

Ariadne-Hintergrund

Welche Rolle spielen Speicher in der Energiewende?

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

KOPERNIKUS
Ariadne **PROJEKTE**

Die Zukunft unserer Energie

Autorinnen und Autoren



» Dr. Wolf-Peter Schill
Deutsches Institut für
Wirtschaftsforschung



» Dr. Anna Billerbeck
Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung



» Alexander Burkhardt
Fraunhofer-Institut für System-
und Innovationsforschung



» Prof. Dr. Lion Hirth
Hertie School



» Dr. Dana Kirchem
Deutsches Institut für
Wirtschaftsforschung



» Dr. Alexander Roth
Deutsches Institut für
Wirtschaftsforschung

Herausgegeben von

Kopernikus-Projekt Ariadne
Potsdam-Institut für Klimafolgen-
forschung (PIK)
Telegrafenberg A 31
14473 Potsdam

März 2025

Dieses Papier zitieren:

Wolf-Peter Schill, Anna Billerbeck, Alexander Burkhardt, Lion Hirth, Dana Kirchem,
Alexander Roth (2025): Welche Rolle spielen Speicher in der Energiewende?
Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam.
DOI 10.48485/pik.2025.004

Kontakt zum Autor: Wolf-Peter Schill, wschill@diw.de

Der vorliegende Ariadne-Hintergrund wurde von den oben genannten Autorinnen und Autoren des Ariadne-Konsortiums ausgearbeitet. Die Analyse spiegelt nicht zwangsläufig die Meinung des gesamten Ariadne-Konsortiums oder des Fördermittelgebers wider. Die Inhalte der Ariadne-Publikationen werden im Projekt unabhängig vom Bundesministerium für Bildung und Forschung erstellt.

Welche Rolle spielen Speicher in der Energiewende?

Energiewende und Speicher. Wenn über die Energiewende gesprochen wird, tauchen schnell Fragen zu Speichern auf. Welche Technologien gibt es, wie viele Speicher werden gebraucht und sind fehlende Speicher am Ende ein Problem für die Energiewende? Mit diesem Erklärtext wollen wir ein wenig Orientierung schaffen. Wir erläutern, warum fluktuierende Erneuerbare Energien einen zunehmenden Bedarf für Flexibilität zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage im Energiesystem schaffen, welche Arten von Energiespeichern hierfür zur Verfügung stehen, und wie sie mit anderen Technologien interagieren.

Wachsende Rolle fluktuierender Erneuerbarer Energien

Erneuerbarer Strom als zentraler Energieträger. Ein Eckpfeiler der Energiewende ist der massive Ausbau der erneuerbaren Stromerzeugung. Damit wird nicht nur der heutige Stromsektor dekarbonisiert, sondern gleichzeitig soll über die sogenannte Sektorenkopplung erneuerbarer Strom auch in der Wärmeversorgung, dem Verkehrssektor und der Industrie genutzt werden und dort fossile Kraft- und Brennstoffe ersetzen (Luderer et al. 2025).

Wachsende Rolle von Wind- und Solarenergie. Die Potenziale für regelbare Erneuerbare Energien wie Wasserkraft oder Bioenergie sind in Deutschland begrenzt. Dagegen gibt es sehr große Ausbaumöglichkeiten für die fluktuierende Wind- und Solarenergie. Diese Technologien werden in den meisten Klimaneutralitätsszenarien langfristig zur wichtigsten Primärenergiequelle (Kopernikus-Projekt Ariadne 2021; Luderer et al. 2025).

Zunehmend schwankendes Stromangebot. Die Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie fluktuiert stark, sowohl im Tagesverlauf als auch saisonal (Abbildung 1). Die Photovoltaik (PV) erzeugt vor allem in den Mittagsstunden des Sommerhalbjahrs regelmäßig Strom. Windkraftanlagen können dagegen im Winterhalbjahr mehr Energie liefern, ihre Stromerzeugung ist jedoch unregelmäßigeren und längerfristigen Schwankungen unterworfen, bis hin zu mehrwöchigen Extremereignissen mit geringer Erzeugung (Ohlendorf und Schill, 2020).

Fluktuierende Nachfrage. Nicht nur das erneuerbare Stromangebot schwankt, sondern auch die Nachfrage (vgl. ebenfalls Abbildung 1). Typischerweise ist der Stromverbrauch tagsüber höher als in der Nacht, mit einer Spitze in den Abendstunden. Zudem ist die Stromnachfrage in Deutschland im Winter höher als im Sommer. Diese saisonalen Unterschiede werden sich künftig noch deutlich verstärken, wenn im Zuge der Sektorenkopplung der Strombedarf für die Wärmeversorgung steigt.

