

# Die Rolle von Speichersystemen für eine 100 % erneuerbare Stromversorgung

Erkenntnisse aus Szenariostudien am Umweltbundesamt

HARRY LEHMANN, MARK NOWAKOWSKI

Bis zum Jahr 2050 muss Deutschland seine Treibhausgasemissionen drastisch reduzieren, um seinen Beitrag im Kampf gegen den globalen Klimawandel zu leisten. Ein wichtiger Baustein dabei ist die Umstellung der Stromversorgung auf Erneuerbare Energien. Einerseits ist dieser Sektor heute für etwa 40 % der energiebedingten Emissionen verantwortlich, andererseits sind hier die Minderungspotentiale besonders hoch. Das Umweltbundesamt konnte durch Untersuchungen an verschiedenen Szenarien zeigen, dass eine vollständig auf Erneuerbaren Energien basierende Stromversorgung Deutschlands im Jahr 2050 technisch und ökologisch machbar ist. Doch mittelfristig wird auch die Versorgung der Bereiche Wärme und Verkehr immer stärker regenerativ erfolgen. Während zunächst noch Netzausbau oder Lastmanagement die erforderliche Flexibilität im System sichern können, wird der Einsatz unterschiedlicher Speichersysteme bei hohen Anteilen Erneuerbarer Energien zunehmend unverzichtbar.

Deutschland hat mittlerweile einen Anteil von gut 25 % Erneuerbaren Energien an der Stromversorgung erreicht. Bis auf wenige Zeitpunkte extremer Einspeisespitzen kann der regenerativ erzeugte Strom genutzt und ins Stromsystem integriert werden. Stromspeicher sind heute deshalb noch nicht nötig, um das System zu stützen. Andere Flexibilitätsoptionen zur Angleichung von Stromangebot und -nachfrage sind zunächst aus unterschiedlichen Gründen sinnvoller – dazu gehören der Ausbau der Netzinfrac-

struktur, die Nutzung von Potentialen im Last- und Einspeisemanagement oder der Einsatz flexibler konventioneller Kraftwerke.

Anders sieht es aus, wenn der Anteil der Erneuerbaren Energien im Netz weiter steigt. Die Ziele der Bundesregierung sehen bis 2030 mindestens 50 und bis 2050 mindestens 80 % Erneuerbare im deutschen Strommix vor. Das Umweltbundesamt (UBA) hat mit mehreren Studien demonstriert, dass auch eine vollständig auf regenerativen Quellen basierende Stromversorgung unter verschiedenen Prämissen technisch und ökologisch machbar ist. Neuere Untersuchungen zeigen zudem, dass der Stromsektor vollständig CO<sub>2</sub>-neutral werden muss, wenn Deutschland seine Klimaschutzziele erreichen und bis 2050 den jährlichen Ausstoß von Treibhausgasen auf 80 bis 95 % der Emissionen von 1990 senken will. In solchen Energiesystemen wird der Einsatz von Speichern unvermeidlich zu einem integralen Teil der sicheren Energieversorgung.

## Drei „archetypische“ Szenarien

Zunächst wurden am UBA drei grundsätzlich verschiedene Szenarien für eine vollständig auf Erneuerbaren Energien basierende Stromversorgung in Deutschland bis zum Jahr 2050 entwickelt. Diese unterscheiden sich radikal in der Erzeugungsstruktur des Stroms voneinander sowie im Grad der Vernetzung und damit auch in den Anforderungen an Speichersysteme. Im Szenario „Lokale Autarkie“ versorgen sich kleinräumige, dezen-

trale Strukturen autark mit Strom und sind dabei untereinander und nach außen nicht vernetzt, importieren somit auch keinen Strom. Im Szenario „Regionenverbund“ hingegen findet ein deutschlandweiter Stromaustausch statt, wobei nur ein geringer Teil der Last über Stromimporte aus den Nachbarstaaten gedeckt wird. Das Szenario „Internationale Großtechnik“ wiederum beschreibt eine Stromversorgung Deutschlands, die auf den großtechnisch leicht erschließbaren deutschen, europäischen und europahanen Potentialen aller Erneuerbaren Energien und Speicherkraftwerke basiert. Ein erheblicher Anteil des deutschen Strombedarfs wird dabei über ein gut ausgebautes interkontinentales Übertragungsnetz importiert.

