

P O S I T I O N S P A P I E R

Energiespeicher

Der Beitrag der Chemie



IMPRESSUM:

Herausgeber:

Koordinierungskreis Chemische Energieforschung

Verantwortlich im Sinne des Presserechts:

Dr. Florian Ausfelder
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.
Theodor-Heuss-Allee 25
60486 Frankfurt/Main
E-Mail: ausfelder@dechema.de
Homepage: www.dechema.de

Erstellt und getragen durch den Koordinierungskreis Chemische Energieforschung* der folgenden Organisationen angehören:

DBG – Deutsche Bunsen-Gesellschaft für physikalische Chemie e.V.
DECHEMA – Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.
DGMK – Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V.
GDCh – Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.
VCI – Verband der Chemischen Industrie e.V.
VDI-GVC – Gesellschaft Verfahrenstechnik und Chemieingenieurwesen im Verein Deutscher Ingenieure e.V.

Die **DPG** – Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V. ist beobachtendes Mitglied im Koordinierungskreis.

Januar 2015

Vorsitzender: Prof. Dr. Ferdi Schüth, Max-Planck-Institut für Kohlenforschung, Mülheim an der Ruhr
E-Mail: schueth@kofo.mpg.de

Layout und Satz:

PM-GrafikDesign
Im alten Weg 7
63607 Wächtersbach

Druck:

Seltersdruck GmbH
65618 Selters/Ts

ISBN: 978-3-89746-166-6

Bildquellen der Titelseiten:
Argus – fotolia.de

1. Einleitung	4
2. Übersicht über vorhandene Technologien und Technologie-Optionen	6
2.1. Stromspeicher	6
2.2. Wärmespeicher	9
2.3. Power-to-X und stoffliche Speicher	10
3. Bewertung	12
3.1. Etablierte Speichertechnologien	12
3.2. Derzeit in der Entwicklung befindliche Technologien	12
3.3. Zukünftige Technologien	14
3.4. Verknüpfungsoptionen	14
4. Handlungsbedarf	15
5. Schlussanmerkung	18
6. Literaturverzeichnis	18
7. Autorenliste	19

1. Einleitung

Die Energiewende in Deutschland stellt hohe Ansprüche an die Anpassungsfähigkeit des Energiesystems. Bis zum Jahre 2050 sollen die Treibhausgase gegenüber dem Stand von 1990 um 80 % bis 95 % reduziert werden. Insgesamt soll der Primärenergieverbrauch gegenüber 2008 um 50 % sinken und der Bruttostromverbrauch¹ um 25 %. Im Verkehrssektor wird eine Senkung des Endenergiebedarfs um 40 % gegenüber 2005 angestrebt. Weiterhin wird angestrebt, den Primärenergiebedarf im Gebäudebereich um rund 80 % zu reduzieren. Diese Reduktionen sind verknüpft mit einer signifikanten Erhöhung der Energieeffizienz in allen Sektoren. Zusätzlich zu den Reduktionszielen wird eine starke Integration von erneuerbaren Energien angestrebt, die im Jahr 2050 einen Anteil von 60 % des Bruttoendenergieverbrauchs und mindestens 80 % des Bruttostromverbrauchs abdecken sollen [1].

Diese hohe Integration erneuerbarer Energien wird einen weit reichenden Paradigmenwechsel mit sich bringen und erfordert die Akzeptanz der Gesellschaft als Ganzes, sich auf diese Veränderungen einzulassen. Eine Grundvoraussetzung für das Gelingen der Energiewende und damit für den Erhalt unseres Wohlstandes ist der Erhalt bestehender und die Schaffung neuer industrieller Arbeitsplätze durch Innovationen in vielen Technologiebereichen.

Erneuerbare Energien im Stromsektor sind neben grundlastfähiger Wasserkraft und Biogas in stark steigendem Maße Wind- und Sonnenenergie. Diese Stromerzeugung ist jedoch nicht an der Nachfrage orientiert. Daher muss ein eventuell fehlendes Angebot kompensiert werden, und das System muss mit einem Überangebot umgehen können. Die Integration des bisherigen Anteils an regenerativ erzeugtem Strom von 25% (im ersten Halbjahr 2014 bereits von 30 %) und wesentlich geringere Anteile erneuerbarer Energien im Wärme- und Kraftstoffsektor konnte bisher mit leichten Anpassungen und mit den vorhandenen Technologien gemeistert werden. Es ist jedoch absehbar, dass weitere Flexibilisierungsmaßnahmen ebenso wie innovative Speichermöglichkeiten im Stromsektor erforderlich sein werden, wenn der Anteil an fluktuierend eingespeistem Strom weiter ansteigt.

Während Energieversorgungsnetze für einen räumlichen Ausgleich zwischen Angebot und Nachfrage sorgen, können Energiespeicher die zeitliche Dimension adressieren. Diese Funktion muss nicht notwendigerweise in der gleichen Energieform oder mit einem einzigen Technologieelement erfüllt werden. So gewinnt man nicht nur Flexibilität, sondern diese Technologien können auch genutzt werden, um erneuerbare Energien in andere Energiebereiche wie Wärmeversorgung, Mobilität oder energieintensive Industrieprozesse zu integrieren und zeitlich begrenzte Überschüsse einer sinnvollen Verwendung zuzuführen.

Technologien zur Speicherung von Strom befinden sich in verschiedenen Stadien der technischen Reife. Es sind jedoch erhebliche Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen erforderlich, um die Ziele der Energiewende möglichst ohne Komfortverzicht für die Gesellschaft und zu akzeptablen Kosten für Industrie und Bevölkerung zu erreichen. Generell ist eine signifikante Erhöhung der Speicherkapazitäten für Strom wünschenswert, um temporäre Überschüsse nutzbar zu machen und die Netze zu stabilisieren; dies wird aber immer mit Investitionskosten verbunden sein.

Die eigentlich naheliegende Lösung für die Anpassung der Stromerzeugung an das schwankende Angebot aus Windkraft und Photovoltaik wäre der verstärkte Einsatz von Gasturbinen, die sehr flexibel betrieben werden können; diese Option scheidet derzeit jedoch aus wirtschaftlichen Gründen aus; Ursachen sind zu niedrige erzielbare Strompreise bei gleichzeitig zu hohen Gaspreisen in Deutschland. Diese Option sollte aber in wirtschaftlichen Analysen anderer Konzepte immer als Referenzfall mit berücksichtigt werden.

Während die Frage der Versorgung mit Strom und der Möglichkeiten seiner Speicherung in der öffentlichen Debatte mit Blick auf die Versorgungssicherheit bereits einen breiten Raum einnimmt, werden die anderen Energiesektoren, Wärme und Mobilität, und deren Energieversorgungssysteme bisher wenig beachtet. Insbesondere stoffliche Speicher ermöglichen jedoch prinzipiell eine starke Vernetzung der

¹ In diesem Text wird der Begriff „Strom“ in seiner umgangssprachlichen Bedeutung als „elektrische Energie in Form von elektrischem Strom“ verwendet.

Energieversorgungssysteme und Anwendungsbereiche unter Ausnutzung der jeweiligen spezifischen Vorteile.

Wichtige Einflussgrößen für die Auswahl zukünftig einsetzbarer Technologien sind die Investitionskosten für die entsprechenden Anlagen sowie die variablen Kosten für die Beschaffung fossiler Energieträger und CO₂-Zertifikate. Hinzu kommen Akzeptanz und Marktdurchdringung der Elektromobilität, wodurch sich zusätzliche Potentiale zum Umgang mit fluktuierendem Stromangebot eröffnen. Ausschlaggebend ist am Ende die Gestaltung der politischen Rahmenbedingungen.

Die Binnensicht auf Deutschland ist dabei jedoch nicht ausreichend, da die internationale Vernetzung, zum Beispiel über das europäische Stromnetz beziehungsweise die internationale Märkte für Energieträger, bereits sehr ausgeprägt ist. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Ausbauziele der Bundesregierung von den europäischen Zielen abweichen.

