arbeitsschwerpunkte sind Wärme- und Kältespeicher mit Phasenwechselmaterialien. Momentan arbeitet er als Leiter der Gruppe »Wärmespeichersysteme« am ZAE Bayern in Garching. Nach seinem Studium der Technischen Physik an der TU München hat er zum Thema »Kalorimetrische Messverfahren für Latentwärmespeichermaterialien« ebenfalls an der TU München promoviert.



Manfred Reuß

arbeitet im Bereich sensibler Wärmespeicherung. Nach Abschluss des Physikstudiums an der Ludwig-Maximilians-Universität München war er über 20 Jahre an der Bayerischen Landesanstalt für Landtechnik der TU-München in Weihenstephan im Bereich der Energieforschung tätig und leitet seit seinem Wechsel an das ZAE Bayern im Jahre 2001 die Arbeitsgruppe Solarthermie/Oberflächennahe Geothermie.

LESEPROBE