



Dokumentation

Energiespeicher

Überblick zu Technologien, Anwendungsfeldern und Forschung

Energiespeicher

Überblick zu Technologien, Anwendungsfeldern und Forschung

Aktenzeichen: WD 5 - 3000 - 148/22
Abschluss der Arbeit: 21.12.2022
Fachbereich: WD 5: Wirtschaft und Verkehr, Ernährung und Landwirtschaft

Die Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestages unterstützen die Mitglieder des Deutschen Bundestages bei ihrer mandatsbezogenen Tätigkeit. Ihre Arbeiten geben nicht die Auffassung des Deutschen Bundestages, eines seiner Organe oder der Bundestagsverwaltung wieder. Vielmehr liegen sie in der fachlichen Verantwortung der Verfasserinnen und Verfasser sowie der Fachbereichsleitung. Arbeiten der Wissenschaftlichen Dienste geben nur den zum Zeitpunkt der Erstellung des Textes aktuellen Stand wieder und stellen eine individuelle Auftragsarbeit für einen Abgeordneten des Bundestages dar. Die Arbeiten können der Geheimschutzordnung des Bundestages unterliegende, geschützte oder andere nicht zur Veröffentlichung geeignete Informationen enthalten. Eine beabsichtigte Weitergabe oder Veröffentlichung ist vorab dem jeweiligen Fachbereich anzuzeigen und nur mit Angabe der Quelle zulässig. Der Fachbereich berät über die dabei zu berücksichtigenden Fragen.

Inhaltsverzeichnis

1.	Einleitung	4
2.	Energie speichern	4
3.	Speichermarkt in Deutschland	6
4.	Speichertechnologien	10
5.	Einsatz und Kombination von Energiespeicheranlagen	14
6.	Ausbaubedarf an Energiespeicherkapazitäten	17
6.1.	Ausbaubedarf an Speichern	17
6.2.	Ausbau der Wasserstoffwirtschaft	20
7.	Faktoren für den wirtschaftlichen Einsatz von Speichern	20
7.1.	Entwicklung der Levelized Cost of Storage (Speicherkosten)	20
7.2.	Technologiefortschritte und Massenproduktion	22
7.3.	Speicheranwendungen und Wirtschaftlichkeit der Geschäftsmodelle	22
7.4.	Rahmenbedingungen	23
7.5.	Grenzen des Speicherausbaus	24
8.	Zukünftige Speichertechnologien	24

1. Einleitung

Energie aus fluktuierenden Energiequellen zu speichern, ist eine der wesentlichen Herausforderungen in einem Strom- und Wärmenetz, welches wesentlich auf erneuerbaren Energien beruht. Zunehmend spielen Batteriespeicher im Endverbrauchermarkt eine Rolle. Mittlerweile sind ca. 400.000 Batteriespeicher mit PV-Anlagen in Deutschland verbaut. Elektroautos als mobile Stromspeicher erfahren eine sehr hohe Nachfrage.

Die Rolle und der Bedarf von Großspeichern für die Netzstabilität werden intensiv diskutiert. Der Großteil der Stromspeicher in Deutschland und weltweit stammt aus Pumpspeicherwerken, also Infrastrukturen, die bei Stromüberschuss Wasser in ein höher gelegenes Becken pumpen und beim Ausspeichern dieses Wasser durch eine Turbine in ein niedriger gelegenes Becken strömen lassen – eine Technik, die seit Jahrzehnten genutzt wird. Neben der reinen technologischen Entwicklung gewinnt der Bedarf an Großbatteriespeichern zur Netzstabilität und für neue Service- und Geschäftsmodelle zunehmend an Aufmerksamkeit.

In den Vorjahren wurde von den Wissenschaftlichen Diensten des Bundestages das Thema Speicher beleuchtet. Folgende Publikationen beschäftigen sich mit den Speicherkapazitäten und den Technologien:

- Wissenschaftliche Dienste (2017), Entwicklung der Stromspeicherkapazitäten in Deutschland von 2010 bis 2016, WD 8 - 3000 - 083/16, <https://www.bundestag.de/resource/blob/496062/759f6162c9fb845aa0ba7d51ce1264f1/wd-8-083-16-pdf-data.pdf>.
- Wissenschaftliche Dienste (2014), Vor- und Nachteile verschiedener Energiespeichersysteme, WD 8 – 3000 - 032/14, <https://www.bundestag.de/resource/blob/412904/ca2dd030254284687a1763059f1f4c0c/wd-8-032-14-pdf-data.pdf>.

Diese Dokumentation aktualisiert die Technologie- und die Kapazitätsübersicht in Deutschland und erweitert sie um die wirtschaftliche Fragestellung nach Marktsegmentierung, Anwendungsfällen und Wirtschaftlichkeit. Schwerpunkt bilden die Großspeicher.

2. Energie speichern

Je mehr erneuerbare Energien in das System integriert werden, desto mehr werden die Überschussproduktion an sonnigen und windigen Tagen und die Kapazitätsengpässe an bedeckten und/oder windarmen Tagen relevant. Speicherung kann Erzeugungsüberschüsse aufnehmen und zeitversetzt bei Bedarf abgeben. Abriegelungen bei Überproduktionen können so vermieden werden. Abbildung 1 zeigt, dass bei zunehmendem Anteil an fluktuierender Energieerzeugung der Bedarf an kurzfristiger Speicherung hin zu langfristiger Speicherung zunimmt. Ab einem Anteil zwischen 50 und 80 Prozent ist eine hohe Flexibilität des Netzes erforderlich, die längere Speicherung (Tage, Wochen oder Seasons) nötig mache.

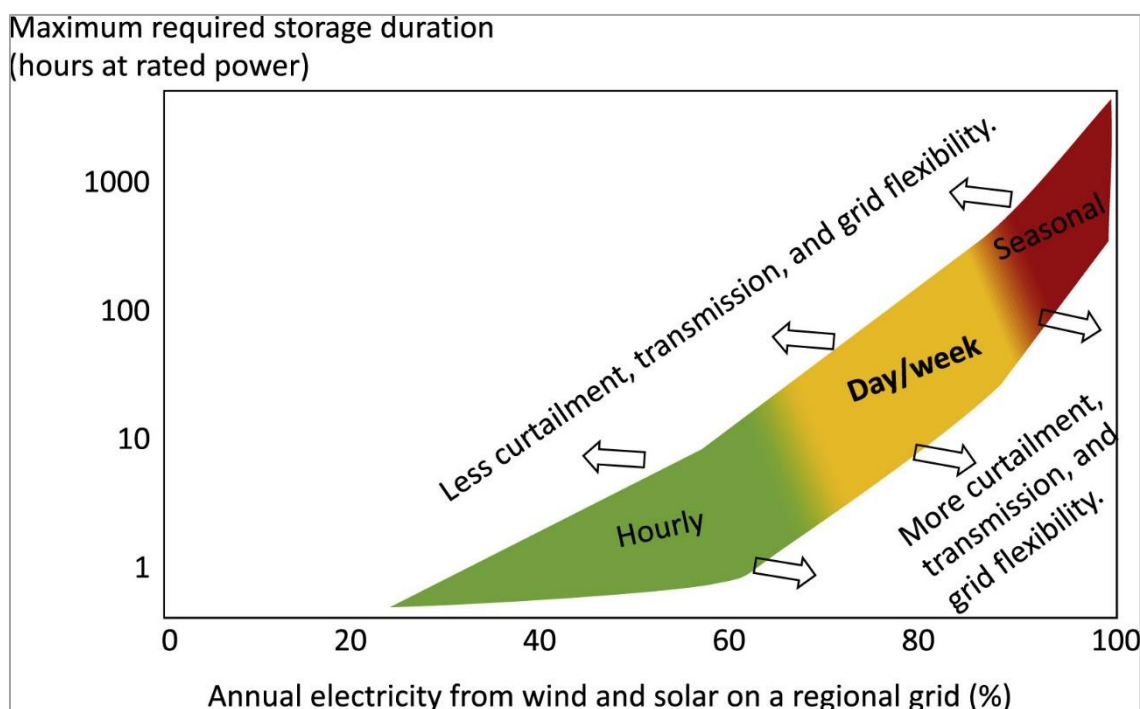
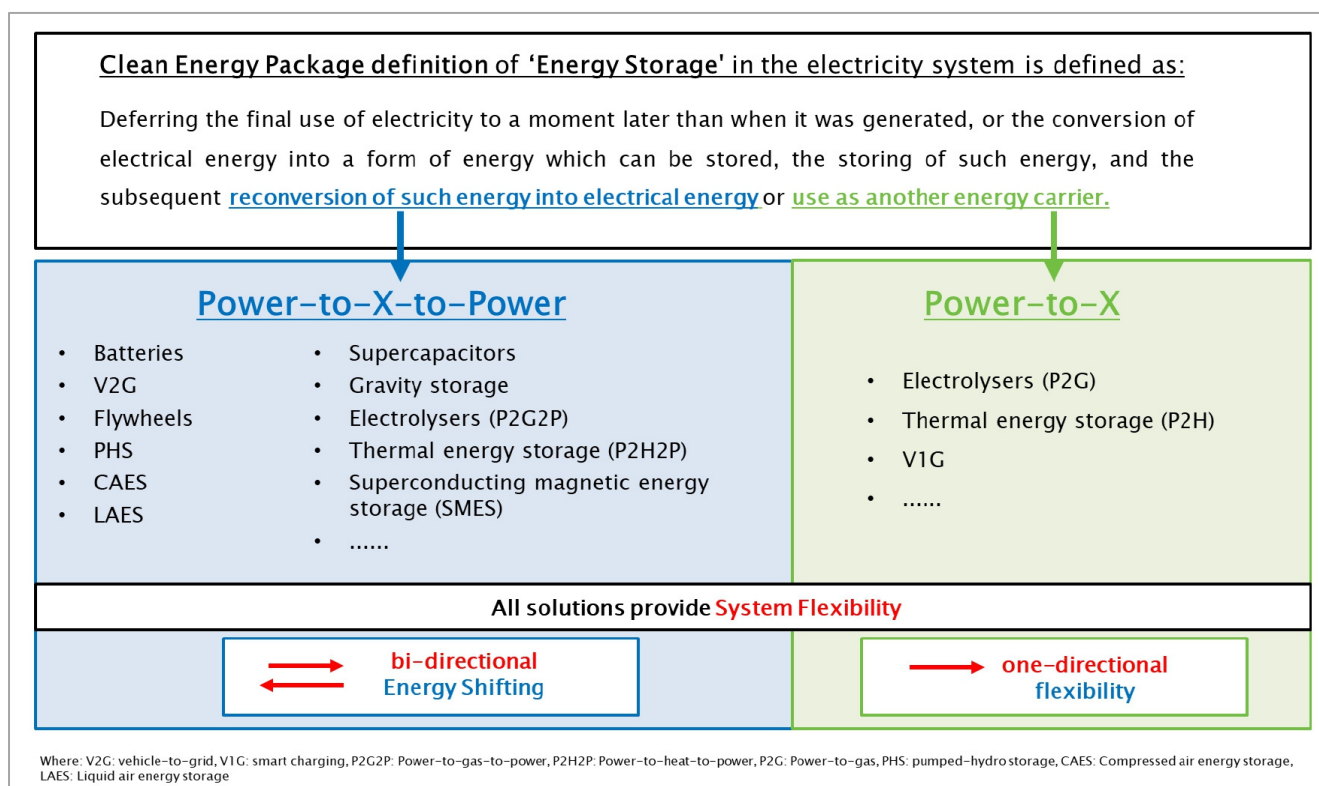