Diese drei „archetypischen“ Szenarien spannen gemeinsam einen Lösungsraum für eine regenerativ basierte Stromversorgung Deutschlands im Jahr 2050 auf und stellen darin Extrempunkte dar. Das UBA zeigt damit, dass es nicht nur einen technisch-ökologisch gangbaren Weg zur Erreichung dieses Ziels gibt, sondern viele mögliche Varianten, je nach politischer und gesellschaftlicher Prioritätensetzung. Tatsächlich werden in einem zukünftigen Energieversorgungssystem Deutschlands und Europas voraussichtlich Elemente aller drei Szenarien nebeneinander existieren.

### · Szenario „Regionenverbund“

Die Analysen zum Szenario „Regionenverbund“ in der Studie „Energieziel 2050: 100 % Strom aus erneuerbaren Quellen“ (2010) haben gezeigt, dass eine Vollversorgung mit Erneuerbaren Energien bis 2050 möglich ist. In diesem Szenario nutzen alle Regionen Deutschlands ihre Potentiale der Erneuerbaren Energien weitgehend und optimal aus und sind über ein gut ausgebautes Stromübertragungsnetz miteinander verbunden. Durch effiziente Stromnutzung in allen Sektoren lassen sich auch eine moderate gesamtwirtschaftliche Entwicklung sowie der wachsende Verbrauch durch Elektromobilität und Wärmepumpen kompensieren.

Für den Ausgleich zwischen Last und Erzeugung sorgen verschiedene Flexibilitätsoptionen. Eine davon ist die gezielte Verschiebung großer Verbrauchslasten von Zeiten starker Stromnachfrage hin zu Zeiten hohen Angebots, das sogenannte Lastmanagement. Dieses wirkt an sich wie ein „virtueller“ Stromspeicher, der auch nichts anderes tut, als elektrische Energie in Perioden des Überangebots einzuspeichern und bei Bedarf wieder zur Verfügung zu stellen, ist dabei jedoch deutlich günstiger realisierbar. Ähnlich wie das Lastmanagement eignen sich Pumpspeicherkraftwerke zur kurzfristigen Überbrückung von Differenzen zwischen dem fluktuierenden regenerativen Stromangebot und der Nachfrage im Ein- und Mehrtagesbereich.

Allerdings treten etwa im Winter, wenn die Sonne wenig scheint, bisweilen Windflauten auf, die mehrere Wochen andauern können. Für solche Fälle sind Langzeitspeicher nötig, die Einspeiseschwankungen im Mehrtages-, Monats- oder Jahresbereich ausgleichen können. Da die Potentiale für Pumpspeicher in Deutschland begrenzt sind (40 GWh im untersuchten Szenario), bieten sich hierfür chemische Speicher wie Wasserstoff oder Methan an. Dabei wird mittels Elektrolyse elektrische in chemische Energie umgewandelt und ist in dieser Form für lange Zeiträume speicherbar und zudem gut transportabel. Das Verfahren wird „Power to Gas“ genannt und inzwischen bereits im industriellen Maßstab erprobt. Das so erzeugte Methan lässt sich einerseits in der schon bestehenden Speicherinfrastruktur für Erdgas lagern und bei Bedarf in hocheffizienten Gaskraftwerken wieder in Strom und Wärme zurückwandeln (vgl. Abb. 1). Alternativ kann es auch direkt zur Wärmegegewinnung oder im Verkehrssektor verwendet werden, wo es fossile Brenn- und Kraftstoffe ersetzt. Im Rahmen der Studie stellt die existierende Erdgasinfrastruktur ein Speicherpotential von gut 200 TWh zur Verfügung, was bei vollständiger Rückverstromung etwa 128 TWhel entspricht. Zum Vergleich: der jährliche Gesamtstromverbrauch Deutschlands, der für 2050 angenommen wurde, liegt bei 506 TWh.