Definition Energiespeicher

Ein Energiespeicher ist ein System, das eine Energiemenge kontrolliert aufnehmen (Beladung), sie über einen im Kontext relevanten Zeitraum in einem Speichermedium zurückhalten (Speicherung) und sie in einem gewünschten Zeitraum wieder kontrolliert abgeben (Entladung) kann.

2. Übersicht über vorhandene Technologien und Technologie-Optionen

2.1. Stromspeicher

Die Bereitstellung elektrischer Energie wandelt sich durch die zunehmende Einspeisung von Strom aus volatiler Stromerzeugung mittels Wind und Photovoltaik. Stromspeicher werden immer stärker an Bedeutung gewinnen; idealerweise könnten sie zu einem Element der Grundversorgungskapazität in Zeiten geringer Einspeisung aus erneuerbaren Energien werden; der Weg dahin ist aber noch weit. Die vorhandenen und sich in der Entwicklung befindenden mechanischen Speichertechnologien können elektrische Energie aufnehmen und auch wieder abgeben. Dies gilt ebenso für elektrochemische Speicher auf Basis der verschiedenen Batteriekonzepte. Im Gegensatz hierzu stellen Technologien, die zu stofflichen

Speichern führen, eigentlich nur eine zusätzlich anliegende Last dar. Sie können also Überschüsse an elektrischer Energie aufnehmen. Für eine Rückverstromung wird in der Regel eine getrennte Anlage, zum Beispiel eine Gasturbine, benötigt.

Sind für Erzeugungsspitzen an regenerativem Strom ausreichend zusätzliche Abnehmer im Netz vorhanden (beispielsweise das europäische Netz oder Abnehmer, die ihren Bedarf an das Angebot anpassen können wie Elektrofahrzeuge oder kleine dezentrale Einheiten, beispielsweise in Privathaushalten usw.), so müssten lediglich flexible Backup-Kapazitäten für die Zeiten zu geringer Stromproduktion bereitgestellt werden. Dafür stehen folgende Technologien zur Verfügung:

Maßnahme	Regelleistung	Größenordnung (Leistung)	Geographische Struktur	Speicherdauer	Anmerkungen
Netzausbau	+/-	GW	EU, regional, überregional, lokal, individuell	–	Beseitigung von Engpässen, bessere Verteilmöglichkeiten
Import / Export von Strom	+/-	GW	EU	–	Netzausbau, insb. internationale Knotenpunkte
Pumpspeicher	+/-	GW (national), MW (regional)	Regional, überregional	Stunden - Tage	Geringes Erweiterungspotential
Druckluftspeicher	+/-	GW (regional)	Regional, überregional	Stunden - Tage	Kavernen hauptsächlich im Norden
Schwungrad	+/-	kW - MW	Individuell, lokal	Sekunden - Stunden	Hohe Leistungsdichte, Geringe Energiedichte
Elektrochemische Speicher	+/-	kW - MW	Individuell, lokal, regional	Sekunden - Stunden	
Power-to-X, Wasserelektrolyse	-	MW	Lokal, regional, überregional	Tage - Jahre	Eventuell Methanisierung, bzw. Herstellung von Kraftstoffen
Gasturbine, Kraft-Wärme-Kopplung	+	MW	Lokal, regional, überregional	–	Rückverstromung H ₂ oder CH ₄
Brennstoffzelle	+	kW-MW	Individuell, lokal	–	Rückverstromung H ₂ oder CH ₄
Power-to-Heat mit Hochtemperatur-Wärmespeicherung	+/-	MW	Lokal	Stunden - Tage	Rückverstromung in Dampfturbine

Tabelle 1: Übersicht der Stromspeichertechnologien

2. ÜBERSICHT ÜBER VORHANDENE TECHNOLOGIEN UND TECHNOLOGIE-OPTIONEN

- Schnell anfahrbare Gasturbinen-Kraftwerke
- Mechanische Energiespeicher: Pumpspeicherkraftwerke oder Schwungräder, bei denen elektrische Energie in Lage - bzw. Bewegungsenergie umgewandelt wird.
- Elektrochemische Energiespeicher: Verschiedene Batterietypen, in denen elektrische Energie durch eine elektrochemische Reaktion in speicherbare chemische Energie gewandelt wird.
- Die Elektrolyse von Wasser liefert den Energieträger Wasserstoff, der physikalisch oder chemisch speicherbar ist und in Brennstoffzellen ebenfalls elektrochemisch wieder verstromt werden kann.
- Wasserstoff kann darüber hinaus vielfältig zur Synthese anderer Energieträger wie Methan, Methanol und höherer Kohlenwasserstoffe weiterverwendet werden. Methan bietet potentiell die Verknüpfung zum Erdgasnetz mit seiner ausgebauten Infrastruktur einschließlich Speicherkapazitäten; flüssige Energieträger könnten wie herkömmliche Kraftstoffe bevorratet werden.

- Thermische Energiespeicher: Die Speicherung größerer Wärmemengen bei mittleren Temperaturen zur zeitversetzten Nutzung ist von steigender Bedeutung für effiziente Anlagen zur Kraft-Wärmekopplung, vor allem aber für den Betrieb solarthermischer Anlagen zur Strom- und Wärmeerzeugung.

Diese genannten Speicher müssten in den Zeiten von Erzeugungsspitzen beladen werden.

Tabelle 1 listet die verschiedenen Optionen zur Speicherung von Strom und zur Netzstabilisierung zusammen mit ihren wesentlichen Charakteristika auf.

Einige dieser Technologien kommen auch für die individuelle Anwendung (Eigenheim, Bauernhof, Kleinbetrieb) oder für den Einsatz auf lokaler Ebene (Rechenzentrum, Industriepark, Onshore-Windpark) in Frage. Mit Blick auf die Wirtschaftlichkeit müssen bei allen Optionen System-Lösungen gefunden werden, die die Investitionskosten mit den zu erwartenden relativ geringen Betriebsstunden in Einklang bringen oder durch Verknüpfung verschiedener Segmente des Energiesystems ausreichend lange Betriebszeiten gewähr-

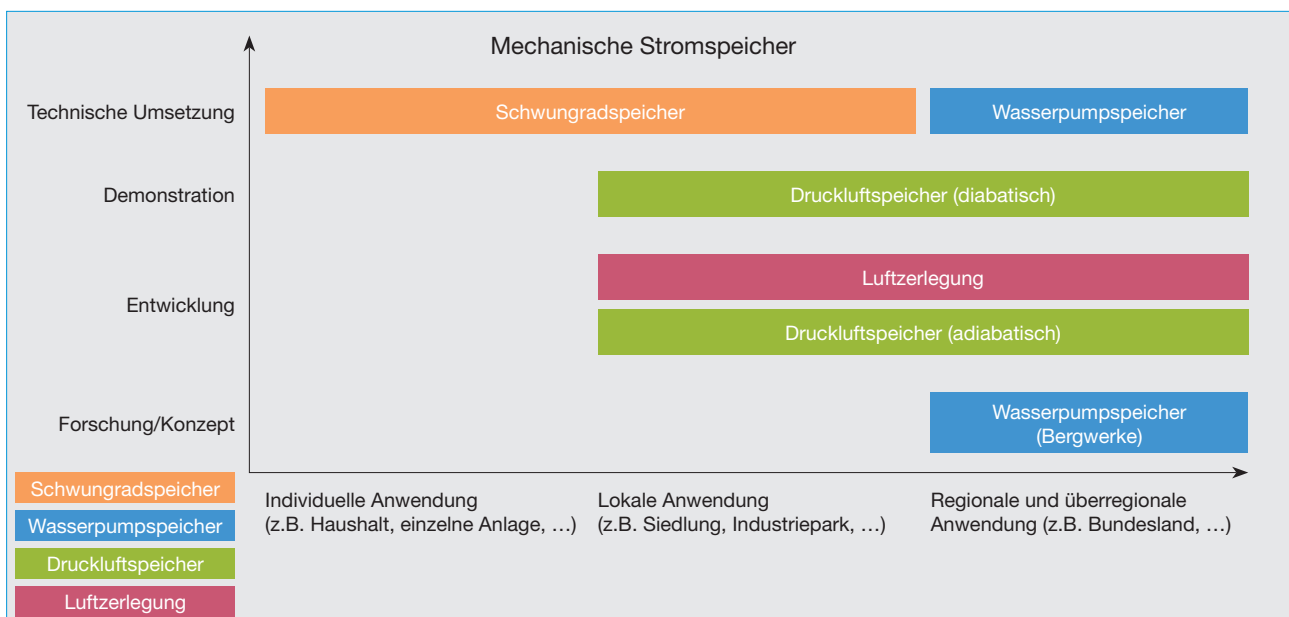


Abbildung 1: Stand der Technik der mechanischen Speichertechnologien zur Stromspeicherung