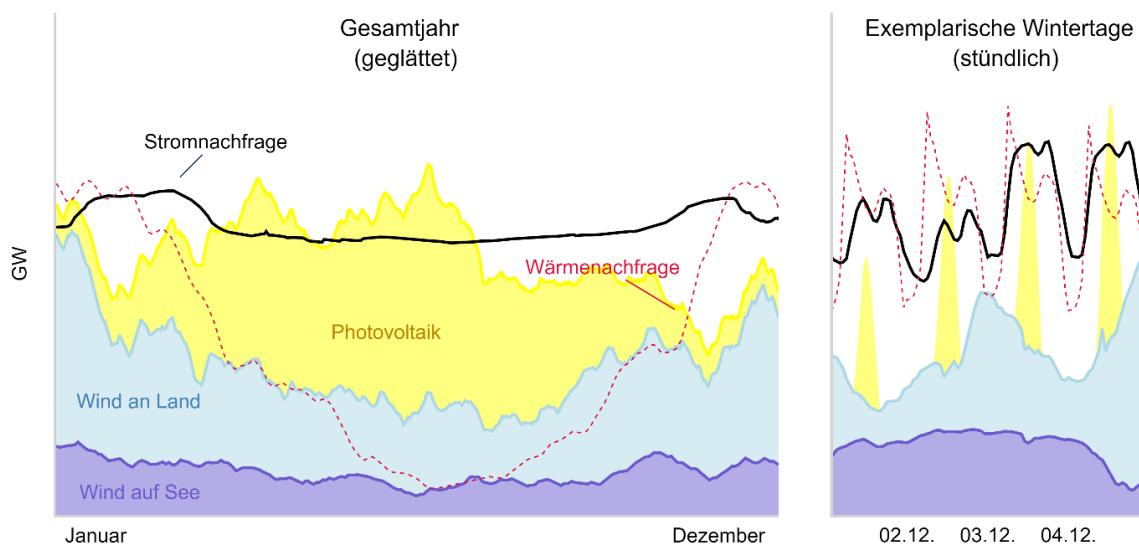


Abbildung 1: Stilisierte Darstellung der Fluktuationen von Wind- und Solarenergie sowie von Strom- und Wärmenachfrage. Notiz: Die Abbildung zeigt kein optimiertes Modellszenario, sondern skalierte historische Zeitreihen. Quelle: Eigene Darstellung

Flexibilität im Energiesystem wird wichtiger

Ausgleich von Angebot und Nachfrage erforderlich. Um das zunehmend schwankende Stromangebot mit der Nachfrage in Einklang zu bringen, wird Flexibilität im Stromsystem immer wichtiger. Die künftigen Flexibilitätsbedarfe und verschiedene Optionen für ihre Bereitstellung wurden bereits in zwei eingehenden Ariadne-Analysen mit den Zeithorizonten 2030 bzw. 2045 untersucht (Gillich et al. 2024; Jürgens et al. 2024). Unter dem Begriff Flexibilität verstehen wir alle Technologien oder Maßnahmen, die helfen, Angebot und Nachfrage in Einklang zu bringen. Einen Bedarf hierfür gibt es auf verschiedenen Zeitskalen: Dies reicht vom Ausgleich kurzfristiger Abweichungen zwischen geplanter und tatsächlicher Erzeugung über die Aufnahme von PV-Stromüberschüssen während der Mittagsstunden bis hin zum Ausgleich saisonaler oder gar

mehrfähriger Ungleichgewichte (d.h. extremer Wetterjahre mit z.B. ungewöhnlich viel oder wenig Strom aus Windkraft). Der notwendige Ausgleich täglicher und saisonaler Schwankungen durch Kurz- oder Langfristspeicher ist in Abbildung 2 illustriert. Die Speicher nehmen erneuerbaren Strom auf, wenn das Angebot die Nachfrage übersteigt, und geben ihn wieder ab, wenn die Nachfrage das Angebot übersteigt. Eine besondere Herausforderung ist dabei die Kombination aus hoher Stromnachfrage und längeren Phasen geringer Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie, auch „Dunkelflaute“ genannt (Kittel et al. 2024).