## ■ DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS

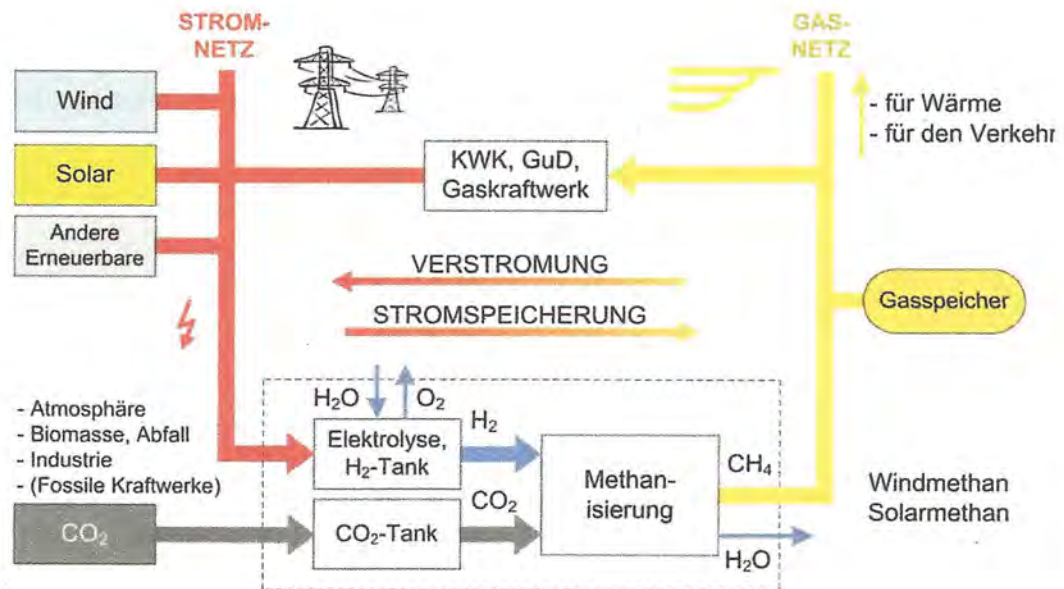


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Power-to-Gas-Technik und Einbindung ins Energiesystem  
 (Quelle: Sterner, Michael: Bioenergy and renewable power methane in integrated 100% renewable energy systems. Kassel 2009, S. 106)

Für das Stromsystem wird diese Technik bzw. großtechnische Speicherverfahren im Allgemeinen aus heutiger Sicht erst bei einem Anteil von etwa 70 bis 80 % Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch benötigt bzw. dann, wenn die Stromerzeugung überwiegend aus fluktuierenden regenerativen Energien (insbesondere Wind- und Solarkraft) stammt. Nach den derzeitigen Plänen der Bundesregierung wäre das ab etwa 2040 der Fall. In einigen Regionen können allerdings schon früher Situationen auftreten, in denen die örtlichen Verteilnetze die großen Strommengen nicht mehr aufnehmen können, so dass dort der Einsatz solcher Techniken bereits in wenigen Jahren sinnvoll sein wird. Hier kann die Power-to-Gas-Technik als gut regelbarer Verbraucher eingesetzt werden, auf diese Weise Regelenergie zur Verfügung stellen und somit zur Netzentlastung beitragen.

### Szenario „Lokale Autarkie“

In der Studie „Modellierung einer vollständig auf Erneuerbaren Energien basierenden Stromerzeugung im Jahr 2050 in autarken, dezentralen Struk-