2. ÜBERSICHT ÜBER VORHANDENE TECHNOLOGIEN UND TECHNOLOGIE-OPTIONEN

leisten. In den folgenden Abbildungen wird der technische Stand verschiedener Speichertechnologien eingeordnet. Die verschiedenen Technologiestufen stellen eine grobe Einteilung gemäß folgender Zuordnung dar:

- „Forschung/Konzept“ beschreibt die Untersuchung des Wirkprinzips eines Verfahrens im Labormaßstab oder die Darstellung der prinzipiellen Machbarkeit in Form von Studien. (Wirkprinzip)
- „Entwicklung“ beschreibt, ausgehend von der Demonstration des Wirkprinzips in der Forschung/Konzept-Phase, die Fortführung der Tätigkeit hin zur Ableitung der notwendigen technischen Parameter für eine Umsetzung. (Technische Machbarkeit)
- „Demonstration“ beschreibt den Betrieb einer Anlage/Verfahrenskette in einer technisch relevanten Größen-

ordnung. Es können die notwendigen Parameter für einen wirtschaftlichen Betrieb der Anlage ermittelt werden. Wird ein Verfahren weltweit nur in wenigen vereinzelt Anlagen angewendet, so ist das Verfahren ebenfalls bei Demonstration eingeordnet. (Wirtschaftliche Machbarkeit)

- „Technische Umsetzung“ beschreibt Verfahren, die als Stand der Technik käuflich zu erwerben sind und auf einen wirtschaftlichen Betrieb optimiert sind. (Economy of Scale)

Abbildung 1 stellt den Stand der Technik mechanischer Verfahren zur Stromspeicherung dar.

Neben mechanischen sind elektrochemische Verfahren für die Stromspeicherung geeignet. Diese sind in Abbildung 2 dargestellt.

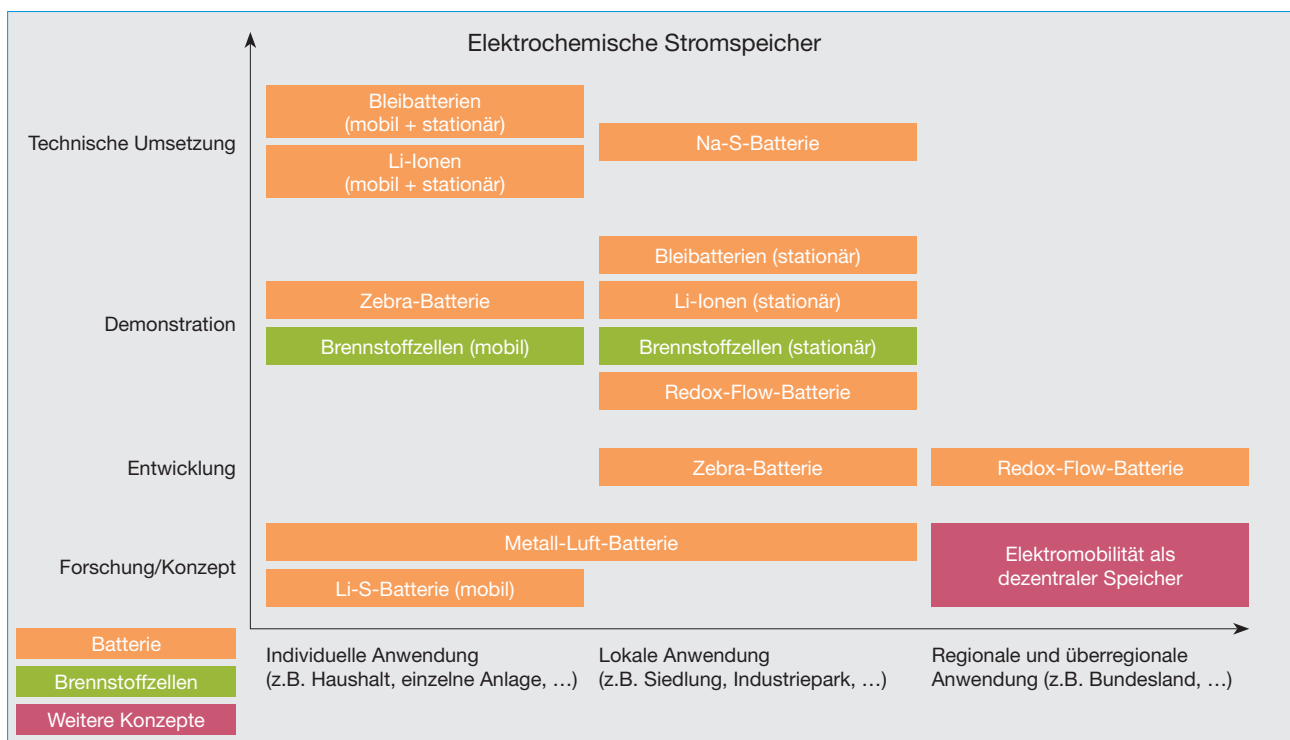


Abbildung 2: Stand der Technik von elektrochemischen Verfahren zur Speicherung elektrischer Energie

2. ÜBERSICHT ÜBER VORHANDENE TECHNOLOGIEN UND TECHNOLOGIE-OPTIONEN

2.2. Wärmespeicher

Im Gegensatz zum Stromsektor liegen Wärmebereitstellung und Wärmenutzung räumlich nahe beieinander. Ein Transport von Wärme erfolgt über Nah- und Fernwärmenetze zur Versorgung von Gebäuden sowie Dampfnetze auf verschiedenen Druckstufen für Industrieprozesse. Ähnlich wie im Fall der Stromspeicherung wird für die Wärmespeicherung ein Speichermedium benötigt; die Energiedichten ergeben sich aus den physikalischen Eigenschaften des jeweiligen Speichermediums. Im Regelfall wird die nötige Wärme über die Verbrennung von Energieträgern oder mit Hilfe einer Widerstandsheizung über die Umwandlung aus elektrischer Energie bereitgestellt.

Als Wärme- und Kältespeicher kommen im Niedertemperaturbereich in Gebäuden hauptsächlich Speicher auf Wasser-

basis zum Einsatz; sie können Nah- und Fernwärmenetze unterstützen. Neuere Entwicklungen erlauben den Einsatz von Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials – PCM) oder auch von Zeolithen. Im Gegensatz dazu kommen im Hochtemperaturbereich bei industriellen Prozessen (z.B. Stahl- und Glasindustrie) hauptsächlich keramische Materialien zum Einsatz, die den extremen Bedingungen standhalten können und relativ kostengünstig sind. In den dazwischen liegenden Temperaturbereichen finden Flüssigsalzschnmelzen ihre Anwendung, zum Beispiel im Kraftwerksbereich für solarthermische Kraftwerke (siehe Kap. 3.2).