Abbildung 1: Halbquantitativer Überblick über die maximal benötigte Dauer der Stromspeicherung¹

Energie kann dabei auf verschiedene Weise gespeichert werden. Dabei wird technologieoffen von **Power-to-X-to-Power** (zweiseitig) und **Power-to-X** (einseitig) unterschieden. Die folgende Übersicht zeigt die von der EU genutzte² und von der European Association for Storage of Energy (EASE) illustrierte Definition und die dahinter stehende Unterteilung der Energiespeicherung:

1 Albertus, Manser, Litzelman (2020), Long-Duration Electricity Storage Applications, Economics, and Technologies, Joule, Volume 4, Issue 1, S. 21-32, <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.11.009>.

2 Directive (EU) 2019/944 of 5 June 2019, Article 2(59), <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A32019L0944>.

Abbildung 2: Clean Energy Package definition of energy storage providing system flexibility³

3. Speichermarkt in Deutschland

Nach Angaben des Bundesverbands Energiespeicher Systeme e.V. (BVES) unterteilt sich der Energiespeichermarkt in folgende Segmente:⁴

- **Systeminfrastruktur:** Speicher zur Stützung des Stromnetzes
- **Haushalte:** Heimstromspeicher und Wärmespeicher in Verbindung mit Wärmepumpen
- **Gewerbe und Industrie:** Gewerbespeicher für Strom und Mobilität, sowie erste Wasserstoffproduktionen
- **Forschung und Entwicklung:** Wasserstoffanwendungen im Bereich 1-10 MW, Anwendungen von thermischen Speichern, erste Großprojekte für Ersatz von Gas

³ European Association for Storage of Energy (EASE) (2022), Energy Storage Targets 2030 and 2050, <https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2022/06/Energy-Storage-Targets-2030-and-2050-Full-Report.pdf>, S. 4.

⁴ 3Energy Consult im Auftrag des BVES (2022), Branchenanalyse: Entwicklung und Perspektiven der Energiespeicherbranche in Deutschland, https://www.bves.de/wp-content/uploads/2022/12/BVES-Branchenanalyse-2022_v1.pdf.

Die Internationale Energie Agentur (IEA) strukturiert den Markt etwas abweichend:⁵

- Behind-the-meter (residential, commercial and industrial)
- Transmission and distribution
- System services
- Arbitrage and peak support
- Other

Teilweise werden **mobile Batteriespeicher** in elektrifizierten Autos (reine Elektroautos und Plug-in Hybride) auch zum Speichermarkt dazu gezählt.⁶

Zur Entwicklung des Energiespeichermarktes in Deutschland siehe:

- 3Energy Consult im Auftrag des BVES (2022), Branchenanalyse: Entwicklung und Perspektiven der Energiespeicherbranche in Deutschland, https://www.bves.de/wp-content/uploads/2022/12/BVES-Branchenanalyse-2022_v1.pdf.
- Figgenger, Hecht, Haber, Borsa, Spreuer, Kairies, Stenzele & Sauer (2022), The development of battery storage systems in Germany – A market review (status 2022) <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2203/2203.06762.pdf>.
- Consentec GmbH, Fraunhofer ISI / Fraunhofer IEG & Stiftung Umweltenergierecht (2022), Batteriespeicher in Netzen – Schlussbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/studie-batteriespeicher-in-netzen-schlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=14.

Vor allem der Bereich **Systeminfrastruktur** sei für die **Netzstabilität** und den Ausbau erneuerbarer Energien von wesentlicher Bedeutung. Der Großteil der Speicherung für die Netzstabilität erfolgt über Pumpspeicherwerke (weltweit stammen 91% der gespeicherten Energie aus Pumpspeicherkraftwerken).⁷ Die in Deutschland installierte Leistung von Pumpspeicherwerken betrug 2015 **6,7**

5 IEA (2020), Innovation in Batteries and Electricity Storage, IEA, <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>, S. 33.

6 Die Batteriespeicherkapazität von Elektroautos wird wiederholend als möglicher Beitrag zur Netzstabilität gesehen. Durch zukünftiges bi-direktionales Laden könnten die Batteriekapazitäten von stehenden, nicht benötigten E-Autos in Wind- bzw. Sonnenzeiten aufgeladen und in Zeiten geringerer Stromgenerierung durch erneuerbare Energien wieder ins Netz abgegeben werden. (siehe Figgenger et al. (2022), The development of battery storage systems in Germany – A market review (status 2022), <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2203/2203.06762.pdf>.)

7 IEA (2020), Innovation in Batteries and Electricity Storage, IEA, <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>, S. 31 ff.

GW.⁸ In der Kraftwerkliste der Bundesnetzagentur (Stand November 2022) sind derzeit 142 Pumpspeicher und Batteriespeicher mit einer Netto-Nennleistung von ca. **10,2 GW** gelistet:

- https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Sachgebiete/ElektrizitaetundGas/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Erzeugungskapazitaeten/Kraftwerkliste/start.html

Weitere Information zu **Pumpspeicherwerken** siehe:

- Funktionsweise und Daten zu Pumpspeichern in Deutschland und mögliche Ausbaumöglichkeiten: https://www.dena.de/test/user_upload/150716_Ergebnispapier_Pumpspeicherwerke.pdf
- Installierte Netto-Nennleistung der Pumpspeicher am Strommarkt: https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Bilder/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/Versorgungssicherheit/Uebersichtsgrafik_Kraftwerkliste.png?__blob=poster&v=5

Der BVES hat in einer Deutschlandkarte Großspeicher und -batterieprojekte zusammengetragen (siehe Abbildung 3):

8 <https://www.dena.de/themen-projekte/energiesysteme/flexibilitaet-und-speicher/pumpspeicher/>

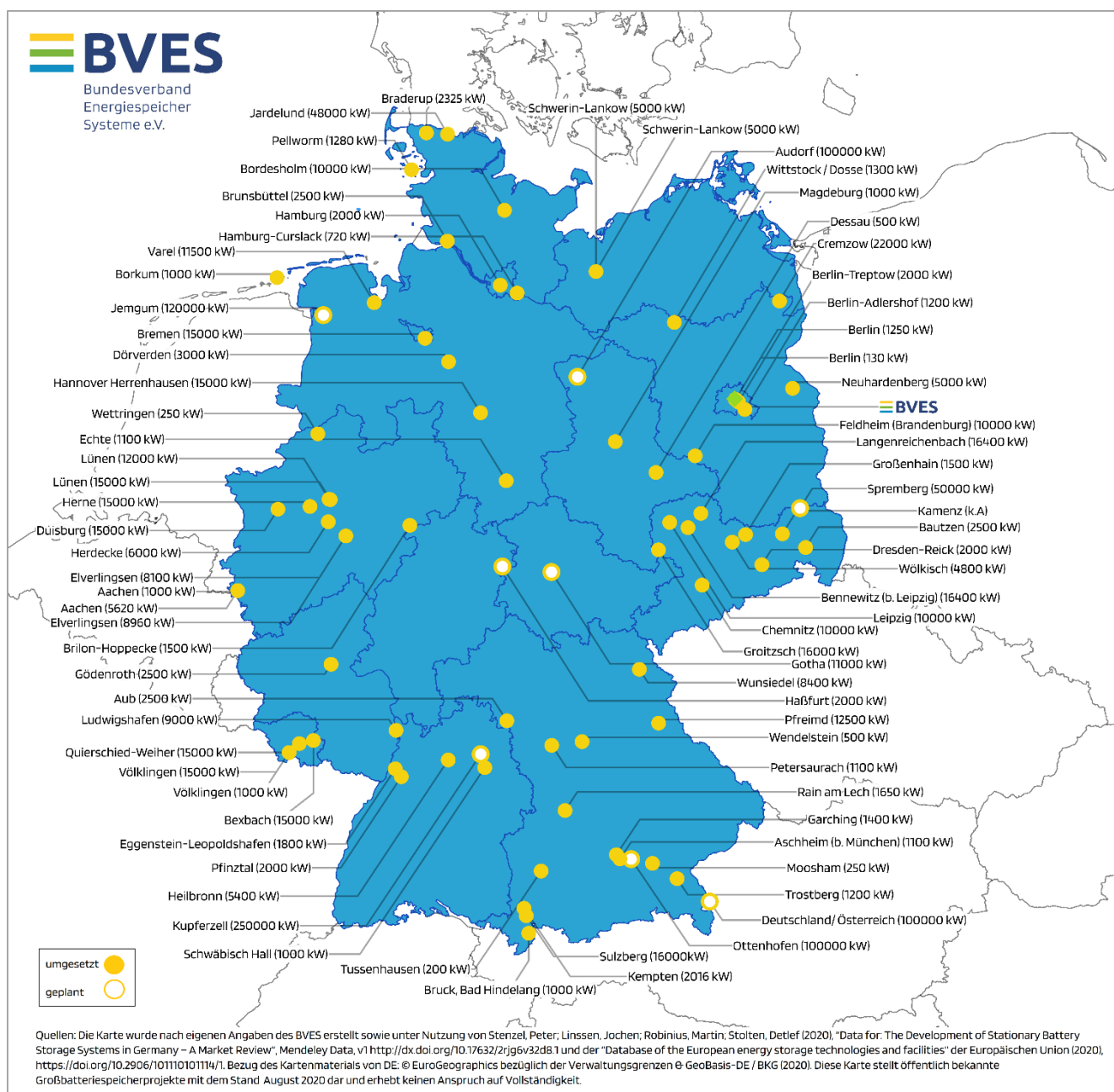


Abbildung 3: Großbatterieanlagen in Deutschland⁹

Die Abbildung basiert u.a. auf dem Datenset der Europäischen Kommission, die eine tabellarische Darstellung bereithält:

9 https://www.bves.de/wp-content/uploads/2022/12/Grossbatteriespeicher_2020_10-002s.png

-
- Directorate-General for Energy. (2020), Database of the European energy storage technologies and facilities, Publications Office, <https://doi.org/10.2906/101110101114/1>.