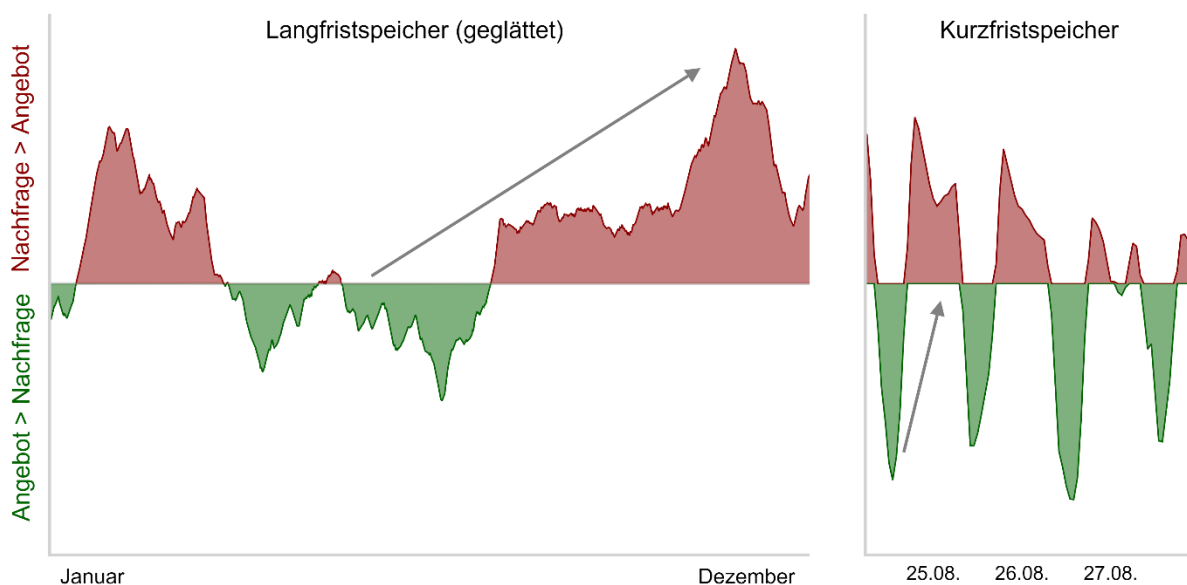


Abbildung 2: Exemplarisches Verhalten von Langfrist- und Kurzfristspeichern zum Ausgleich von Angebot und Nachfrage auf verschiedenen Zeitskalen. Quelle: Eigene Darstellung

Viele Optionen für Flexibilität. Es stehen viele technische Optionen zur Verfügung, mit denen Angebot und Nachfrage im Energiesystem in Einklang gebracht werden können (Gillich et al. 2024; Jürgens et al. 2024). Dabei lassen sich diese in räumliche und zeitliche Flexibilitätsoptionen unterscheiden. Erstere gleichen Schwankungen von Angebot und Nachfrage durch regionalen oder internationalen Stromaustausch aus. Dadurch sinkt der Bedarf für Energiespeicher und gleichzeitig verbessern sich die Nutzungsmöglichkeiten von Speichern, die an bestimmten Orten im Gesamtsystem vorhanden sind (Roth und Schill 2023). Als zeitliche Flexibilitätsoptionen stehen verschiedene Technologien und Typen von Strom-, Wärme- und Wasserstoffspeichern zur Verfügung, die im Folgenden im Fokus stehen (Abbildung 3).