Eine relativ neue Entwicklung ist die Verwendung chemischer Reaktionen als Wärmespeicher, zum Beispiel die reversible Umsetzung von Wasserstoff zu Hydriden. Sie zeichnen sich durch eine hohe Energiedichte, weit anwendbare Temperaturbereiche und durch eine praktisch unbegrenzte Speicher-

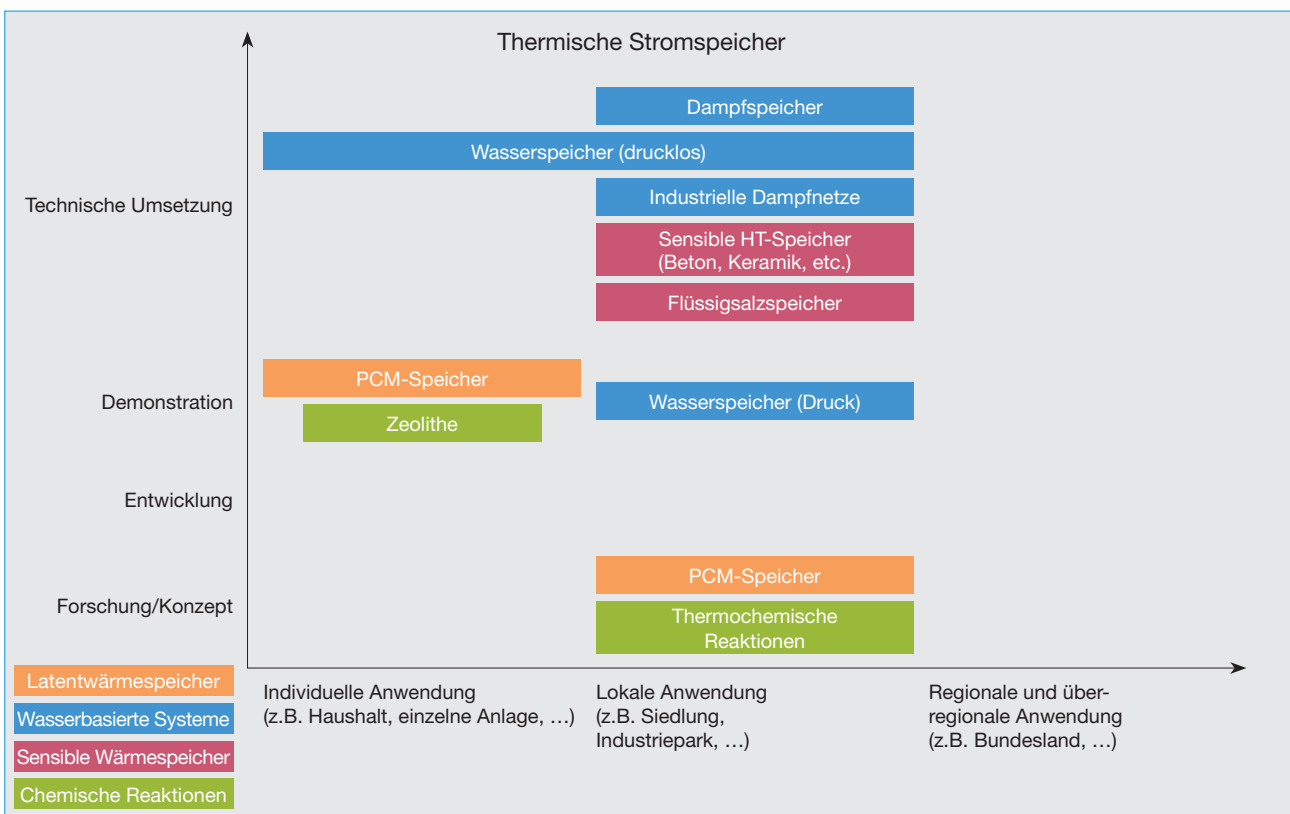


Abbildung 3: Stand der Technik der thermischen Speichertechnologien

2. ÜBERSICHT ÜBER VORHANDENE TECHNOLOGIEN UND TECHNOLOGIE-OPTIONEN

barkeit aus, wenn die Reaktanten getrennt werden. Abbildung 3 gibt die Einschätzung des Stands der Technik der verschiedenen thermischen Speichertechnologien wieder.

2.3. Power-to-X und stoffliche Speicher

Die gemeinsame Grundlage aller Power-to-X-Konzepte besteht in der Überführung von elektrischer Energie in eine andere Energieform. Diese Konzepte gehen häufig von einem Überschuss² an elektrischer Energie aus, der dann kostengünstig für eine weitere Umwandlung zur Verfügung steht.

Der Begriff Power-to-X umfasst folgende Technologiegruppen:

- **Power-to-Gas:** Die Umwandlung von Überschussstrom in gasförmige Energieträger basiert auf der Herstellung von Wasserstoff durch Wasserelektrolyse. Wasserstoff kann als eigenständiger Energieträger genutzt werden und zum Beispiel über Brennstoffzellenfahrzeuge in den Mobilitätssektor überführt werden; hierfür werden chemische oder physikalische Zwischenspeicher benötigt. Weitere Alternativen zur Speicherung von Wasserstoff und seiner Rückverstromung sind die stoffliche industrielle Nutzung (Petrochemie, Chemie, Stahl, Metallverarbeitung, Glas, etc.) oder die weitere Umwandlung in andere Energieträger/Rohstoffe. Einer dieser Folgeprozesse ist die Methanisierung, die unter Power-to-Gas subsummiert wird, da mit Methan ein gasförmiger Energieträger entsteht, der Erdgas substituieren kann, speicherbar ist und den Wärmesektor erschließt.
- **Power-to-Liquid:** Die Umwandlung von Überschussstrom in flüssige Energieträger verläuft ebenfalls über die Wasserelektrolyse mit Folgeprozessen, die zu flüssigen Kraftstoffen führen und damit den Mobilitätssektor adressieren, zum Beispiel über Fischer-Tropsch-Verfahren oder die Methanolproduktion. Hierzu gehört auch die Speicherung des Wasserstoffs mittels Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHC).

- **Power-to-Chemicals:** Ziel dieser Routen ist die Produktion industrierelevanter Chemikalien zur weiteren stofflichen Nutzung. Der erste Schritt ist ebenfalls die Herstellung von Wasserstoff über die Elektrolyse. Prinzipiell kommen sämtliche Prozesse in Frage, die Wasserstoff als Rohstoff einsetzen, zum Beispiel die Umsetzung mit CO₂ zu Methanol oder Ameisensäure.

Letztlich gehört auch die bereits im vorangegangenen Kapitel angesprochene Umwandlung von Überschussstrom in Wärme in diese Systematik (Power-to-Heat).

Die Motivation für den Einsatz von Power-to-X Technologien ist die Nutzung von (exergetisch) sehr hochwertiger Energie in Form von Strom, zum Beispiel aus fluktuierenden erneuerbaren Energien, der nicht von anderen Verbrauchern direkt genutzt werden kann (sogenannter „Überschussstrom“). Hinzu kommt die Möglichkeit der Integration von erneuerbaren Energien in andere Energiesektoren sowie die Bereitstellung von Energieträgern oder Rohstoffen für die industrielle Nutzung aus „heimischer Erzeugung“ im Sinne einer Reduzierung der Abhängigkeit von externen Rohstoffeinfuhren.

Abbildung 4 zeigt eine Einschätzung der verschiedenen Technologieelemente für stoffliche Speichertechnologien, wobei die Verfügbarkeit sich hier rein auf die Verwendung von Elektrolysewasserstoff bezieht, da die Syntheseverfahren auf Basis fossiler Rohstoffe Stand der Technik sind.