turen“ (2013) wurden exemplarisch Gemeinden im ländlichen Raum sowie Stadtteile in verschiedenen Regionen Deutschlands modelliert. Diese versuchen ihren Strombedarf ausschließlich mit den vor Ort vorhandenen Potentialen Erneuerbarer Energien autark zu decken. Da jedoch keine Verbindung mehr zum Übertragungsnetz besteht, fällt der großräumige Ausgleich zwischen Nachfrage und regenerativer Stromerzeugung wie im Szenario „Regionenverbund“ als Flexibilitätsoption weg. Die Notwendigkeit für Elektrizitätsspeicher steigt in diesem Szenario stark an, wie die Simulationen gezeigt haben. Trotz einer höheren Ausnutzung der Potentiale insbesondere der Solarenergie und gesteigerten Annahmen zur Effizienz im Vergleich zum „Regionenverbund“ sind die Ergebnisse teils ernüchternd: Der Stromverbrauch der Haushalte und der Elektromobilität für die ländliche Siedlungsstruktur kann zwar gedeckt werden, allerdings ist der ermittelte Speicherbedarf immens. In Süddeutschland muss dazu sowohl bezüglich der installierten Erzeugungs- als auch der Speicherleistung ein höherer Aufwand betrieben werden als in Norddeutschland. Das liegt an den niedrigeren Potentialen für Windkraftenerzeugung im Süden, die

jedoch die größeren Beiträge zur Lastdeckung leisten kann. In den modellierten Stadtvierteln hingegen kann eine autarke Versorgung unter den getroffenen Annahmen in keinem Fall dargestellt werden, weil es innerstädtisch normalerweise gar nicht die Möglichkeit gibt, Windkraftanlagen zu installieren. Wird der Strombedarf von Gewerbe und Industrie mit betrachtet, der mit einer der Einwohnerzahl entsprechenden Zahl an bereitzustellenden Arbeitsplätzen einhergeht, kann eine autarke Stromversorgung auch in den Gemeinden im ländlichen Raum nicht erreicht werden.

Dieses dezentrale Extremszenario erweist sich somit als wenig hilfreich, um ganz Deutschland in Zukunft mit Strom aus erneuerbaren Quellen zu versorgen, auch wenn in Einzelfällen unter günstigen Bedingungen eine autarke Versorgung realisierbar sein mag. Es zeigt gleichzeitig, dass neben der lokalen regenerativen Erzeugung ein gut ausgebautes Transportnetz für Strom ein wesentlicher Bestandteil zum Erreichen einer vollkommen regenerativen Energieversorgung für Deutschland sein muss. Einerseits lassen sich damit großräumige Ausgleichseffekte bei der zeitlich und räumlich fluktuierenden Einspeisung aus erneuerbaren Quellen vorteilhaft nutzen, so dass sich der Speicherbedarf verringert. Andererseits lassen sich so Unterschiede in der räumlichen Verteilung der Potentiale der Erneuerbaren überwinden wie etwa die Verfügbarkeit von hohen Windpotentialen in Norddeutschland bei gleichzeitiger Konzentration der Verbrauchszentren in Süd- und Westdeutschland.

### Szenario „Internationale Großtechnik“

Das andere Extrem, nämlich eine stark zentralisierte Stromversorgung Deutschlands durch über Europa und die angrenzenden Regionen verteilte großtechnische Erzeugungsstrukturen, betrachtet die Untersuchung „Vollständig auf Erneuerbaren Energien basierende Stromversorgung Deutschlands im Jahr 2050 auf Basis in Europa großtech-

nisch leicht erschließbarer Potentiale – Analyse und Bewertung anhand von Studien“ (2014). Hier wird angenommen, dass bis zum Jahr 2050 ein erheblicher Anteil des deutschen Strombedarfs (deutlich mehr als 10 %) durch Nettostromimporte gedeckt wird. Der importierte Strom wird in dieser Vision an den besten verfügbaren Standorten in großtechnischen und oftmals verbrauchsfernen Erneuerbare-Energien-Anlagen erzeugt. Die Philosophie dahinter ist, dass in vielen Regionen deutlich bessere Bedingungen etwa für die Stromgewinnung aus Wind und Sonne herrschen als in Deutschland. Die Nutzung solcher Potentiale könnte wirtschaftlicher sein als der Versuch, den gesamten deutschen Bedarf aus heimischen Quellen zu decken. Voraussetzung für diesen Ansatz ist ein europaweit ausgebautes und im Vergleich zu heute deutlich verstärktes Übertragungsnetz nebst entsprechend erweiterten Verbindungsleitungen zwischen Deutschland und seinen Nachbarn, das die Erzeugungsschwerpunkte mit den Verbrauchszentren verbindet.

Der möglicherweise wichtigste Vorteil einer solchen Importstrategie, der in der Analyse identifiziert werden konnte, betrifft den Speicherbedarf. Dieser könnte deutlich unter demjenigen einer nationalen Selbstversorgungsstrategie liegen, wie sie im Szenario „Regionenverbund“ skizziert ist. Zurückzuführen ist das auf mögliche Synergieeffekte bei der optimalen Nutzung der Erneuerbaren Energien sowie dem großräumigen Ausgleich zwischen ihrer fluktuierenden Einspeisung und der Last über die Netzinfrastruktur.

Das Ziel: Treibhausgasneutrales Deutschland 2050  
Bis zum Jahr 2050 müssen hochentwickelte Industrieländer wie Deutschland ihre Emissionen um etwa 80 bis 95 % gegenüber 1990 reduzieren und damit nahezu treibhausgasneutral werden, wenn der globale Temperaturanstieg durch den Klimawandel auf maximal 2 °C gegenüber dem vorindustriellen Zeitalter beschränkt werden soll. In seiner aktuellen Studie „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (2014) zeigt das UBA, dass eine Minderung um 95 % und damit ein



## ■ DIE TRANSFORMATION DES ENERGIESYSTEMS

jährlicher Pro-Kopf-Ausstoß von einer Tonne CO<sub>2</sub>-Äquivalenten technisch möglich ist. Es wurde ein Szenario entworfen, in das alle relevanten Emissionsquellen einbezogen wurden. Das schließt neben dem kompletten Energiesektor (Strom- und Wärmeversorgung sowie Verkehr) auch die Industrie, Abfallwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft sowie Landnutzungsänderungen ein. Da einige der Sektoren wie etwa die Landwirtschaft und bestimmte industrielle Prozesse nicht in der Lage sind, ihre Treibhausgasemissionen auf null zu senken, wird es nötig, die komplette Energieversorgung vollständig treibhausgasneutral zu gestalten. Wie das für den Stromsektor und Teile des Wärme- und Verkehrssektors funktionieren kann, wurde bereits anhand der vorgestellten „archetypischen“ Szenarien gezeigt. Bei einer übergreifenden Betrachtung zeigt sich, dass es nicht sinnvoll ist, die heute übliche Trennung zwischen den verschiedenen Sektoren aufrechtzuerhalten. Es wird immer stärker zu einer sogenannten Sektorkopplung kommen, bei der regenerative Quellen zunehmend nicht nur

Strom und Wärme liefern, sondern auch die Grundstoffe für Treibstoffe im Verkehr sowie chemische Prozesse bereitstellen.

Der in der Studie gewählte Ansatz hierzu ist abermals die Power-to-Gas-Technik, bei der Strom aus erneuerbaren Quellen nicht nur direkt für Stromanwendungen verbraucht wird, sondern gleichzeitig die Primärressource für die weiteren Sektoren darstellt. Aus dem in der Elektrolyse gewonnenen Wasserstoff lassen sich dann durch weitere chemische Verfahren zum Beispiel Brenn- und Kraftstoffe herstellen (vgl. Abb. 2). Gleichzeitig kann der Wasserstoff direkt als Ausgangsstoff für die chemische Industrie dienen, etwa in der heute noch auf fossilen Energieträgern basierten Herstellung von Stickstoff-Düngemitteln.

Bei einigen Verkehrsträgern, wie z.B. dem Flugzeug, ist die Bereitstellung von Strom basierten Treibstoffen aus Erneuerbaren Energien die einzige Möglichkeit eine Klimaneutralität zu erreichen.

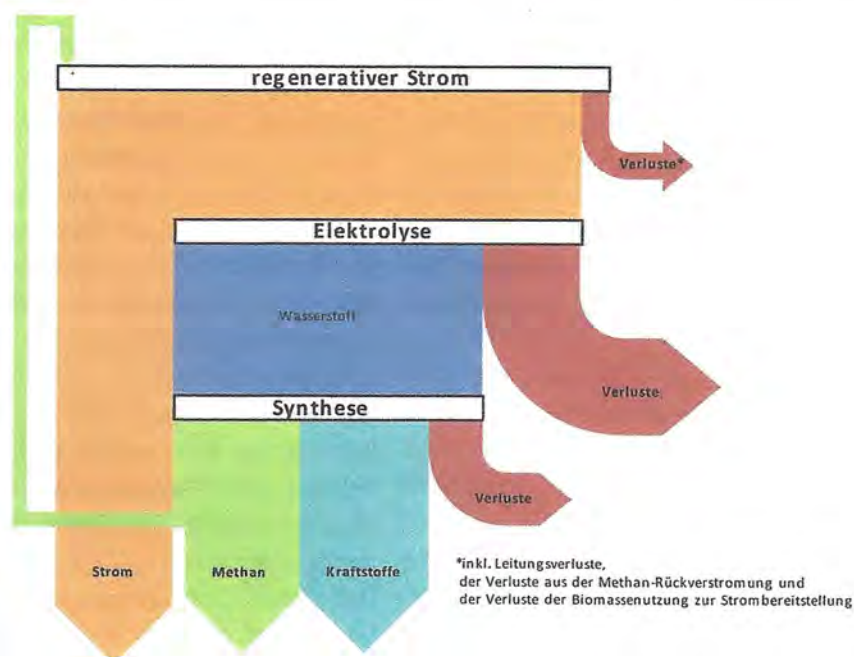


Abbildung 2: Schematische Darstellung des Energieflusses im UBA-Szenario THGN D 2050 „Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050“ (Quelle: Umweltbundesamt, Hg.: Treibhausgasneutrales Deutschland im Jahr 2050. Dessau-Roßlau 2014. S. 88)

Dabei wird man mittels Power-to-Liquid Verfahren flüssige Treibstoffe produzieren, die die heutigen Treibstoffe schrittweise ersetzen können.

### Schlussfolgerungen

Die vorgestellten Szenariostudien des Umweltbundesamtes zeigen, dass Speicher in einem zukünftigen Strom- und Energiesystem, das zu wesentlichen Teilen auf Erneuerbaren Energien basiert, eine wichtige Rolle bei der Gewährleistung der Versorgungssicherheit auf dem heute gewohnten hohen Niveau spielen werden.

Neben Kurzzeitspeichern wie Akku-Batterien und Pumpspeichern ist es nötig, Konzepte für eine Langzeitspeicherung weiterzuentwickeln wie die vorgestellte Power-to-Gas-Technik. Gemeinsam mit anderen Flexibilitätsoptionen ist es dadurch möglich, große Anteile Erneuerbarer Energien ins

Strom- und Energiesystem zu integrieren. Beim zunehmenden Einsatz innovativer Speichersysteme sind allerdings auch umwelt- und ressourcenbezogene Aspekte zu beachten. Der Ausbau und die Unterhaltung von Speichersystemen für Erneuerbare Energien gehen je nach Speichertechnik mit signifikanten Rohstoffströmen z. B. an strategischen Metallen und Industriemineralien einher, die eine hohe Umweltrelevanz oder begrenzte Verfügbarkeiten aufweisen. Beispiele sind Lithium, Kobalt, Vanadium, Silber, Kupfer und Neodym. Die Rohstoffverfügbarkeit, die Recyclingmöglichkeiten sowie übergreifende Betrachtungen zu Umweltauswirkungen müssen daher bei der Entwicklung einer Speicherstrategie stets mit bedacht werden.

*Alle im Artikel genannten Studien stehen im Internet unter [www.uba.de](http://www.uba.de) zum Download bereit.*



*Dr. Harry Lehmann, WCRE-Vorsitzender, Umweltbundesamt*

*Kontakt: [harry.lehmann@uba.de](mailto:harry.lehmann@uba.de)*

*Mark Nowakowski, Umweltbundesamt*

*Kontakt: [mark.nowakowski@uba.de](mailto:mark.nowakowski@uba.de)*