Für das Segment der **Haushalte** geht der BVES davon aus, dass im April 2022 der 500.000ste Heimspeicher installiert wurde. So käme der Bereich auf eine Kapazität von **4,4 GWh** und **2,5 GW** Leistung.¹⁰

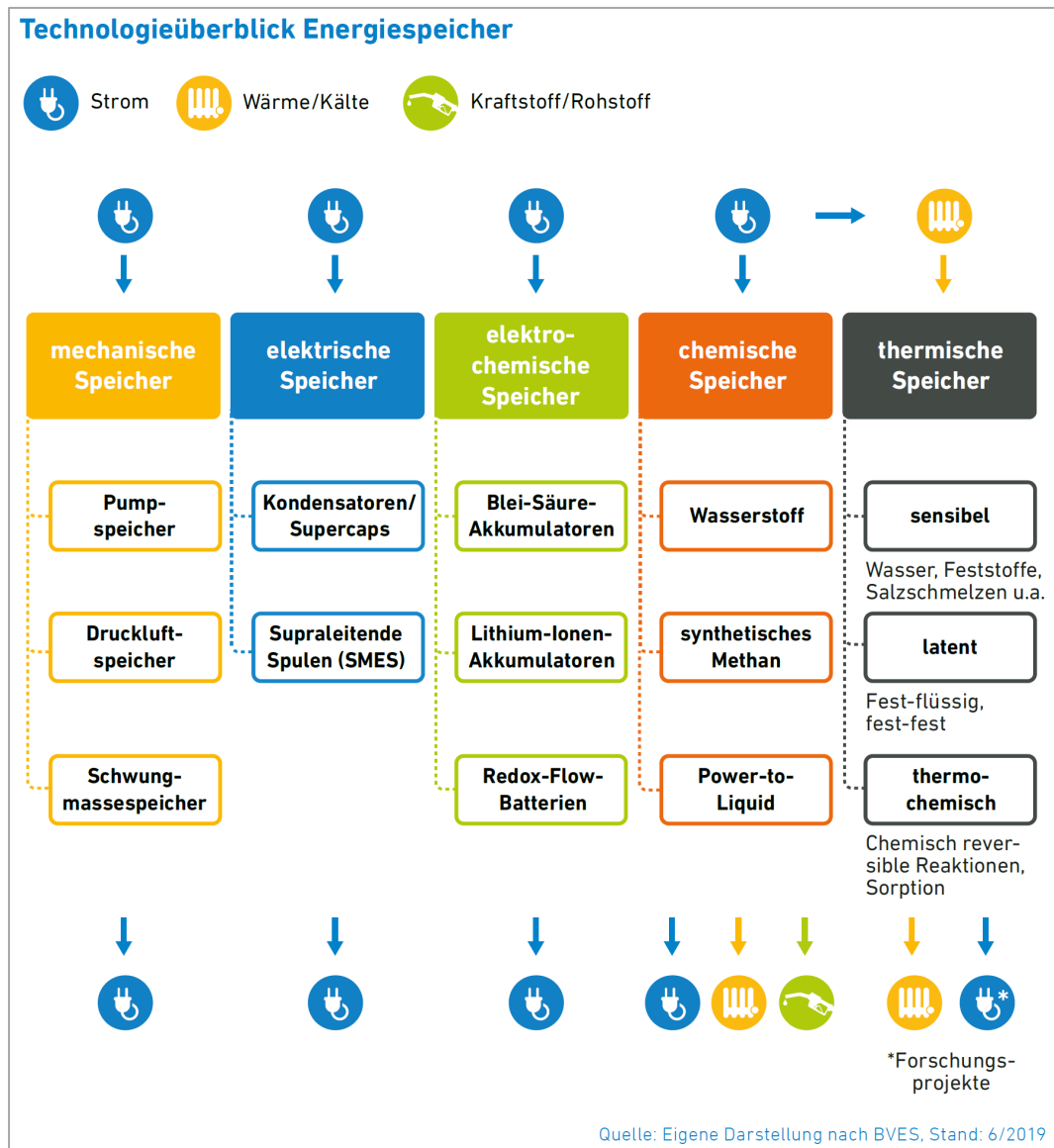
Die Kapazität und Leistung in den derzeit registrierten **Elektro- und Plug-In Hybrid-Autos** beträgt **40 GWh** und **51,8 GW** (DC-Lademodus) bzw. **7,7 GW** (AC Lademodus). Bi-direktionales Laden ist derzeit nicht netzdienlich möglich.¹¹

4. Speichertechnologien

Eine einführende Übersicht zu Energiespeichertechnologien zeigt folgende Abbildung aus einer Publikation der Agentur für Erneuerbare Energien e.V:

10 3Energy Consult im Auftrag des BVES (2022), Branchenanalyse: Entwicklung und Perspektiven der Energiespeicherbranche in Deutschland, https://www.bves.de/wp-content/uploads/2022/12/BVES-Branchenanalyse-2022_v1.pdf, S. 7.

11 Figgner et al. (2022), The development of battery storage systems in Germany – A market review (status 2022) <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/2203/2203.06762.pdf>

Abbildung 4 Technologieüberblick Energiespeicher¹²

Die **Technologiedatenbank** der EC Directorate-General for Energy geht detailliert auf die heutigen und zukünftigen Speichertechnologien ein. Die Datenbank enthält Informationen zu Technologieeigenschaften, wie Speicherkapazitäten und Lade- bzw. Abgabeleistungen, sowie Speicherdauer und Kosten (siehe Abbildung 5):

- EC Directorate-General for Energy (2020), Database of the European energy storage technologies and facilities, Publications Office, <https://doi.org/10.2906/101110101114/1>.

¹² https://www.unendlich-viel-energie.de/media/file/3471.AEE_Renews_Spezial_88_Energiespeicher_web.pdf, S. 6.

Technologies	Sub-technologies	Use	Energy Capacity	Power installed capacity	Storage duration at full power	CAPEX (€/kW)	Average CAPEX (€/kWh, 2016)	Max CAPEX (€/kWh, 2016)	CAPEX estimated 2030 (€/kWh)
Mechanical	Pumped Hydro Storage (PHS)	FTM	1-100 GWh	100 MW-1 GW	several hours	500-1500	19	90,1	19
	Pumped Heat Electrical Storage (PHES)	FTM	500 MWh-1 GWh	100 kW-200 MW	3-6 hours	350			
	Adiabatic Compressed Air Energy Storage (CAES)	FTM	10 MWh-10 GWh	10-300 MW	several hours	1200-2000			
	Compressed Air Energy Storage (CAES)	FTM	10 MWh-10 GWh	10-300 MW	several hours	400-1200	47	75	40
	Liquid Air Energy Storage (LAES)	FTM	10 MWh-8 GWh	5-650 MW	2-24 hours	500-3500			
	Flywheel	FTM	5-10 kWh	1-20 MW	5-30 minutes	500-2000	2750	5406	1750
	Sodium Sulphur batteries	FTM	<100 MWh	<10 MW	6 hours	2000-3000	330	660	143
	Lead Acid batteries	FTM/BTM	up to 10 MWh	Some MW	several hours	100-500	220	430	110
	Sodium Nickel Chloride batteries	FTM	4 kWh-10 MWh	Several MW	2- to several hours	150-1000	350	440	143
	Lithium-ion batteries	FTM/BTM	<10 MWh	<50 MW	10 min to 4 hours	150-1300	520	760	200
ElectroChemical	Lithium-S batteries R&D	FTM/BTM							
	Lithium-Metal-Polymer batteries	FTM/BTM							
	Metal Air batteries R&D	FTM							
	Ni-Cd batteries		some MWh	some MW	some hours	500-1500	400-700		
	Ni-MH batteries		some MWh	some MW	some hours	500-1500	400-700		
	Na-ion batteries R&D	FTM/BTM							
	Redox flow batteries Zn/Fe	FTM	<100 MWh	<10 MW	some hours				
	Redox flow batteries Vanadium	FTM	<100 MWh	<10 MW	some hours	500-2300	300	950	100
	Redox flow batteries Zn/Br	FTM	<100 MWh	<10 MW	some hours	500-2300	800	1520	275
	Superconducting Magnetic Energy Storage (SMES)	FTM	1-10 kWh	100kW-5MW	1-100 seconds	700-2000			
Electrical	Supercapacitor	FTM	1-5 kWh	100kW-5MW	<30 seconds	1500-2500			
	Power to Gas (H2)	FTM	up to 100 GWh	1kW-1 GW	several hours-several months	2000-5000			
	Power to Ammonia - Gasoline	FTM	1 MWh-several GWh	1 MW-1 GW					
	Power to Methane	FTM	1 MWh-several GWh	1 MW-1 GW					
Chemical	Power to Methanol + Gasoline	FTM	1 MWh-several GWh	1 MW-1 GW					
	Molten salts	FTM	3 GWh	300 MW	6-10 hours	100-300	20-40		
Thermal	Sensible Thermal Energy Storage (STES)	FTM	10-50 kWh/t	0.001-10 MW	1-12 hours	3000-4000			
	Phase Change Material (PCM)	FTM	50-150 kWh/t	0.001-1 MW	some weeks	5500-15000			
	ThermoChemical Storage (TCS)	FTM	12-250 kWh/t	0.01-1 MW	some days	Thermal			

Abbildung 5: Energiespeichertechnologien – Technische Eigenschaften und Kosten¹³

13 Directorate-General for Energy. (2020), Database of the European energy storage technologies and facilities, Publications Office, <https://doi.org/10.2906/101110101114/1>.