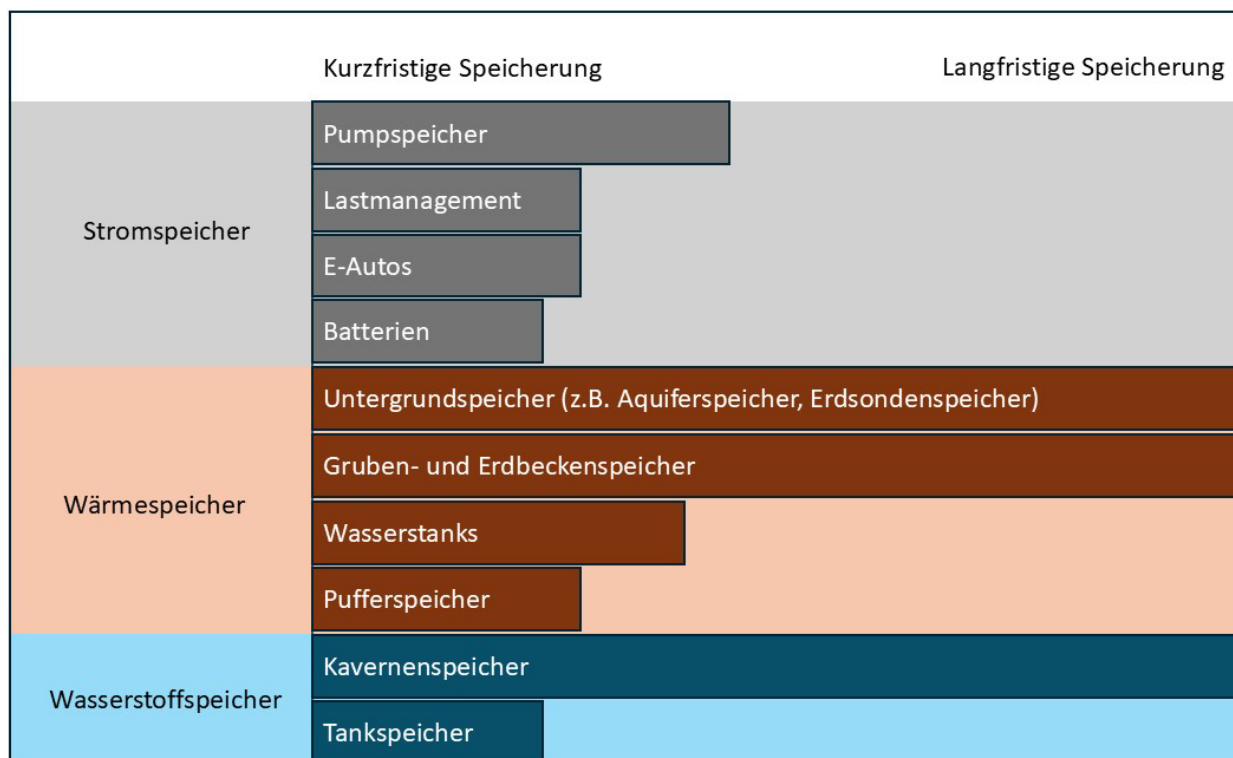


Abbildung 3: Speichertechnologien nach Typen und typischer Speicherdauer. Die Begriffe „kurzfristig“ und „langfristig“ sind nicht scharf definiert; mit Kurzfristspeichern sind hier typischerweise solche mit Speicherdauern von wenigen Stunden gemeint, mit Langfristspeichern solche mit Wochen oder gar Monaten.
Quelle: Eigene Darstellung

Technologien und Einsatzbereiche von Energiespeichern

Stromspeicher. Es gibt ein breites Portfolio von Stromspeichertechnologien. Ihr wesentliches Merkmal ist, dass sie elektrischen Strom aufnehmen und zu einem späteren Zeitpunkt wieder elektrischen Strom abgeben. Dabei gibt es große Unterschiede bei der Art der Energiespeicherung (z.B. elektrochemisch, chemisch, Lageenergie), den Kosten für Energie und Leistung, den Wirkungsgraden und der Skalierbarkeit (Roth und Schill 2025). Technologien, bei denen die Ein- und Ausspeicherleistung (Megawatt) eher günstig und die Energiespeicherkapazität (Megawattstunden) eher teuer sind, werden typischerweise als Kurzfristspeicher genutzt. Dazu gehören zum Beispiel Lithium-Ionen-Batteriespeicher, die in der Regel für eine Ausspeicherdauer von wenigen Stunden ausgelegt werden. Verhält es sich genau andersherum, werden die Technologien eher als längerfristige Speicher genutzt (z.B. große Pumpspeicher). Hinzu kommen sogenannte funktionale Stromspeicher, beispielsweise Maßnahmen zur Last-

flexibilisierung in der Industrie. Sie wirken im Energiesystem genau wie ein Stromspeicher, nutzen dabei aber verschiedene Arten von (Zwischen-)Produktspeichern, die es erlauben, den Strombezug von Produktionsprozessen der Verfügbarkeit von Strom anzupassen. Auch Elektrofahrzeuge können als verteilter Stromspeicher dienen, wenn sie nicht nur flexibel geladen werden, sondern auch Strom in das Netz zurückspeisen können (Vehicle-to-Grid, V2G).