² „Überschussstrom“ kann es im physikalischen Sinne nicht geben, da Bereitstellung und Nutzung elektrischer Energie zu jedem Zeitpunkt ausgeglichen sein müssen. Generell wird unter dem Begriff eine Einspeisung (aufgrund des Einspeisevorrangs im EEG) von Strom aus erneuerbaren Erzeugern verstanden, die über den gegenwärtigen Bedarf hinausgeht. Dieses Überangebot drückt den Preis an den Strombörsen unter Umständen sogar in den Bereich negativer Strompreise.

2. ÜBERSICHT ÜBER VORHANDENE TECHNOLOGIEN UND TECHNOLOGIE-OPTIONEN

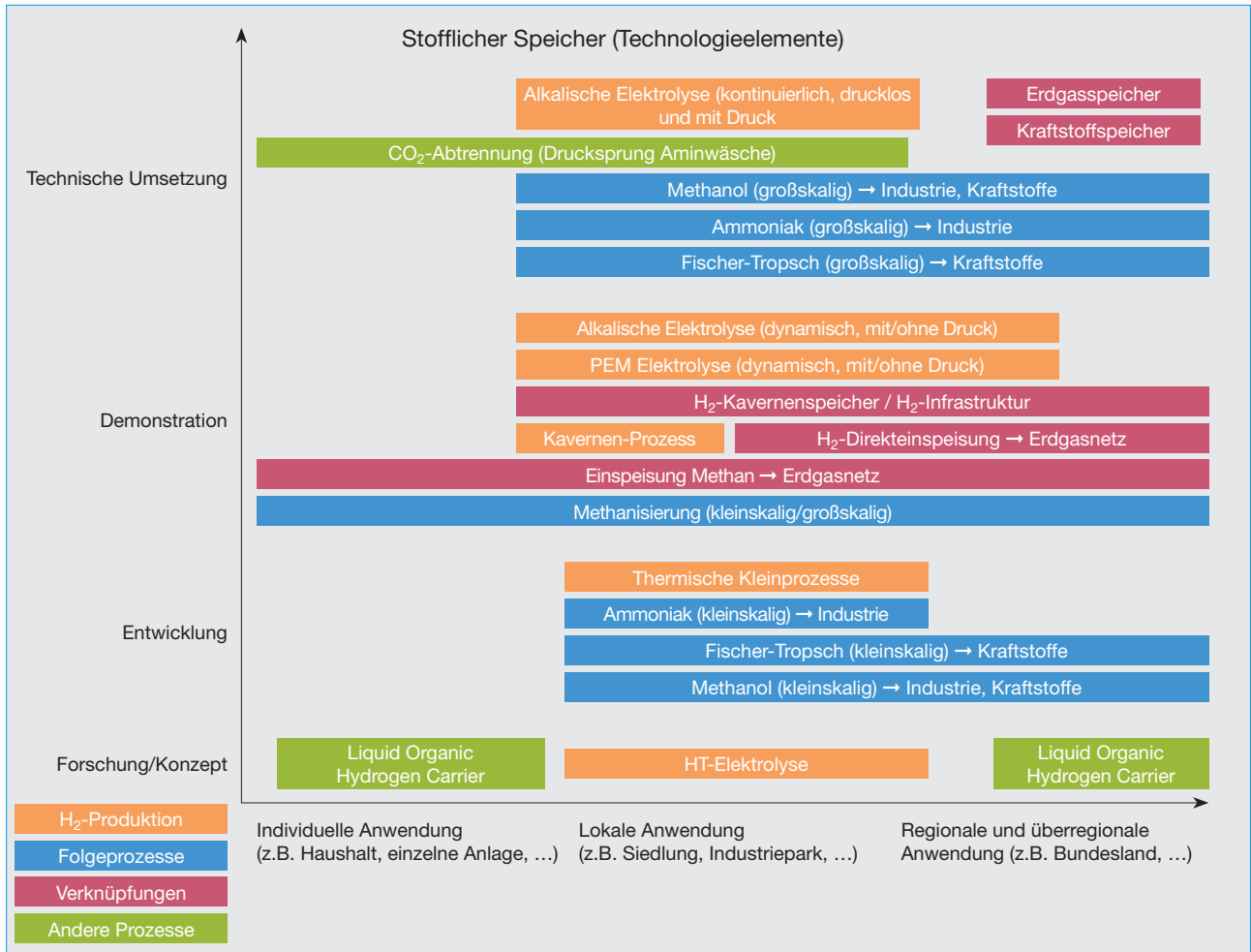


Abbildung 4: Stand der Technik der stofflichen Energiespeicherung (einzelne Technologieelemente)

3. Bewertung

Energiespeicher sind für elektrische ebenso wie für thermische Energie und in Form stofflicher Energiespeicher auch für mobile oder industrielle Anwendungen interessant. Wichtige Eigenschaften eines Energiespeichers sind hohe Effizienz, geringe Selbstentladung, eine hohe Kapazität, hohe Zyklenzahl, hohe Leistung und niedrige Kosten sowie eine gute Akzeptanz in der Gesellschaft. Bei einem Blick auf die verfügbaren Technologien wird deutlich, dass kein Speicher heute schon alle Anforderungen gleichzeitig erfüllt. Sie befinden sich in unterschiedlichen Entwicklungsstadien.

3.1. Etablierte Speichertechnologien

Für Pumpspeicherkraftwerke und Bleibatterien kann der Stand der Technik klar angegeben werden. Auch die Flexibilisierung des Betriebs großer industrieller Anlagen mit hohem Energiebedarf und teils auch der Anlagen zur Energiebereitstellung ist seit Jahren bekannt und wird praktiziert.

Für alle etablierten Technologien stellt sich trotzdem die Frage nach den zukünftigen Wirtschaftlichkeitsperspektiven und ob die geforderten Betriebsweisen mit den erhöhten Anforderungen der zukünftigen Energieversorgung in Einklang zu bringen sind.

Batteriespeicher der Größenordnung 5 kWh im Hausenergiebereich sind zum Beispiel ein Produkt, das sich am Markt etablieren könnte, da eine größere Zahl von Bürgern bereit sein dürfte, für eine nahezu autarke Energieversorgung mit Solarzellen in Kombination mit einem Speicher die noch relativ hohen Kosten von ca. 10.000 € pro Speichereinheit in Kauf zu nehmen. Größere Batteriespeicher werden vereinzelt im Rahmen von Projekten erprobt.

3.2. Derzeit in der Entwicklung befindliche Technologien

Ein Schlüsselement im zukünftigen Energiesystem wird die Schnittstelle zwischen elektrischer und stofflich-chemisch gebundener Energie sein. Diese Position nimmt in allen derzeitigen Überlegungen die Wasserelektrolyse ein. Es besteht

daher dringender Bedarf für die Entwicklung von Elektrolyseuren im Megawatt-Leistungsbereich zur Wasserstoffherzeugung mittels Strom im großen Maßstab. Im Sinne einer Nutzung von fluktuierendem Strom ist die Fähigkeit für einen dynamischen Betrieb eine zentrale Rahmenbedingung. Hinzu kommen als Anforderungen eine verbesserte Teillastfähigkeit, höhere Wirkungsgrade und deutlich geringere Investitionskosten. Daran knüpfen die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten für die verschiedenen Nutzungsstrategien von Wasserstoff an. Hierzu zählen die saubere Verbrennung zur thermischen Nutzung und die Nutzung in Gasturbinen ebenso wie die direkte Verstromung in Brennstoffzellen und die weitere stoffliche Umwandlung.