Abbildung 6 zeigt unterschiedliche Technologien und deren Eigenschaften (Kapazität, Leistung, Speicherdauer), die die Passfähigkeit für spezifische Anwendungsfelder bestimmen (mehr dazu in Kap. 5).

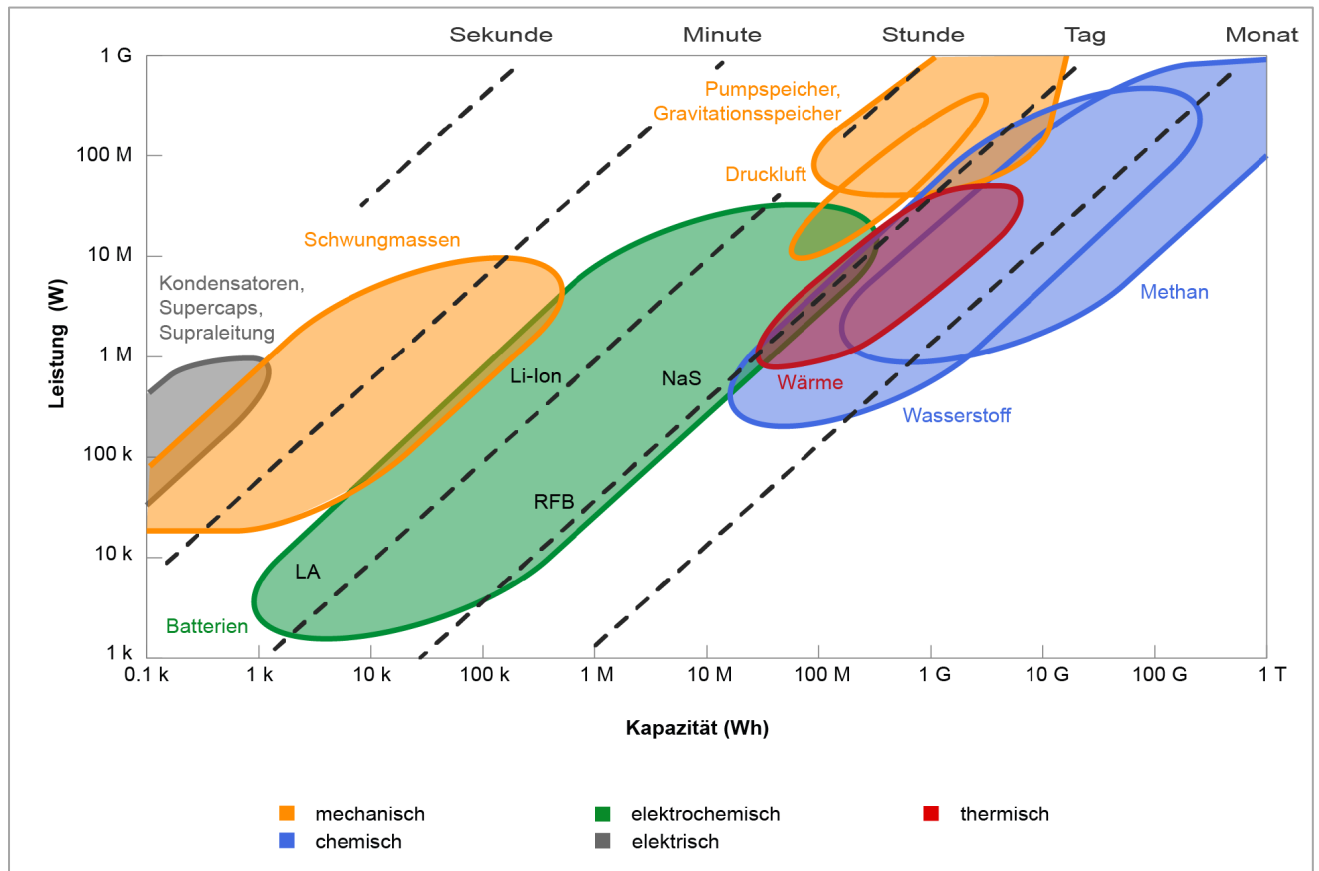


Abbildung 6: Schematische Übersicht zu Leistung und Energie (Kapazität) verschiedener Speichertypen (mechanisch, chemisch, elektrochemisch, elektrisch und thermisch)¹⁴

Anmerkung: Mögliche Speicherzeiten liegen zwischen Sekunden und mehreren Monaten. Speziell gewisse Wärme- und Gasspeicher (Wasserstoff, Methan) sind interessant für saisonale Energiespeicherung über mehrere Monate. (Li-Ion: Lithium-Ionen-Batterien, NaS: Natrium-Schwefel-Batterien, LA: Bleibatterien (lead-acid battery), RFB: Flussbatterien (redox-flow battery)).¹⁵

Eine weitere Übersicht zu **22 Speichermöglichkeiten** im Energiebereich gibt es im ETP Clean Energy Technology Guide der Internationalen Energie Agentur (IEA).

14 Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie (2021), Energiespeichertechnologien, Kurzübersicht 2021, <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10623>, S. 7.

15 Ebd.

-
- <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?selectedCCTag=Storage&selectedSector=Energy+transformation>

Eine Patentanalyse zu Speichertechnologien zeigt, welche Länder international die meisten Patente in den verschiedenen Speichertechnologien halten:

- IEA (2020), Innovation in Batteries and Electricity Storage, IEA, <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>.

5. Einsatz und Kombination von Energiespeicheranlagen

Die Verwendungen der verschiedenen Speichertechnologien sind von unterschiedlichen **Anwendungsfeldern** in Verbindung mit den jeweils dafür benötigten **technologischen Eigenschaften** abhängig. Die technologischen Eigenschaften, wie Speicherdauer (Kurzzeit- oder Langzeitspeicherung), Leistung (in MW) und Kapazität (in MW/h) bestimmen, ob sich die jeweilige Technologie für verschiedene Anwendungsfelder eignet. In Studien werden die Anwendungsfelder auf unterschiedlichen Ebenen betrachtet: Die Anwendungsfelder für Speicher sind beispielsweise **Eigenbedarfsoptimierung, Frequenzregelung und Peak Shaving**.¹⁶ Anwendungsfelder können jedoch auch auf die verschiedenen Energiesektoren bezogen werden:

16 Thielmann, Sauer, Schnell, Isenmann & Wietschel (2015), Technologie-Roadmap stationäre Energiespeicher 2030, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/TRM-SES.pdf>, S. 20.

Speichertyp				Energiesektoren			
	Eingang	Speicherform	Ausgang	Strom	Gas	Wärme	Verkehr
Mechanische Speicher							
Pumpspeicher	P	potenzielle Energie des Wassers	P	X			
Gravitationsspeicher	P	potenzielle Energie	P	X			
Druckluftspeicher	P	kinetische Energie des Gasdrucks	P	X			
Schwungmassen	P	kinetische Energie rotierender Massen	P	X			
Elektrochemische Speicher							
Batterien	P	elektrochemische Energie in den Elektroden	P	X			X
Redox-Flow-Batterien	P	elektrochemische Energie im Elektrolyt	P	X			
Elektrische Speicher							
Kondensatoren	P	Energie im elektrischen Feld	P	X			
Supraleitende Spulen	P	Energie im magnetischen Feld	P	X			
Chemische Speicher							
Power-to-Hydrogen*	P	chemische Energie in Wasserstoff	P/G	X	X	X	X
Power-to-Gas*	P	chemische Energie in synthetischem Methan	P/G	X	X	X	X
Power-to-Liquid**	P	chemische Energie in Kohlenwasserstoffen	LF	X			X
Thermische Speicher							
Sensible Wärmespeicher	H	thermische Energie in Teilchenbewegung	H			X	
Latentspeicher (Phasenwechsel)	H	Umwandlungsenthalpie	H			X	
Thermochemische Speicher	H	endotherme Reaktionsenergie	H			X	
Power-to-Heat***	P	Wärmespeicher	H	X		X	
Kryogene Speicher & «Carnot-Batterien»	P	Kryogene Flüssigkeit	P	X			
	P	Hochtemperaturwärme	P	X	(X)	(X)	

Abbildung 7: Auflistung verschiedener Speichertypen (mechanisch, chemisch, elektrochemisch, elektrisch und thermisch) mit Beispielen¹⁷

Anmerkungen: Viele etablierte Speicher funktionieren innerhalb eines einzelnen Energiesektors. Power-to-X-Anwendungen bieten Speichermöglichkeiten, die sektorenübergreifend eingesetzt werden. (* direkte Nutzung/Rückverstromung, ** synthetische Treibstoffe, die gut gelagert werden können, *** Joulsche Wärme oder Wärmepumpen). P = Power/Elektrizität, G = Gas, LF = Flüssigtreibstoff, H = Wärme.

Der World Energy Council bringt Eigenschaften von unterschiedlichen Batterietechnologien mit einer Vielzahl an Anwendungsfällen in Verbindung:

17 Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie (2021), Energiespeichertechnologien, Kurzübersicht 2021, <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10623>, S. 8.