Wärmespeicher. Wärmespeicher dürften zukünftig eine wichtige Rolle in der Energieversorgung von Industrie, Haushalten und Wärmenetzen spielen, indem sie Wärmeenergie speichern und bei Bedarf wieder abgeben. Mit zunehmender Elektrifizierung der Wärmeversorgung, beispielsweise durch Wärmepumpen, können Wärmespeicher auch vermehrt Flexibilität für das Stromsystem bieten. Beispielsweise kann in Stunden mit erneuerbarem Stromüberschuss Wärme erzeugt und gespeichert werden. In Stunden mit Stromknappheit und hohem Wärmebedarf kann diese Wärme wieder ausgespeichert werden, was das Stromnetz entlastet. Die Wärmespeicherung erfolgt meist, indem Wasser erhitzt und in isolierten Tanks, Gruben oder im Untergrund gespeichert wird. Es ist aber auch möglich, Wärme in anderen Materialien zu speichern, beispielsweise bestimmten Mineralien oder Salzen. In der Industrie ermöglichen Wärmespeicher eine effizientere Nutzung von Prozesswärme und helfen, Spitzenwärmelasten auszugleichen. In Haushalten werden sie oft in Form von Warmwasserspeichern eingesetzt, um den Energieverbrauch zu optimieren und eine konstante Temperatur zu gewährleisten. In Wärmenetzen können große Wärmespeicher genutzt werden, um Wärme aus zentralen Kraftwerken oder erneuerbaren Energiequellen längerfristig zu speichern und bedarfsgerecht an die angeschlossenen Gebäude zu verteilen. Wärmenetze sind gemeinsam genutzte Heizsysteme aus unterirdischen Rohrleitungen zur Versorgung mehrerer Gebäude in einer Stadt oder einem Quartier.

Wasserstoffspeicher. Wasserstoff und seine Derivate werden vor allem für die Dekarbonisierung der Industrie und Teile des Verkehrssektors benötigt sowie perspektivisch auch für Langfriststromspeicher mit Ausspeicherdauern von mehreren Wochen oder gar Monaten. Für letzteres muss Wasserstoff mithilfe entsprechender Kraftwerke (ggf. auch in Kombination mit Kraft-Wärme-Kopplung) wieder in Strom umgewandelt werden. In Hybridanwendungen, wie zum Beispiel der industriellen

Dampferzeugung (mit Heizwerken und Elektrodenkesseln), können damit, ähnlich wie mit Wärmespeichern, auch der Strommarkt und das Stromnetz entlastet werden. Kurzfristig kann Wasserstoff dafür in Hochdrucktanks zwischengespeichert werden. Für die mittel- und langfristige Wasserstoffspeicherung bietet sich die Umnutzung bestehender Untergrund-Erdgasspeicher oder der Bau neuer Untergrundspeicher an. Salzkavernen (aus natürlichen Salzstöcken gewonnene Hohlräume) eignen sich nach derzeitigem Kenntnisstand am besten für die Speicherung großer Wasserstoffmengen. Die Speicherkapazität einer Kaverne ist allerdings für Wasserstoff deutlich geringer als für Erdgas, da Wasserstoff eine geringere volumetrische Energiedichte hat. Sehr hohe Potenziale für Salzkavernen gibt es in Nordwest- und Mitteldeutschland, teils in geografischer Nähe zu den industriellen Bedarfszentren für Wasserstoff. Laut Nationalem Wasserstoffrat (2021) kann die Umrüstung einer Salzkaverne von Erdgas zu Wasserstoff fünf bis sechs Jahre dauern. Ein Neubau dürfte nach heutigem Kenntnisstand noch einmal deutlich länger dauern. Ein Vorteil der Umrüstung bestehender Untergrund-erdgasspeicher besteht in der bereits vorhandenen Anbindung an das Erdgasnetz, das auf die Nutzung von Wasserstoff umgerüstet werden kann.

Speicherung von Wasserstoff-Derivaten. Während derzeit die Speicherung von komprimiertem Wasserstoff als günstigste Technologie gilt, könnte er auch in Form verschiedener flüssiger bzw. leicht verflüssigbarer Derivate günstig in großen Tanks gespeichert werden. Diskutierte Optionen hierfür sind die Erzeugung und Speicherung von Methanol, Ammoniak oder flüssigen organischen Wasserstoffträgern (vgl. Brown und Hampp 2023). Auch diese wasserstoffbasierten Energieträger könnten langfristig für den Ausgleich seltener Lastspitzen eingesetzt werden und dabei saisonale oder gar mehrjährige Ungleichgewichte zwischen Angebot und Nachfrage ausgleichen. Zuletzt wurde mit Hilfe von Wasserstoff reduziertes Eisen als alternative langfristige Speicher- sowie Transportoption für Erneuerbare Energien diskutiert (Neumann et al. 2023). Diese Technologie scheint aber noch weiter von der Marktreife entfernt.

Fließende Grenzen der Kategorisierung. Die Grenzen zwischen verschiedenen Speichertypen sind manchmal fließend. Beispielweise können Wasserstoffspeicher ein wichtiger Teil von Langfrist-Stromspeichern sein. Bei batterieelektrischen Fahrzeugen wiederum handelt es sich zunächst einmal um potenziell flexible Stromverbraucher

(gesteuerte Aufladung der Fahrzeugbatterien); im Fall eines bidirektionalen Ladens (Rückspeisung ins Stromnetz, V2G) wird zumindest ein Teil der Fahrzeugbatterie jedoch zum Stromspeicher im eigentlichen Sinne.