Wasserstoff kann auch direkt als Ersatz für klassische Otto- und Diesel-Kraftstoffe Verwendung finden. Dies ist wegen der vermiedenen Umwandlungsverluste zunächst die wirtschaftlich sinnvollste Alternative, erfordert aber den Markteintritt von Brennstoffzellenfahrzeugen in großer Zahl und eine ausreichend flächendeckende Tankstelleninfrastruktur. Die gesamte Kette von der Elektrolyse über den Transport und die Kompression des Wasserstoffs für den Tankprozess ist jedoch aufwändig. Für Brennstoffzellenfahrzeuge könnte daher prinzipiell neben der zentralen Wasserstoffherzeugung und -distribution über ein Tankstellennetz auch ein dezentral aufgestellter, privater Elektrolyseur des Fahrzeugbesitzers in Frage kommen. Für die Elektromobilität als Alternative zum Otto- und Dieselmotor sind neben Brennstoffzellenfahrzeugen auch batteriebetriebene Elektrofahrzeuge eine Option. Solche Batteriefahrzeuge können bei entsprechender Marktdurchdringung als eine Komponente des elektrischen Netzes eingestuft werden, wenn das Laden und ggf. auch teilweise das Entladen zentral zeitlich als Netzdienstleistung gesteuert werden kann. An geeigneten großformatigen Li-Ionen-Batterien wird insbesondere in Asien, den USA und mit einigen wenigen Aktivitäten auch in Europa mit Hochdruck gearbeitet.

Die für die Elektromobilität zurzeit bevorzugten Li-Ionen-Batterien unterliegen momentan einem raschen Preisverfall, so dass die reinen Batteriekosten an Dominanz für die Preisgestaltung der Fahrzeuge verlieren. Mit der Methanisierung von Wasserstoff und der Nutzung des Gasnetzes als Speicher kommt auch die Mobilität auf Basis von Erdgas ins Spiel: Die

vorhandene Infrastruktur kann zunächst Investitionen in neue Tankstellen vermeiden und verfügbare Fahrzeugtechnologien nutzen. Allerdings sind die Emissionsvorteile geringer und die Wirkungsgradkette ist stark verlustbehaftet.

Als aussichtsreicher stationärer Batteriespeicher wird derzeit die Vanadium-Redox-Flow-Batterie angesehen, während in Japan die Hochtemperatur-Natrium-Schwefel-Batterie produziert und erprobt wird. Große Batteriespeicher sind derzeit nicht wirtschaftlich zu betreiben, wären aber neben Pumpspeicherkraftwerken hinsichtlich des Gesamtwirkungsgrades die effizienteste Methode, Strom zu speichern.

Neben den Speichertechnologien wird die Verschiebung von Lasten in Haushalt, Gewerbe und Industrie diskutiert (demand side management auf Basis eines smart grids), eine Option, die auf alle Fälle Lastspitzen im Tagesgang glätten kann; eine zeitliche Verschiebung im Bereich von einer Stunde ist für viele Verbraucher akzeptabel. Dadurch können Speicherleistungen im einstelligen GW-Bereich ersetzt werden. Die Speicherung von Wärme hat sich in der Vergangenheit nur in Einzelfällen wirtschaftlich darstellen lassen (zum Beispiel im Falle von Industrieprozessen bei hohen Temperaturen und in Form häuslicher Warmwasserspeicher).

Umwandlung von	Industrielle Wertschöpfungskette	Regelleistung, DSM, Hybride Prozesse, abschaltbare Lasten	Petrochemische Industrie	Integration von Abwärmeströmen in Fernwärmenetze		Synthesegas, Chromatographie, Elektrolyse	Produkte
	Wasserstoff	Brennstoffzelle, Gasturbine, GuD-KWK	(mit CO ₂): Methanol, Fischer-Tropsch	(Mini-) BHKW, Brennstoffzelle	(mit CO ₂): Methanisierung mit Direkteinspeisung	Tanks, Kavernen	Chem. und petrochem. Industrie, Stahlindustrie
	Erdgas	GuD-KWK, BHKW, Gasturbine	Über Synthesegas: Methanol, Fischer-Tropsch	GuD-KWK, Heizkraftwerk, Brennwertheizung	Porenspeicher, Kavernen, Erdgasnetz	Dampfreformierung	Chem. und petrochem. Industrie
	Wärme	Dampfturbine, Organic Rankine Cycle		Wasser, Sensible Speicher, PCM, chem. Reaktionen		Thermo-chemische Kreisprozesse	Prozesswärme
	Kraftstoffe	GuD-KWK	Tanks, Kavernen	Öl-Heizung, GuD-KWK		Synthesegas	Chem. und petrochem. Industrie
	Strom	Mechanische Speicher, Batterien	(mit CO ₂) über Wasserstoff: Methanol, Fischer-Tropsch	Power-to-Heat	(mit CO ₂) über Wasserstoff: Methanisierung mit Direkteinspeisung	Elektrolyse	Elektrische Prozessenergie
		Strom	Kraftstoffe	Wärme	Erdgas	Wasserstoff	Industrielle Wertschöpfungskette
		Umwandlung in					

Abbildung 5: Verknüpfungsoptionen zwischen verschiedenen Versorgungs- und Einsatzbereichen von Energie in Form einer Matrix. In den Feldern ist die jeweilige Speicher- bzw. Konversions-Technologie eingetragen, durch die sich Energie- oder Speicherformen ineinander umwandeln bzw. in Industrieprozesse integrieren lassen. (Beispiel: Strom (Zeile) wird über Power-to-Heat in Form von Wärme (Spalte) nutzbar gemacht.) (Quelle: Ausfelder et al. [2])

3. BEWERTUNG

F&E-Projekte zu verschiedenen Speichertypen wurden und werden jedoch durchgeführt: Salzschnmelzen als Speicher in solarthermischen Kraftwerken zum Überbrücken der Nachtstunden, Zeolithe zur Klimatisierung in sonnenreichen Regionen (ebenfalls mittels Solarthermie), insbesondere Paraffine als Latentspeichermaterial oder auch die Ausnutzung der Wärmetönung bei der Hydridbildung in Kombination zweier unterschiedlicher Materialien sowie Betonspeicher für den adiabatischen Druckluftspeicher.

Ziel der Wärmespeicherung war bislang, vorhandene Wärmeströme zeitlich versetzt nutzbar zu machen. Eine Verknüpfung zum Strommarkt ergab sich bislang durch Kraft-Wärme-Kopplung. Da Wärmekosten in der Regel den Kosten für den verwendeten Brennstoff entsprechen, ist die Umwandlung von Strom in Wärme nur dann wirtschaftlich, wenn die Stromkosten extrem niedrig sind. Mit dieser Situation wird in Zukunft allerdings vermehrt zu rechnen sein.

3.3. Zukünftige Technologien

In den vergangenen Jahrzehnten wurden diverse Batterietypen untersucht, der Durchbruch gelang jedoch nur der Ni-Metallhydridbatterie und schließlich der Li-Ionen-Batterie, jeweils für elektrische Geräte (Laptop, Handy, Werkzeuge, etc). Basierend auf dem Erfolg der Li-Ionen-Batterie versuchen weltweit diverse Forschergruppen, neue Batteriesysteme zu entwickeln, zunächst verbesserte Li-Ionen-Technologien; aber auch Li-Schwefel und Li-Luft sind Beispiele. Auch das alte Wissen über verschiedene Flow-Batterien ist derzeit wieder gefragt, die Zinkelektrode in Kombination mit einer Luft-, Chlor- oder Bromelektrode sowie die Fe-Cr-Flow-Batterie sind bekannte Möglichkeiten.

Die Hochtemperaturelektrolyse weist einerseits einen geringeren Stromverbrauch auf, erfordert aber andererseits die Bereitstellung von Wärme auf entsprechendem Temperaturniveau, zum Beispiel aus Industrieprozessen.

Im Bereich der Wärmespeicherung zeigt die Verwendung chemischer Reaktionen ein hohes Entwicklungspotential auf, da diese in verschiedensten Temperaturbereichen zur

Anwendung kommen können, über hohe Speicherdichten verfügen und eine Langzeitspeicherung ermöglichen.