Figure 1 – Sample overview of storage technologies

	ELECTRICAL		MECHANICAL			ELECTROMECHANICAL			CHEMICAL	THERMAL
	Supercapacitors	SMES	PHS	CAES	Flywheels	Sodium Sulfur	Lithium Ion	Redox Flow	Hydrogen	Molten Salt
Maturity	Developing	Developing	Mature	Mature	Early commercialised	Commercialised	Commercialised	Early commercialised	Demonstration	Mature
Efficiency	90-95%	95-98%	75-85%	70-89%	93-95%	80-90%	85-95%	60-85%	35-55%	80-90%
Response Time	ms	<100 ms	sec-mins	mins	ms-secs	ms	ms-secs	ms	secs	mins
Lifetime, Years	20+	20+	40-60	20-40	15+	10-15	5-15	5-10	5-30 years	30 years
Charge time	s - hr	min - hr	hr - months	hr - months	s - min	s - hr	min - days	hr - months	hr - months	hr - months
Discharge time	ms - 60 min	ms - 8 s	1 - 24 hs+	1 - 24 hs+	ms - 15 min	s - hr	min - hr	s - hr	1 - 24 hs+	min - hr
Environmental impact	None	Moderate	Large	Large	Almost none	Moderate	Moderate	Moderate	Dependent of H2 production method	Moderate
Possible applications by technologies										
Power quality	✔	✔			✔	✔	✔	✎		
Energy arbitrage			✔	✔	✎	✔	✔	✔	✎	✔
RES integration		✔			✔	✔	✔	✔	✔	
Emergency back-up					✔	✔	✔	✔	✎	
Peak shaving			✔	✔		✔	✔	✎	✎	✎
Time shifting			✔	✔		✔	✔	✎	✎	✎
Load leveling			✔	✔		✔	✔	✎	✎	✎
Black start						✔	✔	✔	✎	✎
Seasonal storage			✎	✎					✎	✎
Spinning reserve		✎			✎	✔	✔	✎	✎	
Network expansion			✔	✎		✔	✔	✎	✎	✎
Network stabilisation	✎	✔			✎	✔	✔	✎		
Voltage regulation	✎	✎			✎	✔	✔	✔		
End-user services	✎	✎			✎	✔	✔	✎		

Sources: Interviews, Schmidt et al. (2019), Das et al. (2018)
H2 = Hydrogen, RES = Renewable energy source, RE = Renewable energy, SMES = Superconducting magnetic energy storage, PHS = Pumped hydroelectric storage, CAES = Compressed-air energy storage
Note: The Council has reviewed available literature to build this table. In our review, technology specifications differ greatly based on the source.

✔ for proven
✎ for promising
✎ for possible

Abbildung 8: Übersicht von Speichertechnologien¹⁸

18 World Energy Council (2020), Five Steps to Energy Storage, Innovation Insight Brief, https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Five_steps_to_energy_storage_v301.pdf, S. 9.

Eine schematische Übersicht, die die Speichergröße ins Verhältnis zu Lade- und Entladezeiten setzt, zeigt die dafür in Frage kommenden Energiespeichertechnologien und mögliche Geschäftsmodelle auf:

- Thielmann, Sauer, Schnell, Isenmann & Wietschel (2015), Technologie-Roadmap stationäre Energiespeicher 2030, Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/TRM-SES.pdf>

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) hat in einer Studie zu dezentralen Batteriespeichern auch die Auswirkungen des Zubaus solcher Speicher (wie z. B. kundeneigener Photovoltaik-Anlagen und Batteriespeichern in Elektrofahrzeugen) auf konventionelle Kraftwerke, Verteilnetze, Übertragungsnetze, Netzentgelte sowie Abgaben und Umlagen untersuchen lassen:

- Consentec GmbH, Fraunhofer ISI / Fraunhofer IEG und Stiftung Umweltenergierecht (2022), Batteriespeicher in Netzen – Schlussbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), Kapitel 5, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/studie-batteriespeicher-in-netzen-schlussbericht.pdf?__blob=publication-file&v=14.

Zum variierenden Verhältnis von Kurzzeitspeichern und Langzeitspeichern auf unterschiedlichen Netzebenen siehe:

- Agora Energiewende (2014), Stromspeicher in der Energiewende – Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilernetz, https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2013/speicher-in-der-energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf.

6. Ausbaubedarf an Energiespeicherkapazitäten

6.1. Ausbaubedarf an Speichern

Verschiedene Studien befassen sich mit dem Ausbau erneuerbarer Energien, um Klimaneutralität des Energiesektors zu erreichen. Bestandteil der Studien ist immer wieder die Speicherfähigkeit von Energie, um Erzeugungsflektuationen von erneuerbaren Energie abzupuffern und diese nicht abregeln zu müssen. Hinsichtlich der benötigten Speicherkapazitäten gehen die Einschätzungen aufgrund verschiedener Grundvoraussetzungen auseinander:

„Die in Zukunft optimale Menge und Kombination an Stromspeichern wird insbesondere abhängig sein von den Investitionskosten für neue Speichersysteme, der Verfügbarkeit von alternativen Flexibilitätsoptionen (wie neuen flexiblen Stromverbrauchern) sowie der Art und Geschwindigkeit des Ausbaus der Erneuerbaren Energien.“¹⁹

19 Agora Energiewende (2014), Stromspeicher in der Energiewende, https://www.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2013/speicher-in-der-energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf, S. 5.

Für das hypothetische Szenario, wonach der deutsche Strombedarf an einem durchschnittlichen Wintertag für einen halben Tag aus Stromspeichern gedeckt werden müsste, geht die Bundesnetzagentur in ihrem eher kritischen Bericht von Stromspeichern in der Größenordnung **von 180 GW Leistung und 720 GWh Kapazität** aus. Gemessen an dem derzeitigen Ausbaubedarf und dem Stand der Technik solle der Beitrag von Speichern nicht überschätzt werden. Nach Ansicht der Bundesnetzagentur sind Speicher dennoch ein wichtiger Bestandteil zur Energiewende:

- Bundesnetzagentur (2021), Regelungen zu Stromspeichern im deutschen Strommarkt, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Speicherpapier.html, S. 4.

Im Szenariorahmen der Übertragungsnetzbetreiber wird von relativ hohen Kapazitäten von Batteriespeichern (Großbatteriespeichern und haushaltsnahen Batteriespeichern) ausgegangen. Die Annahmen, an denen sich die Anzahl, Kapazitäten und Betriebsweise möglicher Großspeicheranlagen orientieren, weichen im Szenariorahmen der Übertragungsnetzbetreiber von denen der Bundesnetzagentur ab (Abbildung 9). Die Leistung von Pumpspeichern wird nur marginal erweitert.

[GW]	Szenario A 2037	Szenario B 2037	Szenario C 2037	Szenario A 2045	Szenario B 2045	Szenario C 2045
Haushaltsnahe Speicher	67,4	67,4	67,4	97,7	97,7	113,4
Großbatteriespeicher	23,7	23,7	24,2	43,3	43,3	54,5
Summe	91,1	91,1	91,6	141,0	141,0	167,9

Abbildung 9: Batteriespeicher in den Szenarien²⁰

- Bundesnetzagentur (2022), Genehmigung des Szenariorahmens 2023-2037/2045, https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bedarfsermittlung/2037/SR/Szenariorahmen_2037_Genehmigung.pdf;jsessionid=75BBE40A08110D401C9D67E6FCB87A83?_blob=publicationFile, Kap. 3.6.

Das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) in Freiburg prognostiziert den Speicherbedarf für einzelne oder mehrere Bundesländer sowohl im Jahr 2030 als auch im Jahr 2045. Der größte Speicherbedarf wird in den Ländern Hansestadt Bremen und Niedersachsen vorhergesagt mit 26,2 GW im Jahr 2030 und 44,9 GW im Jahr 2045. Insgesamt sehen die Autoren einen Gesamtbedarf von **103,8 GW** im Jahr 2030 und von **178 GW** im Jahr 2045:

- Fraunhofer ISE Kurzstudie (2022), Batteriespeicher an ehemaligen Kraftwerksstandorten, <https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/Fraunhofer-ISE-Batteriespeicher-an-ehemaligen-Kraftwerkstandorten.pdf>.

²⁰ https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/Bedarfsermittlung/2037/SR/Szenariorahmen_2037_Genehmigung.pdf;jsessionid=75BBE40A08110D401C9D67E6FCB87A83?_blob=publicationFile, S. 68.

Eine Szenariostudie des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) untersucht die Entwicklung der installierten Kapazität von stationären Batteriespeichern in Deutschland in unterschiedlichen Szenarien (*Suffizienz, Referenz, Beharrung, Inakzeptanz*, Erläuterung der Szenariennahmen siehe S. 18ff.). Der Prognosezeitraum deckt den kompletten Zeitraum von 2020 bis 2050 ab. Hinsichtlich der Energiespeicheranlagen werden für das *Suffizienzscenario* im Jahr 2050 **50 GWh** Batteriekapazität prognostiziert. Im Referenzscenario bedarf es laut Prognose im Jahr 2050 **150 GWh** und im *Beharrungsszenario* **300 GWh**. Für das *Inakzeptanzscenario* werden für das Jahr 2050 sogar **400 GWh** prognostiziert. Diese Steigerungen werden als Effekte zweier sich verstärkenden Szenarientrends erklärt: dem zunehmend suboptimalem Verhältnis zwischen Wind- und Photovoltaikanlagen und einem nur eingeschränkt erfolgten Ausbau der Stromübertragungskapazitäten in die Nachbarländer.

- Fraunhofer ISE (2020 mit Update im November 2021), Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen, Fraunhofer ISE, <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/wege-zu-einem-klimaneutralen-energiesystem.html>.

In einer älteren Untersuchung von Agora Energiewende wird die Bandbreite der installierten Leistung an Batteriespeichern für die Jahre 2023, 2033 und 2050 projiziert. Unterschieden wird zwischen Hausspeichern, E-/Plug-in-Hybrid PKW und Speichern für die Regelleistung. Weiterhin wird zwischen Minimal- und Maximalszenarien unterschieden. Für das Jahr 2033 werden eine minimale Leistung von circa **25 GW** und eine maximale Leistung von circa **90 GW** prognostiziert, wobei mobile Speicher (elektrifizierte Autos) einen Großteil der Speicherkapazität stellen. Der Markt für Regelleistung ist relativ klein. Für das Jahr 2050 werden eine minimale Leistung von circa **40 GW** und eine maximale Leistung von circa **170 GW** prognostiziert:

- Agora Energiewende (2014), Stromspeicher in der Energiewende – Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilernetz, https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2013/speicher-in-der-energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf.

Die European Association for Storage of Energy (EASE) vergleicht mehrere Studien, die den Bedarf an stationären Speicherkapazitäten für den Kontinent Europa in den Jahren 2030 und 2050 projizieren. Für das Jahr 2030 schätzen die meisten Studien den Bedarf um rund **100 GW**, der Spitzenwert liegt bei rund 600 GW an Speicherbedarf. Für das Jahr 2050 geht ein Großteil der Studien von einem Bedarf um die **250 bis 400 GW** aus. Der höchste angegebene Wert beträgt 720 GW und der geringste Wert lediglich 80 GW:

- European Association for Storage of Energy (EASE) (2022), Energy Storage Targets 2030 and 2050 - Ensuring Europe's Energy Security in a Renewable Energy System, <https://ease-storage.eu/wp-content/uploads/2022/06/Energy-Storage-Targets-2030-and-2050-Full-Report.pdf>.

Nach dem Nachhaltigkeitsszenario der IEA wird 2040 global eine Energiespeicherkapazität von annähernd **10.000 GWh** in Form von Batterien und sonstigen Speichern benötigt, damit die Welt die Klimaschutz- und Nachhaltigkeitsziele einhalten kann – fast das Fünffache des heutigen Werts:

-
- International Energy Agency (2020), Innovation in Batteries and Electricity Storage – A global analysis based on patent data, <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>, S. 28.

Das Daten- und Beratungsunternehmen Bloomberg geht global von einem kumulierten Netzspeicherausbau (ohne Pumpspeicher) von **411 GW** (oder **1.194 GWh**) bis Ende 2030 aus, was einer Verhundertfacherung der Speicherkapazitäten von 27 GW (bzw. 56 GWh) gegenüber 2021 entspricht.

- <https://about.bnef.com/blog/global-energy-storage-market-to-grow-15-fold-by-2030>

6.2. Ausbau der Wasserstoffwirtschaft

Als Alternative zur kostenintensiven und ressourcenaufwendigen Installation von Batteriespeichern – gerade in Bezug auf Langzeitspeicherung und saisonale Ungleichheiten bei der Stromerzeugung durch erneuerbare Energien – wird der Ausbau von Überkapazitäten von Wind- und PV-Anlagen forciert, die den Überschuss in Wasserstoff umwandeln und damit speicherbar machen.

- <https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie>
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) (2020), Wasserstoff als ein Fundament der Energiewende (Teil 1 und Teil 2), Institut für Solarforschung, <https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2020/wasserstoffstudie-teil-1.html>, <https://www.dlr.de/content/de/downloads/publikationen/broschueren/2020/wasserstoffstudie-teil-2.html>.
- Agora Energiewende (2014), Stromspeicher in der Energiewende – Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilernetz, https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2013/speicher-in-der-energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf.
- Bundesnetzagentur (2021), Regelungen zu Stromspeichern im deutschen Strommarkt, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Speicherpapier.html.

7. Faktoren für den wirtschaftlichen Einsatz von Speichern

7.1. Entwicklung der Levelized Cost of Storage (Speicherkosten)

Die **Speicherkosten**, die sog. Levelized Cost of Storage (LCOS = Gewichtete Speicherkosten), sinken rapide in den letzten Jahren (und stiegen zuletzt inflationsbedingt).²¹ Neue Geschäftsmöglichkeiten und Services können so entstehen.

21 <https://about.bnef.com/blog/cost-of-new-renewables-temporarily-rises-as-inflation-starts-to-bite/>

- Lazard (2021), Lazard’s Levelized Cost of Storage Analysis – Version 7.0, <https://www.lazard.com/media/451882/lazards-levelized-cost-of-storage-version-70-vf.pdf>.
- Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie (2021), Energiespeichertechnologien, Kurzübersicht 2021, <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10623>.

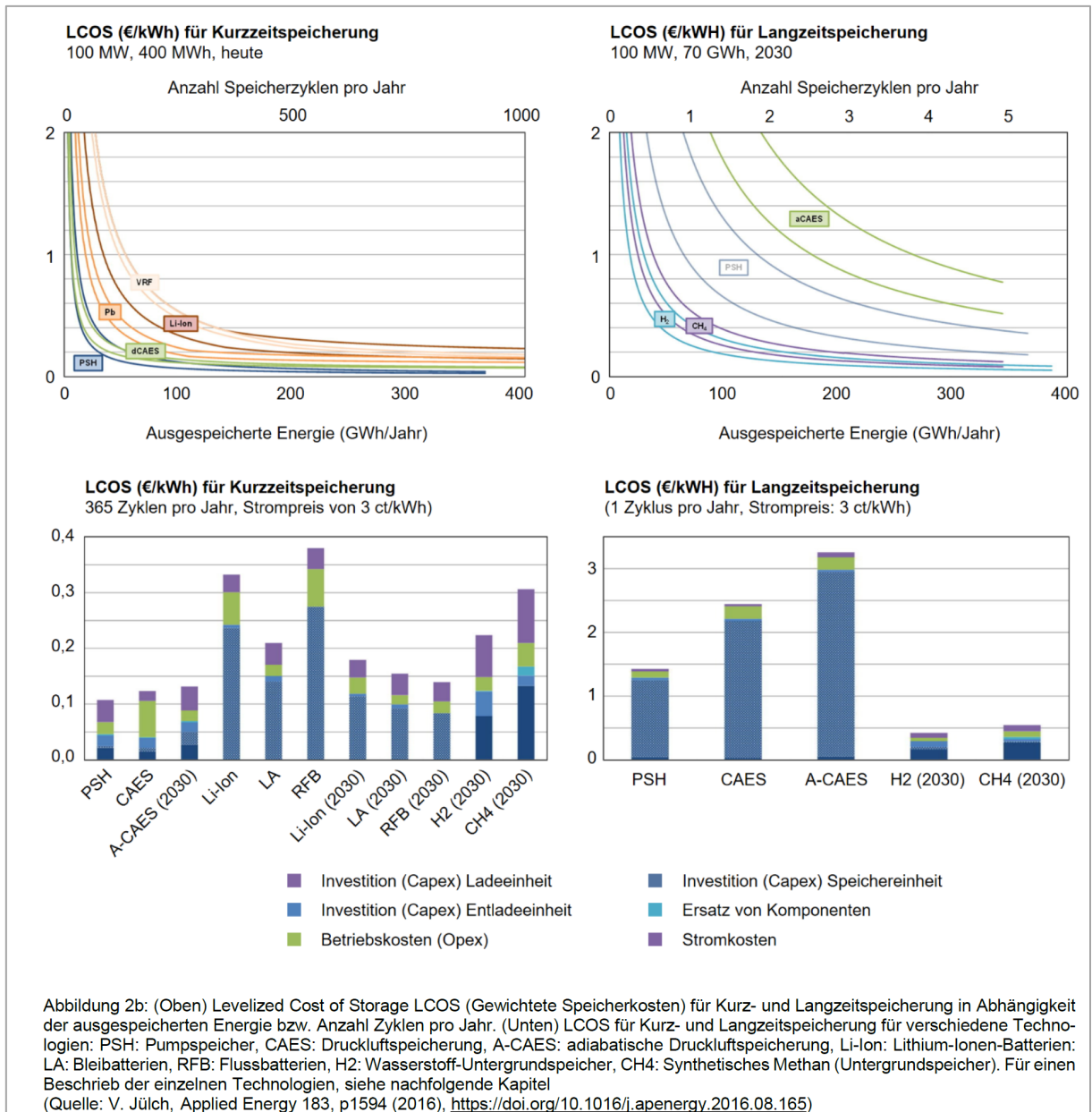


Abbildung 10: LCOS für Kurz- und Langzeitspeicherung für verschiedene Technologien²²

22 Jülich (2016) in Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie (2021), Energiespeichertechnologien, Kurzübersicht 2021, <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/10623>, S. 6.

-
- Jülch, V. (2016), Comparison of electricity storage options using levelized cost of storage (LCOS) method, *Applied Energy*, Volume 183, S. 1594-1606, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.08.165>.

7.2. Technologiefortschritte und Massenproduktion

- Fraunhofer IPA und EEP der Universität Stuttgart (2019), Energiespeicher in Produktionssystemen, https://www.ipa.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/studie_energiespeicher.html.
- Consentec GmbH, Fraunhofer ISI / Fraunhofer IEG & Stiftung Umweltenergierecht (2022), Batteriespeicher in Netzen – Schlussbericht im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi), https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Studien/studie-batteriespeicher-in-netzen-schlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=14.

7.3. Speicheranwendungen und Wirtschaftlichkeit der Geschäftsmodelle

- Lazard (2021), Lazard's Levelized Cost of Storage Analysis – Version 7.0, <https://www.lazard.com/media/451882/lazards-levelized-cost-of-storage-version-70-vf.pdf>.
- IEA (2020), Innovation in Batteries and Electricity Storage, IEA, <https://www.iea.org/reports/innovation-in-batteries-and-electricity-storage>, S. 31-34.
- World Energy Council (2020), Five Steps to Energy Storage, Innovation Insight Brief, https://www.worldenergy.org/assets/downloads/Five_steps_to_energy_storage_v301.pdf.
- Wandsted, D. (2019), Advances in electricity storage suggest rapid disruption of U.S. electricity sector, Institute for Energy Economics and Financial Analysis, <https://ieefa.org/resources/advances-electricity-storage-suggest-rapid-disruption-us-electricity-sector>.
- Ramos, F.; Pinheiro, A.; Nascimento, R.; de Araujo Silva Junior, W.; Mohamed, M.A.; Annuk, A. & Marinho, M.H.N (2022), Development of Operation Strategy for Battery Energy Storage System into Hybrid AC Microgrids, *Sustainability*, 14, 13765, <https://doi.org/10.3390/su142113765>.

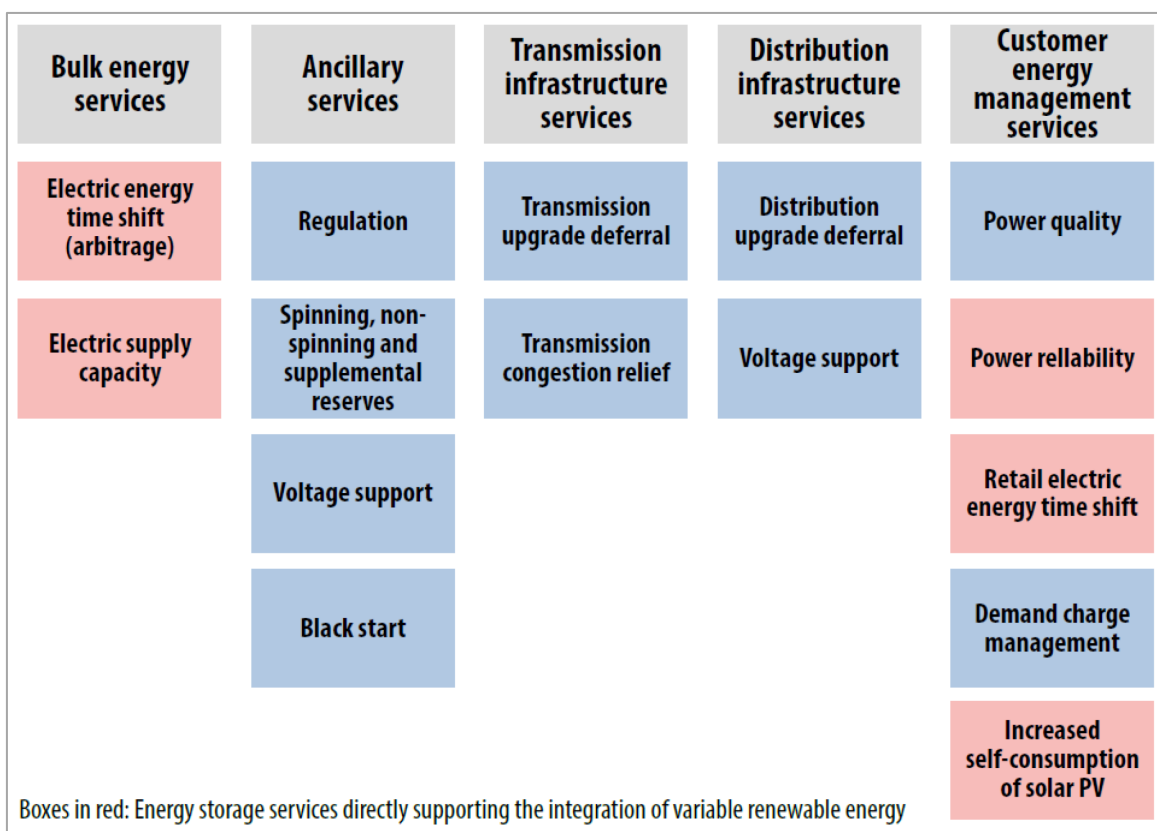


Abbildung 11: Geschäftsfelder und Dienstleistungen von Energiespeichersystemen²³

- Thema & Thema (2019), Pumpspeicherkraftwerke in stillgelegten Tagebauen am Beispiel Ham-bach-Garzweiler-Inden, 2. ergänzte Auflage, https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deli-ver/index/docId/7261/file/WP194_2ed.pdf.

7.4. Rahmenbedingungen

- Deutsche Energie-Agentur (2015), dena-NETZFLEXSTUDIE - Optimierter Einsatz von Spei-chern für Netz- und Marktanwendungen in der Stromversorgung, https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9191_dena_Netzflexstudie.pdf.
- BDEW Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e. V. (2022), Energiewende ermögli-chen – drei Schritte, um das Potential von Stromspeichern zu heben, Positionspapier, https://www.bdew.de/media/documents/2022_Positionspapier_Stromspeicherpro-gramm_Energiewende_erm%C3%B6glichen.pdf.

23 Ramos, F.; Pinheiro, A.; Nascimento, R.; de Araujo Silva Junior, W.; Mohamed, M.A.; Annuk, A. & Marinho, M.H.N (2022), Development of Operation Strategy for Battery Energy Storage System into Hybrid AC Mi-crogrids, Sustainability , 14, 13765, <https://doi.org/10.3390/su142113765>, S. 4.

-
- BNE Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V. (2022), Bidirektionales Laden von Elektrofahrzeugen, https://www.bne-online.de/fileadmin/user_upload/bne_Positionspapier_bidirektionales_Laden.pdf.
 - European Commission (2020), Study on energy storage – Contribution to the security of the electricity supply in Europe, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a6eba083-932e-11ea-aac4-01aa75ed71a1>.

7.5. Grenzen des Speicherausbaus

- Agora Energiewende (2014), Stromspeicher in der Energiewende – Untersuchung zum Bedarf an neuen Stromspeichern in Deutschland für den Erzeugungsausgleich, Systemdienstleistungen und im Verteilernetz, https://static.agora-energiewende.de/fileadmin/Projekte/2013/speicher-in-der-energiewende/Agora_Speicherstudie_Web.pdf.
- Bundesnetzagentur (2021), Regelungen zu Stromspeichern im deutschen Strommarkt, https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Downloads/DE/Sachgebiete/Energie/Unternehmen_Institutionen/ErneuerbareEnergien/Speicherpapier.html.

8. Zukünftige Speichertechnologien

Eine Übersicht zu in der Entwicklung befindlichen Speichertechnologien findet sich in der interaktiven Datenbank der IEA, die sich u.a. nach dem Technology Readiness Level (TRL) filtern lässt:

- International Energy Agency (2022), ETP Clean Energy Technology Guide, <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?selectedCCTag=Storage&selectedSector=Energy+transformation>.

Readiness ↑ level (TRL) ?	Sector	Technology	Step in value chain	Importance for net-zero emissions	
2-3	Energy transformation > Hydrogen	Storage > Materials-based storage > Adsorbents	Storage	Moderate	Details
3-4	Energy transformation > Heat	Storage > Thermochemical heat storage > Chemical reaction	Storage	Moderate	Details
3	Energy transformation > Hydrogen	Storage > Underground geologic storage > Aquifer	Storage	High	Details
3-5	Energy transformation > Hydrogen	Storage > Materials-based storage > Metal hydrides	Storage	Moderate	Details
4	Energy transformation > Hydrogen	Storage > Underground geologic storage > Depleted gas fields	Storage	High	Details
5-7	Energy transformation > Heat	Storage > Latent heat storage > High-temperature	Storage	High	Details
5-7	Energy transformation > Heat	Storage > Thermochemical heat storage > Sorption process	Storage	Moderate	Details
5	Energy transformation > Hydrogen	Storage > Underground geologic storage > Fast-cycling salt cavern	Storage	High	Details
5	Energy transformation > Hydrogen	Storage > Underground geologic storage > Lined hard rock cavern	Storage	Moderate	Details
7-9	Energy transformation > Hydrogen	Storage > Aboveground physical storage > Liquid hydrogen storage tank	Storage	High	Details
8	Energy transformation > Power	Storage > Battery storage > Redox flow	Storage	High	Details
8	Energy transformation > Power	Storage > Mechanical storage > Compressed air energy storage	Storage	Moderate	Details
8	Energy transformation > Power	Infrastructure > Integration > Smart inverter	Infrastructure	High	Details
8-9	Energy transformation > Heat	Storage > Sensible heat storage	Storage	High	Details
9	Energy transformation > Power	Storage > Battery storage > Lithium-ion (grid-scale or behind-the-meter)	Storage	Very high	Details
9	Energy transformation > Power	Storage > Mechanical storage > Flywheel	Storage	Moderate	Details
9	Energy transformation > Power	Storage > Mechanical storage > Liquid air energy storage	Storage	Moderate	Details
9	Energy transformation > Heat	Storage > Latent heat storage > Ice storage >	Storage	Moderate	Details
9-10	Energy transformation > Hydrogen	Storage > Underground geologic storage > Salt cavern	Storage	High	Details
11	Energy transformation > Power	Storage > Mechanical storage > Pumped storage	Storage	High	Details
11	Energy transformation > Hydrogen	Storage > Aboveground physical storage > Pressure vessel	Storage	High	Details
11	Energy transformation > Hydrogen	Storage > Aboveground physical storage > Ammonia storage	Storage	High	Details

Abbildung 12: Speichertechnologien und TRL-Eingruppierung²⁴

Auch das schweizerische Bundesamt für Energie hat eine Übersicht zum technologischen Status verschiedener Speichertechnologien von der IEA von 2014 übernommen. Abbildung 13 visualisiert verschiedene Wärme- und Stromspeichertechnologien auf verschiedenen Entwicklungsstufen.

24 <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?selectedCCTag=Storage&selectedSector=Energy+transformation>.

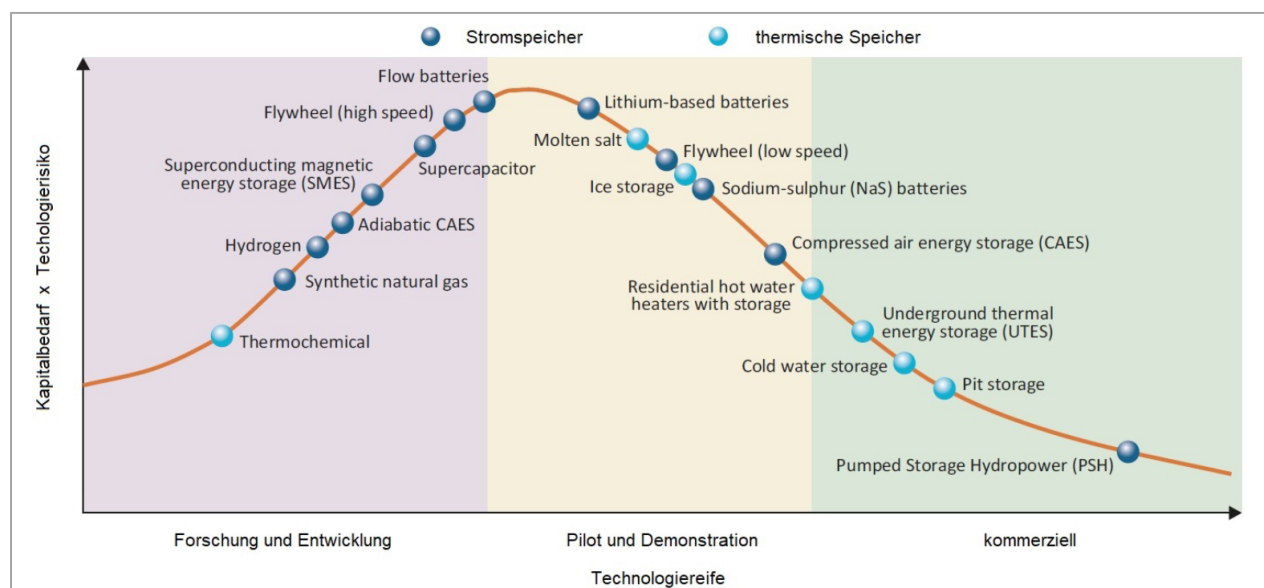


Abbildung 13: Verschiedene Wärme- und Stromspeichertechnologien auf verschiedenen Entwicklungsstufen

- Schweizerische Eidgenossenschaft, Bundesamt für Energie BFE, Energiespeichertechnologien (2021), <https://pubdb.bfe.admin.ch/de/publication/download/1062>.

Anhaltspunkte zu für Deutschland relevanten Technologien gibt der Bundesbericht Energieforschung 2022 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK):

„In für Deutschland zentralen Branchen stellen **Batterien** einen immer größeren Teil der Wertschöpfung dar. Um Investitionen anzustoßen und in diesem Zukunftsfeld künftig unabhängig von Importen sein zu können, stehen die verschiedenen **elektrischen und elektrochemischen Speicher** im Mittelpunkt der BMWK-Förderung. Dabei stehen elektrochemische Speicher für diverse wieder aufladbare Batterien (inklusive Redox-Flow- und Hochtemperatur-Batterien) sowie Superkondensatoren (sogenannte SuperCaps). [...] Darüber hinaus fördert das BMWK mechanische Speicher (Druckluft und -gas, Pump- sowie Schwungmassenspeicher) und Hochtemperatur-Wärmespeicher für die Stromspeicherung (Carnot-Batterien). Die Förderung des BMBF fokussiert Batterietechnologien der nächsten Generation wie Metall-, Luft-, Festkörper- oder neuartige Redox-Flow-Batterien. Der Schwerpunkt liegt auf Materialfragen einschließlich neuartiger Materialkombinationen. Beispielsweise arbeitet das deutsch-französische Projekt MOLIBE [...] an Metall- und Flüssigkeitsfreien Organischen Lithium-Ionen-Batterien als nachhaltige und sichere Energiespeicher. In weiteren Projekten wurden Konzepte für besonders kostengünstige wieder aufladbare Zink-Ionen-Batterien oder Eisen-Redox-Flow-Systeme als Perspektiven für stationäre Stromspeicher untersucht.“

- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Bundesbericht Energieforschung 2022, https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bundesbericht-energieforschung-2022.pdf?__blob=publicationFile&v=30, S. 46 f.

Die folgende Abbildung aus dem Bundesbericht Energieforschung 2022 zeigt, wie sich die Fördermittel für Stromspeicher in Mio. Euro in den Jahren 2012 bis 2021 auf die verschiedenen Speicherarten verteilen:

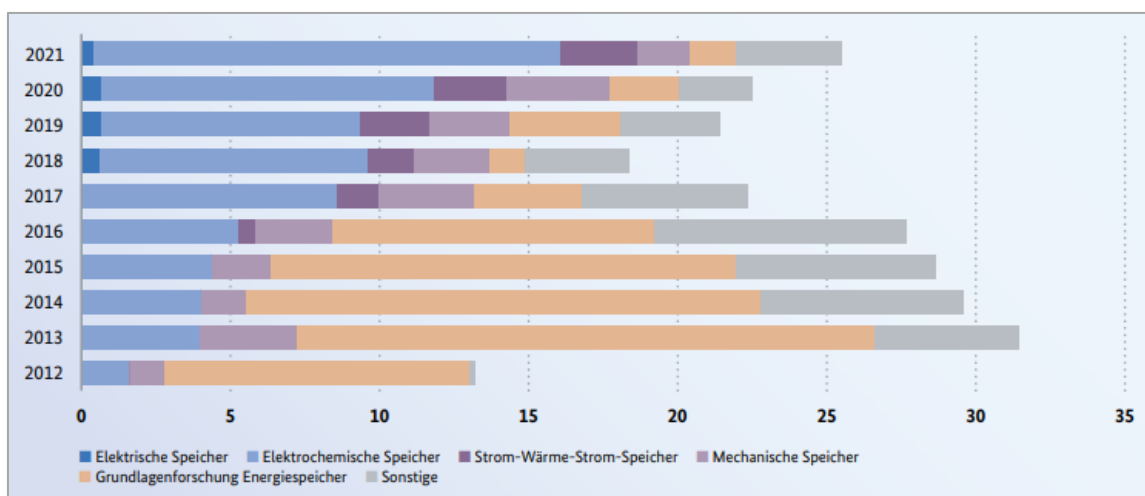


Abbildung 14: Fördermittel für Stromspeicherforschung in Mio. Euro in Deutschland ²⁵

Weitere Informationen zur strategischen Ausrichtung der Forschung in Bezug auf Stromspeicher liefert das 7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung:

- Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2018), Innovationen für die Energiewende, **7. Energieforschungsprogramm der Bundesregierung**, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/7-energieforschungsprogramm-der-bundesregierung.pdf?blob=publicationFile&v=16>, S. 52 ff.

Auf der vom Projektträger Jülich in der Forschungszentrum Jülich GmbH betriebenen und vom BMWK geförderten Internetseite zur **Energiesystemforschung** finden sich Informationen zu abgeschlossenen und laufenden Forschungsvorhaben: <https://www.energiesystem-forschung.de/forschen/stromspeicher>.

Exemplarisch und nicht abschließend wird im Folgenden auf **einzelne Forschungsschwerpunkte** zu neuartigen Speichertechnologien hingewiesen.

- Eine zentrale Forschungsfrage ist unter anderem, wie das seltene und nur unter umweltschädlichen Bedingungen abbaubare Lithium in Lithium-Ionen-Batterien ersetzt werden kann. So arbeiten das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) und die Universität Ulm gemeinsam in einem multidisziplinären Ansatz an einem Forschungscluster zu Speichertechnologien unabhängig von Lithium. Ziel des **Exzellenzclusters Post Lithium Storage (POLiS)** ist es, Elektrodenmaterialien und Elektrolyte zu entwickeln, die nachhaltige Systeme auf der Basis von Natrium-, Magnesium-, Aluminium-, Kalzium- und Chlor-Ionen ermöglichen: <https://www.postlithiumstorage.org/de/forschung>. Als vielversprechendes

²⁵ Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Bundesbericht Energieforschung 2022, <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/bundesbericht-energieforschung-2022.pdf?blob=publicationFile&v=30>, S. 46.

Material gilt z.B. **Magnesium**. Neuartige Magnesium-Batterien werden im Forschungsprojekt E-MAGIC entwickelt. vgl. <https://www.energiezukunft.eu/umweltschutz/magnesium-statt-lithium-als-material-fuer-batterien/>.

- **Redox-Flow-Batterien** werden insbesondere für die Nutzung als Großspeicher weiterentwickelt, z.B. **Organic Solid-Flow-Batterien** (<https://www.solarserver.de/2022/08/31/pilot-projekt-grossstromspeicher-aus-organic-solid-flow-batterien/>) oder **Iron Flow Batterie** (<https://www.en-former.com/iron-flow-batterien-koennten-kosten-fuer-energiespeicher-senken/>).
- Energieunternehmen und Forschungseinrichtungen forschen an **Salz als Wärmespeicher** mit sogenannten Carnot-Batterien, [https://www.iwr.de/news/salz-als-waermespeicher-vattenfall-fuehrt-kooperation-mit-saltx-in-schweden-fort-news37936#:~:text=Das%20Grundprinzip%20ist%20einfach%3A%20Energie,und%20das%20feuchte%20Salz%20getrocknet; https://www.scinexx.de/news/energie/mit-carnot-batterien-gegen-die-dunkelflaute/](https://www.iwr.de/news/salz-als-waermespeicher-vattenfall-fuehrt-kooperation-mit-saltx-in-schweden-fort-news37936#:~:text=Das%20Grundprinzip%20ist%20einfach%3A%20Energie,und%20das%20feuchte%20Salz%20getrocknet;https://www.scinexx.de/news/energie/mit-carnot-batterien-gegen-die-dunkelflaute/)
- Verschiedene Projekte widmen sich **Second-Life-Batteriespeichern**, bei denen ausgediente Busbatterien (<https://www.energiesystem-forschung.de/forschen/projekte/effskalbatt>) oder ausrangierte Elektro-Testwagen einer Zweitverwertung als Großspeicher zugeführt werden (<https://www.erneuerbareenergien.de/transformation/mobilitaet/grossstromspeicher-aus-rangierte-elektro-testwagen-helfen-dem-stromnetz>).
- Am **Energie Campus Nürnberg** werden thermische Speicherkonzepte, Wasserstoffspeicher oder auch verschiedene Power-to-Gas/Liquid Speichertechnologien untersucht: <https://www.encn.de/forschung/energiespeicher#:~:text=Im%20Forschungsbereich%20Energiespeicherung%20werden%20daher,als%20auch%20auf%20elektrischen%20Speichern.>
- Die **Agentur für Sprunginnovationen** (SPRIN-D) hat kürzlich ihren Wettbewerb zum Thema „LONG-DURATION ENERGY STORAGE“ beendet. Aus 42 Bewerbungen erhalten sechs Werberteams eine Förderung. Die Teams und deren technologischen Ansätze sind hier beschrieben: <https://www.sprind.org/de/artikel/sprind-challenge-long-duration-energy-storage/>.