Bedarf und Wechselwirkungen verschiedener Technologien

Interaktionen zwischen Flexibilitätstechnologien. Grundsätzlich interagieren im Energiesystem alle Flexibilitätsoptionen miteinander (vgl. auch Jürgens et al. 2024). Dies gilt insbesondere für räumliche und zeitliche Flexibilitäten, aber auch für verschiedene Arten von Speichern. Je mehr Flexibilität eine Technologie bereitstellt, desto weniger werden grundsätzlich andere Optionen benötigt. Daher kann beispielsweise die Frage, wie viel Stromspeicher künftig benötigt werden, nur sinnvoll beantwortet werden, wenn gleichzeitig eine Aussage über das Vorhandensein anderer Flexibilitätstechnologien getroffen wird. Allerdings können sich die meisten Technologien gegenseitig nur teilweise ersetzen.

Große Konkurrenz bei kurzfristiger Flexibilität. Vor allem im Bereich der Technologien, die eher kurzfristige Flexibilität bereitstellen, gibt es theoretisch ein sehr großes Angebot. Dazu gehören nicht nur Batteriespeicher, sondern auch diverse Möglichkeiten zur Verschiebung der Nachfrage in der Industrie und im Gewerbe, die optimierte Be- und Entladung von Elektrofahrzeugen sowie Wärme-Pufferspeicher. Die Hebung dieser nachfrageseitigen Flexibilitäten dürfte stark von der künftigen Ausgestaltung von Marktdesign und Regulierung abhängen.

Weniger Optionen bei langfristiger Speicherung. Für die Überbrückung längerer Dunkelflauten oder den saisonalen Ausgleich von Stromangebot und -nachfrage zeichnen sich dagegen derzeit noch deutlich weniger Optionen ab. Dies dürfte auch daran liegen, dass es bisher noch kaum einen Bedarf hierfür gab. Derzeit erscheinen für die Langfrist-Stromspeicherung Wasserstoff-Kavernen am plausibelsten, ggf. ergänzt durch Methanol-Tankspeicher. Eine ergänzende Technologie sind Langfrist-Wärmespeicher, aus denen jedoch kein Strom zurückgewonnen werden kann.

Sektorenkopplung vs. Stromspeicher. Verschiedene Typen von Wärme- oder Produktspeichern können es ermöglichen, den zusätzlichen Stromverbrauch der Sektoren-

kopplung im Wärme-, Verkehrs- und Industriebereich zu flexibilisieren. Damit könnten neue Stromverbraucher im Idealfall perfekt mit der schwankenden Verfügbarkeit Erneuerbarer Energien in Einklang gebracht werden. Da aus der Sektorenkopplung im Normalfall jedoch kein Strom zurückfließt, leistet auch eine noch so flexible Sektorenkopplung keinen Beitrag zur Deckung der bereits ohne Sektorenkopplung existierenden Stromnachfrage in Zeiten niedriger erneuerbarer Stromerzeugung (Schill 2020).

Speicherstrategien. Da Speicher mit fortschreitender Energiewende deutlich an Bedeutung gewinnen, hat das Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK) an verschiedenen Speicherstrategien für unterschiedliche Speichertypen gearbeitet. Diese Strategien befanden sich am Ende der Ampel-Regierung in unterschiedlichen Bearbeitungszuständen. Eine Stromspeicherstrategie wurde bereits Ende 2023 veröffentlicht und enthält vor allem eine Analyse der Hemmnisse, des Marktumfelds und mögliche Förderansätze (BMWK 2023). Der Fokus liegt hier auf der kurzfristigen Speicherung, insbesondere Batteriespeichern. Eine Wasserstoff- und eine Wärmespeicherstrategie sind derzeit in Arbeit. Sie sollen Potenziale, Kosten, Erlösmöglichkeiten sowie mögliche regulatorische Hemmnisse analysieren.

Fazit: Technologien vorhanden, aber Handlungsbedarf

Speicher früher kaum gebraucht, aber immer wichtiger. Das alte Energiesystem basierte auf den fossilen Energieträgern Erdöl, Erdgas und Kohle, die sich relativ leicht speichern ließen und je nach Bedarf für Anwendungen im Strom-, Wärme- und Verkehrssektor genutzt werden konnten. Dies ändert sich nun im Rahmen der Energiewende, bei der die fossilen Energieträger in allen Sektoren vor allem durch die fluktuierende Wind- und Solarenergie ersetzt werden sollen. Dementsprechend werden mit steigendem Anteil Erneuerbarer Energien verschiedene Arten von Strom-, Wärme- und Wasserstoffspeichern immer wichtiger, die früher nicht gebraucht wurden bzw. nicht wirtschaftlich betrieben werden konnten.