3.4. Verknüpfungsoptionen

Speichertechnologien können isoliert eingesetzt werden oder im Sinne eines systemischen Ansatzes verschiedene Versorgungsstränge des Energiesystems miteinander verknüpfen. Besonders prädestiniert hierfür sind stoffliche Speichertechnologien, die z.B. mit Strom über Elektrolyse von Wasser Wasserstoff produzieren, der dann für Brennstoffzellenfahrzeuge in der Mobilität oder mit anschließender Methanisierung in das Erdgasnetz eingespeist wird und damit dem Wärmesektor zur Verfügung steht. Da stoffliche Speicher als Rohstoffe in industriellen Wertschöpfungsketten dienen können, sind die verschiedenen Energiesektoren untereinander verwoben und können sich gegenseitig unterstützen. In Abbildung 5 wird ein Überblick über die Möglichkeiten gegeben.

4. Handlungsbedarf

Energiespeicher ermöglichen generell einen zeitlichen Ausgleich zwischen dem Bedarf an Energie und deren Bereitstellung; außerdem kann der Ausgleich zwischen räumlich getrennter Bereitstellung und Nutzung insbesondere durch die Verknüpfung über Netze (z. B. Erdgasnetz oder Tankstellennetz für mobile Anwendungen) erfolgen. Sie unterstützen hierdurch den konventionellen Erzeugungspark, der mittelfristig bei kleiner werdender installierter Leistung auf Basis fossiler Energieträger weiterhin einen wichtigen Beitrag zur Systemstabilität liefern wird.

Stoffliche Energiespeicher eröffnen darüber hinaus Möglichkeiten, die verschiedenen Energieversorgungssysteme für Strom, Kraftstoffe, Gas und Wärme intelligent miteinander zu koppeln und die jeweiligen Vorteile zu nutzen.

Die derzeitige Entwicklung in unserem Elektrizitätssystem ist geprägt durch eine mittlerweile wesentlich flexiblere Anpassung konventioneller, insbesondere fossiler Kraftwerke an den aktuellen Strombedarf. Hinzu kommt die Erschließung von verbraucherseitigen Anpassungspotentialen, auch in Industrieprozessen, an das aktuelle Stromangebot bzw. den aktuellen Strompreis an der Börse. Dies hat dazu geführt, dass die Differenz zwischen hohen und niedrigen Handelspreisen für Strom nicht zunimmt, sondern im Gegenteil in den letzten beiden Jahren geringer wurde. Infolgedessen hat sich die Rentabilität von Stromspeichern (insbesondere auch Pumpspeicherkraftwerken) verringert. Diese Entwicklung ist kontraproduktiv hinsichtlich der Investitionsbereitschaft in weitere Speicher und demgemäß auch hinsichtlich der Steigerung der F&E-Aufwendungen für neue Speichertechnologien. Beides wird aber dringend benötigt, spätestens in 10 Jahren, wenn die letzten Kernkraftwerke abgeschaltet werden und gleichzeitig die fluktuierende Einspeisung regenerativ erzeugten Stroms weiter angestiegen sein wird.

Speicher werden sowohl für individuelle Anwendungen (z. B. für die Eigenversorgung des mit PV ausgestatteten Eigenheims) als auch lokal und für die Stabilisierung des Gesamtsystems (z. B. für die Pufferung der Einspeisung eines Windparks) benötigt, stehen aber dabei im Wettbewerb zu alternativen Lösungen. Sie ermöglichen außerdem die Koppelung verschiedener Energiesektoren. Speicher werden so-

wohl für den Sekunden- und Minutenbereich (z.B. im Falle einer PV-Anlage bei einer vorüberziehenden Wolke) als auch für längere Zeiträume (z. B. bei tagelanger Windflaute und entsprechend geringer Einspeisung aus Windkraftanlagen) benötigt.

Für die Überbrückung längerer Zeiträume kommen gegenwärtig neben den in Deutschland nur begrenzt ausbaufähigen Pumpspeicherkraftwerken ausschließlich chemische Energiespeicher in Frage, insbesondere auf Basis der Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse. Im Sinne der Minimierung von Verlusten sollte mit überschüssigem Strom erzeugter Wasserstoff zunächst soweit als möglich direkt in stofflicher Form genutzt werden. Priorität hat hierbei der Einsatz in Industrieprozessen aufgrund der damit verbundenen höheren Wertschöpfung; hinzu kommt die Möglichkeit der Einspeisung in das Erdgasnetz entsprechend der existierenden Regelwerke.

Generell gehört auch die direkte Nutzung im mobilen Bereich in diese Kategorie; sie hat aber mit dem Problem der derzeit nicht ausreichend vorhandenen Wasserstoff-Infrastruktur und des noch geringdimensionierten Brennstoffzellen-Fahrzeugparks zu kämpfen.

Für darüber hinausgehende Mengen an regenerativ erzeugtem Wasserstoff existieren generell zwei verschiedene Möglichkeiten zur Umwandlung in andere chemische Energieträger: Die Herstellung von Brenn- und Kraftstoffen wie Methanol, Methan und höheren Kohlenwasserstoffen mit CO₂ als Kohlenstoffquelle sowie die reversible Bindung in chemischen Verbindungen (zum Beispiel mit aromatischen Kohlenwasserstoffen als LOHC) zur Nutzung des Wasserstoffs bei Bedarf.

Bei der Umsetzung zu Methan besteht der Vorteil, dass durch die Einspeisung in das Erdgasnetz die bestehende Infrastruktur genutzt werden kann. Aus heutiger Sicht lässt sich keine generelle Aussage dazu treffen, ob Wasserstoff, Methan, Methanol oder andere Verbindungen die am besten geeignete Speicherform darstellen; dies wird von der weiteren Entwicklung der Technologien und der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen abhängen.

4. HANDLUNGSBEDARF

Der Einsatz von unterirdischen Kavernen zur temporären Wasserstoffspeicherung wird aber voraussichtlich für alle diese Pfade erforderlich sein, um Produktionsspitzen zu puffern und eine kontinuierliche Führung der chemischen Prozesse zu erlauben.

Die Umsetzung von Wasserstoff mit CO, CO₂ oder auch N₂ als Reaktionspartner hat den großen Vorteil, dass sich dadurch zwei Nutzungsoptionen eröffnen: Sowohl im Sinne eines chemischen Speichers als auch zum Einsatz in der Chemieproduktion. Der Benchmark ist dabei durch die jeweilige Anwendung gegeben, zum Beispiel Benzin als potentiell durch Wasserstoff zu ersetzender Energieträger in der Elektromobilität.

Für alle diese Optionen nimmt die Erhöhung der Effizienz der Elektrolyse bei stark schwankender Last zusammen mit der Verringerung von deren Kosten die entscheidende Schlüsselrolle ein. Im Gegensatz zu den jeweils nachgelagerten chemischen Schritten kann keine Zwischenspeicherung den fluktuierenden Betrieb der Elektrolyse (kombiniert mit langen Stillstandzeiten) glätten, es sei denn, man wollte zusätzlich eine elektrochemische Stromspeicherung integrieren; damit sind höhere Kosten und eine höhere Komplexität verbunden. Aufgrund dieser systemimmanenten Randbedingungen müssen die Investitionskosten für die Elektrolyseanlagen soweit reduziert werden, dass sich die Wasserstoffproduktion auch in fluktuierendem Einsatz betriebswirtschaftlich sinnvoll darstellen lässt.

Als Alternative zu dieser Verwendung von Stromüberschüssen kommt neben der mechanischen nur die elektrochemische Speicherung in Frage. Für Batterien mit entsprechenden Kapazitäten sind jedoch noch erhebliche F&E-Anstrengungen erforderlich. Aufgrund ihrer einfachen Skalierbarkeit haben Redox-Flow-Batterien einen gewissen inhärenten Systemvorteil, wenn es um hohe Speicherkapazitäten beispielsweise für die Anwendung in Windparks geht.

Für die individuelle Anwendung wird der wartungsfreie Betrieb eine größere Rolle spielen. Batterien für den mobilen Bereich haben ihre eigenen Anforderungen. Wichtig ist hier

insb. eine hohe Speicherdichte und die Robustheit gegenüber Erschütterungen bis hin zur Sicherheit im Crashfall. Die Entwicklungen im Verkehrssektor hin zur Elektromobilität sind in die Überlegungen zu Stromspeichern innerhalb der Versorgungsnetze einzubeziehen, da hierdurch ein Batteriepool entsteht, der potentiell nutzbar wäre. Sowohl hierfür als auch für die Stromspeicherung in der individuellen Anwendung sind Forschungsanstrengungen zu kleineren Batteriesystemen in gleichem Maße erforderlich.

Die Umwandlung von Strom in Wärme (je nach Folgenutzung auf unterschiedlichem Temperaturniveau) und deren temporäre Speicherung sollte als weitere Alternative nicht vergessen werden. Wärmespeicher stellen eine potentiell wirtschaftlich attraktive Technologie dar, die bislang auch in Forschung und Entwicklung zu wenig Berücksichtigung fand.

Für alle Speicheroptionen, ob in mechanischer, chemischer, elektrochemischer oder thermischer Form, wird der theoretische, mehr aber noch der tatsächlich praktisch realisierbare Wirkungsgrad der Umwandlungsketten wichtig sein; das alles entscheidende Kriterium ist jedoch die Wirtschaftlichkeit. Die aktuellen Diskussionen zu den Kosten unserer Stromversorgung werden eher intensiver geführt werden müssen. Es wird daher am Ende entscheidend sein, nicht möglichst viel des gerade im Überschuss produzierten Stroms, sondern vielmehr einen hohen Anteil zu möglichst geringen Kosten speichern und nutzen zu können.

Der Einsatz von Speichertechnologien ist immer in direkter Konkurrenz zu anderen Anpassungsoptionen zu betrachten wie beispielsweise das Abregeln bzw. das Vorhalten von Erzeugerkapazitäten; diese Optionen sind letztlich bei der ökonomischen Analyse als Vergleichsmaßstab heranzuziehen.

Für die verschiedenen Speicheroptionen gilt es, rasch die Datenbasis für eine ökonomische Analyse zu schaffen. Ihr müssen realistische Annahmen zu Fluktuation des Angebots, zu Leistungsdaten im Langzeitbetrieb sowie zum Scale-up zugrunde liegen. Hierfür müssen gesamte Speicherketten in Pilot- und Demonstrationsvorhaben verstärkt etabliert und quantitativ beschrieben werden.

Potentiale der heute beschreibbaren Energiewandlungs- und Transportpfade (Strom, Gas, Wärme, Verkehr, industrielle Nutzung zum Beispiel in der Metallerzeugung und der chemischen Industrie) müssen dabei auch in ihren wechselseitigen Abhängigkeiten und den energetisch und wirtschaftlich vorteilhaften Möglichkeiten ihrer Kopplung berücksichtigt werden.

Öffentliche F&E-Förderprogramme müssen auf einen langfristigen technologischen Entwicklungshorizont ausgerichtet sein. Wesentliches Element künftiger forschungs- und technologiepolitischer Maßnahmen muss eine grundsätzliche Technologieoffenheit sein; dies gilt sowohl für einzelne Stufen der jeweiligen Wadlungskette als auch für deren optimale Verknüpfung im Gesamtsystem.

Angesichts des mittel- und langfristigen Bedarfs an Speichertechnologien für unterschiedlichste Einsatzbereiche muss die Förderung der Grundlagenforschung auch Anreize für die Entwicklung völlig neuer Ansätze bieten ebenso wie für die Aufklärung der zugrundeliegenden Mechanismen und ihrer Beeinflussung. Zusammenfassend haben folgende Themen Priorität in Forschung und Entwicklung:

- Kostengünstige Wasserelektrolyse mit der Fähigkeit zu effizientem Teillastbetrieb und mit ausreichender Dynamik
- Folgechemie des Wasserstoffs mit dem Entwicklungsziel eines wirtschaftlichen Betriebs in kleinerem Maßstab mit der Möglichkeit für einen dynamischen Betrieb
- Batterien in unterschiedlichen Größenordnungen, angepasst an die verschiedenen Einsatzgebiete
- Thermische Speicher für unterschiedliche Temperaturniveaus und ihr gesamtsystemischer Einsatz
- Ermittlung der Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Gesamt-Speicherketten (einschließlich der Ermittlung der hierfür nötigen Datenbasis)

5. Schlussanmerkung

Dieses Positionspapier stützt sich auf eine breit angelegte Beschreibung und Bewertung einer Vielzahl von Speicheroptionen, die von den Chemie-Organisationen DBG, DECHEMA, DGMK, GDCh, VDI-GVC und VCI unter Mitwirkung der DPG erarbeitet wurde [2]. Diese Studie wird in der Januar/Februar Ausgabe 2015 der Chemie Ingenieur Technik (CIT) publiziert.

6. Literaturverzeichnis

- [1] Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), „Die Energie der Zukunft“, 2014, Berlin, www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/fortschrittsbericht,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf (aufgerufen am 16.1.2015)
- [2] Ausfelder et al. „Energiespeicher als Element einer sicheren Energieversorgung“; Chem. Ing. Tech. 2015, 87, No. 1–2, 17–89. DOI: 10.1002/cite.201400183.

7. Autorenliste

Dr. Florian Ausfelder, Frankfurt am Main
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.
Deutsche Bunsen-Gesellschaft für physikalische Chemie e.V.

Dr. Christian Beilmann, Eggenstein-Leopoldshafen
Karlsruher Institut für Technologie

Dr. Sigmar Bräuninger, Ludwigshafen
BASF SE

Dr. Reinhold Elsen, Essen
RWE Generation SE

Dr. Erik Hauptmeier
RWE Generation SE

Prof. Dr. Angelika Heinzl, Duisburg
Universität Duisburg-Essen

Dr. Renate Hoer, Frankfurt am Main
GDCh Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.

Prof. Dr. Wolfram Koch, Frankfurt am Main
GDCh Gesellschaft Deutscher Chemiker e.V.

Dr. Falko Mahlendorf, Duisburg
Universität Duisburg-Essen

Dr. Anja Metzelthin, Bad Honnef
Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.

Dr. Martin Reuter, Frankfurt am Main
VCI Verband der Chemischen Industrie e.V.

Dr. Sebastian Schiebahn, Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH

Dr. Ekkehard Schwab, Ludwigshafen
BASF SE

Prof. Dr. Ferdi Schüth, Mülheim
Max-Planck-Institut für Kohlenforschung

Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten, Jülich
Forschungszentrum Jülich GmbH

Dr. Gisa Teßmer, Hamburg
DGMK Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl,
Erdgas und Kohle e.V.

Prof. Dr. Kurt Wagemann, Frankfurt am Main
DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik
und Biotechnologie e.V.

Dr.-Ing. Karl-Friedrich Ziegahn, Eggenstein-Leopoldshafen
Karlsruher Institut für Technologie
Deutsche Physikalische Gesellschaft e.V.,
Arbeitskreis Energie

Zum Inhalt:

Energiespeicher können einen Beitrag zur Stabilisierung des Energiesystems leisten. Neben den einzelnen Technologien, bieten sich auch vielfältige Verknüpfungsmöglichkeiten, die neue Potentiale erschließen. Dafür wird die Chemie einen wesentlichen Beitrag leisten können. In diesem aktuellen Positionspapier „Energiespeicher – der Beitrag der Chemie“ (Stand Januar 2015) zeigen die beteiligten Organisationen die Bedeutung der Verknüpfung von Chemie und Energie auf und identifizieren Forschungs- und Entwicklungspotentiale.