Kein Mangel an Technologien. Dabei mangelt es nicht an Speichertechnologien. Vor allem im Bereich der Kurzfristspeicher sind viele Optionen, insbesondere Batteriespeicher, bereits kommerziell verfügbar und oft auch schon wirtschaftlich attraktiv.

Andere Technologien sind grundsätzlich verfügbar, aber warten teils noch auf eine umfassende Erprobung, Optimierung und Markteinführung. Hierzu gehören vor allem verschiedene Technologien zur Langfristspeicherung von Strom und Wärme.

Keine kritischen Engpässe, aber Markthochlauf angehen. Bei den für Energiespeicher benötigten Materialien zeichnen sich derzeit, auch vor dem Hintergrund einer Fülle technischer Alternativen, keine kritischen Engpässe ab. Allerdings gibt es für viele Technologien noch keine leistungsfähigen Lieferketten, vor allem nicht in Europa. Zudem haben v.a. Langfristspeicher voraussichtlich sehr lange Vorlaufzeiten für die Realisierung von Projekten. Daher erscheint ein frühzeitiger und geförderter Markthochlauf vor allem für Langfristspeicher sinnvoll, auch wenn sie heute noch nicht benötigt werden.

Reformen von Marktdesign und Regulierung. Damit Stromspeicher im Energiesystem optimal eingesetzt werden können, erscheinen Reformen des Strommarktdesigns und der Netzentgeltregulierung erforderlich (vgl. Burkhardt et al. 2024). Insbesondere sollte der Strommarktpreis, an dem sich der Betrieb eines Speichers orientiert, vorhandene Netzengpässe berücksichtigen – andernfalls könnten Speicher sogar netzbelastend statt netzentlastend wirken. Möglichkeiten hierfür sind eine Aufteilung der einheitlichen Gebotszone im Strommarkt sowie lokal differenzierte Netzentgelte und sonstige Abgaben. Bei großen Batteriespeichern gibt es derzeit zudem Engpässe bei den Netzanschlüssen, die behoben werden sollten. Bei kleinen PV-Batteriespeichern und der Einbindung von Elektrofahrzeugen insbesondere mit V2G erscheint es dringend geboten, sowohl die technischen Möglichkeiten als auch die regulatorischen Anreize zu schaffen, damit diese stärker systemorientiert eingesetzt werden können. Dazu können unter anderem am Großhandelspreis orientierte Einspeise- und Netzstromtarife gehören sowie Regelungen, dass nicht die gesamte gespeicherte Energie mit Abgaben belegt wird, sondern nur die Speicherverluste. Idealerweise sollten sich entsprechende Politikmaßnahmen aus einer übergeordneten Speicherstrategie für die Energiewende ableiten, die ein konsistentes Bild der langfristigen Rolle aller Speichertechnologien und ihrer Wechselwirkungen enthält.

Literatur

- Gillich, Annika; Brand, Heike; Schmidt, Tobias; Hufendiek, Kai (2024): Die Schlüsselrolle von Flexibilität im Stromsystem 2030 Nutzenanalyse und kritische Flex-Technologien. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam, <https://doi.org/10.48485/pik.2024.004>.
- BMWK (2023): Stromspeicher-Strategie. Handlungsfelder und Maßnahmen für eine anhaltende Ausbaudynamik und optimale Systemintegration von Stromspeichern. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/S-T/stromspeicherstrategie-231208.pdf>
- Brown, Tom; Hampp, Johannes (2023): Ultra-long-duration energy storage anywhere: Methanol with carbon cycling. *Joule* 7(11), 2414-2420.
- Burkhardt, Alexander et al. (2024): Kernelemente des Strommarktdesigns – Anforderungen, Ziele, Bewertungskriterien und Handlungsoptionen. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam, <https://doi.org/10.48485/pik.2024.016>.
- Gunnar Luderer (Hrsg.), Frederike Bartels (Hrsg.), Tom Brown (Hrsg.), Clara Aulich, Falk Benke, Tobias Fleiter, Fabio Frank, Helen Ganal, Julian Geis, Norman Gerhardt, Till Gnann, Alyssa Gunnemann, Robin Hasse, Andrea Herbst, Sebastian Herkel, Johanna Hoppe, Christoph Kost, Michael Krail, Michael Lindner, Marius Neuwirth, Hannah Nolte, Robert Pietzcker, Patrick Plötz, Matthias Rehfeldt, Felix Schreyer, Toni Seibold, Charlotte Senkpiel, Dominika Sörgel, Daniel Speth, Bjarne Steffen, Philipp C. Verpoort (2025): Die Energiewende kosteneffizient gestalten: Szenarien zur Klimaneutralität 2045. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam. <https://ariadneprojekt.de/publikation/report-szenarien-zur-klimaneutralitat-2045/>
- Jürgens, Patrick; Schweiger, Jael Sepúlveda; Gaafar, Nourelden; Kost, Christoph (2024): Flexibilität im deutschen Energiesystem bis 2045: Beitrag verschiedener Technologien auf dem Weg zur Klimaneutralität. Kopernikus-Projekt Ariadne, Potsdam, <https://doi.org/10.48485/pik.2024.003>.
- Kittel, Martin; Roth, Alexander; Schill, Wolf-Peter (2024): Coping with the Dunkelflaute: Power system implications of variable renewable energy droughts in Europe. arXiv:2411.17683, <https://arxiv.org/abs/2411.17683>.
- Kopernikus-Projekt Ariadne (2021): Ariadne-Report: Deutschland auf dem Weg zur Klimaneutralität 2045 - Szenarien und Pfade im Modellvergleich. <https://doi.org/10.48485/pik.2021.006>.
- Nationaler Wasserstoffrat (2021): Die Rolle der Untergrundgasspeicher zur Entwicklung eines Wasserstoffmarktes in Deutschland. Entwicklungspotenziale und regulatorische Rahmenbedingungen. https://www.wasserstoffrat.de/fileadmin/wasserstoffrat/media/Dokumente/2022/2021-10-29_NWR-Grundlagenpapier_Wasserstoffspeicher.pdf.
- Neumann, Jannik et al. (2023): Techno-economic assessment of long-distance supply chains of energy carriers: Comparing hydrogen and iron for carbon-free electricity generation. *Applications in Energy and Combustion Science* 14, 100128.
- Ohlendorf, Nils; Schill, Wolf-Peter (2020): Frequency and duration of low-wind-power events in Germany. *Environmental Research Letters* 15(8), 084045.
- Roth, Alexander; Schill, Wolf-Peter (2023): Geographical balancing of wind power decreases storage needs in a 100% renewable European power sector. *iScience* 26, 107074.
- Roth, Alexander; Schill, Wolf-Peter (2025): fossilfrei-Podcast Folge 27 „Kurzfristig, langfristig, exotisch: Energiespeicher erklärt“. <https://www.diw.de/fossilfrei>.
- Schill, Wolf-Peter (2020): Electricity storage and the renewable energy transition. *Joule* 4(10), 2059-2064.



Der rote Faden durch die Energiewende: Das Kopernikus-Projekt Ariadne führt durch einen gemeinsamen Lernprozess mit Politik, Wirtschaft und Gesellschaft, um Optionen zur Gestaltung der Energiewende zu erforschen und politischen Entscheidern wichtiges Orientierungswissen auf dem Weg zu einem klimaneutralen Deutschland bereitzustellen.

Folgen Sie dem Ariadnefaden:



@ariadneprojekt.bsky.social



Kopernikus-Projekt Ariadne



ariadneprojekt.de

Mehr zu den Kopernikus-Projekten des BMBF auf [kopernikus-projekte.de](https://www.kopernikus-projekte.de)

Wer ist Ariadne? In der griechischen Mythologie gelang Theseus durch den Faden der Ariadne die sichere Navigation durch das Labyrinth des Minotaurus. Dies ist die Leitidee für das Energiewende-Projekt Ariadne im Konsortium von 27 wissenschaftlichen Partnern. Wir sind Ariadne:

adelphi | Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU) | Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung (DIW) | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) | Ecologic Institute | Forschungsinstitut für Nachhaltigkeit – Helmholtz-Zentrum Potsdam (RIFS) | Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) | Hertie School | ifo Institut – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung an der Universität München | Institut der deutschen Wirtschaft Köln | Julius-Maximilian-Universität Würzburg | Mercator Research Institute on Global Commons and Climate Change (MCC) | Öko-Institut | Potsdam-Institut für Klimafolgenforschung (PIK) | RWI – Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung | Stiftung Umweltenergierecht | Stiftung Wissenschaft und Politik | Technische Universität Berlin | Technische Universität Darmstadt | Technische Universität München | Technische Universität Nürnberg | Universität Duisburg-Essen | Universität Greifswald | Universität Hamburg | Universität Potsdam | Universität Stuttgart – Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) | ZEW – Leibniz-Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung