



---

## Sachstand

---

### **Überschussstrom**

Einsatzfelder und Rahmenbedingungen des abgeregelten Stroms

**Überschussstrom**

## Einsatzfelder und Rahmenbedingungen des abgeregelten Stroms

Aktenzeichen:	WD 8 - 3000 - 043/16
Abschluss der Arbeit:	27.5.2016
Fachbereich:	WD 8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung

---

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

<b>1.</b>	<b>Einleitung</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Einsatzfelder des abgeregelten Stroms</b>	<b>4</b>
2.1.	Power-to-Gas	7
2.2.	Pumpspeicherkraftwerk	8
2.3.	Druckluftspeicher	8
2.4.	Power-to-Heat	9
2.5.	Batteriespeicher	9
2.5.1.	Redox-Flow-Batterien	9
2.5.2.	Lithium-Ionen-Akkus	10
2.6.	Flüssigsalz als Wärmespeicher	10
2.7.	Stromexport	10
2.8.	Stromspeicherung und Energieregulierung	11
<b>3.</b>	<b>Rechtliche und technische Rahmenbedingungen des abgeregelten Stroms</b>	<b>11</b>
3.1.	Elektrochemische Speicher	12
3.2.	Druckluftspeicher und Wasserspeicher	12
3.3.	Power-to-Gas	12
3.4.	Verbrauchssteuerung	12
3.5.	Elektromobilität	12
3.6.	Weitere Gesetze, Verordnungen und Richtlinien	13
<b>4.</b>	<b>Quellen und weiterführende Literatur</b>	<b>13</b>
<b>5.</b>	<b>Anhang</b>	<b>16</b>
5.1.	Tabelle 1	16
5.2.	Tabelle 2	17
5.3.	Tabelle 3	20

## 1. Einleitung

Im Stromnetz muss sich zu jeder Zeit etwa so viel elektrischer Strom befinden, wie benötigt wird. Eine wichtige Steuergröße ist die Residuallast. Dies ist die Differenz zwischen dem benötigten Strom und dem Strom, der erzeugt wird und zu dem beispielsweise auch die erneuerbaren Energien beitragen. Die Residuallast schwankt aufgrund der erneuerbaren Energien je nach Wind und Sonne. Kann das Stromnetz keine Energie mehr aufnehmen, stellen die Betreiber ihre Anlagen ab. Die Anlagen könnten wetterbedingt Strom produzieren, der Strom kann aber nicht gespeichert werden und ist über. Diese Stromart wird auch als Überschussstrom, negative Residuallast oder Stromüberschuss bezeichnet. Abgeregelter Strom ist der Teil, den die Anlagen aufgrund der Abschaltung nicht produzieren.

Nicht nur bei hohen Anteilen erneuerbarer Energien im Stromsystem ist das Speichern von Strom in größerem Umfang notwendig. Auch um abgeregelten Strom trotzdem produzieren zu können, sind Speichermöglichkeiten nötig.

Schätzungen gehen davon aus, dass im Jahr 2040 bei 65 Prozent des Stroms aus erneuerbaren Quellen etwa 40 TWh Speicherkapazität benötigt werden.<sup>1</sup> Durch die Energiewende soll der Anteil erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch bis 2050 auf 80 Prozent steigen. Es wird daher nötig, überschüssigen Strom in eine sinnvolle Nutzung zu überführen. Die bisherigen und aktuellen Forschungsförderungen zeigen, dass das Themenfeld Energiespeicherung auf politischer Ebene einen hohen Stellenwert hat<sup>2</sup>, weil hier noch besonders hoher Entwicklungsbedarf besteht. Auch den wirtschaftlichen Nutzen diskutieren Interessenvertreter kontrovers. Beispielsweise sinkt bei einem aufwendigen Netzausbau der Bedarf an Energiespeicherung. Dagegen könnten geeignete Energiespeicher einen notwendigen Netzausbau vermeiden.<sup>3</sup>

Die vorliegende Arbeit beschreibt die wichtigsten Speichertechnologien, ihre Vor- und Nachteile und gibt einen Überblick der technischen und rechtlichen Richtlinien.

## 2. Einsatzfelder des abgeregelten Stroms

Den Energiebedarf regeln Energieunternehmen durch Energieproduktions- und Lastenmanagement. Neben der Abschaltung der erneuerbaren Energien sind Energiespeicherung und Wärmebereitstellung weitere Flexibilisierungsmethoden zur Regelung des Stromüberschusses.

---

1 Technology Review (2013). Special „Energie“, (2013)

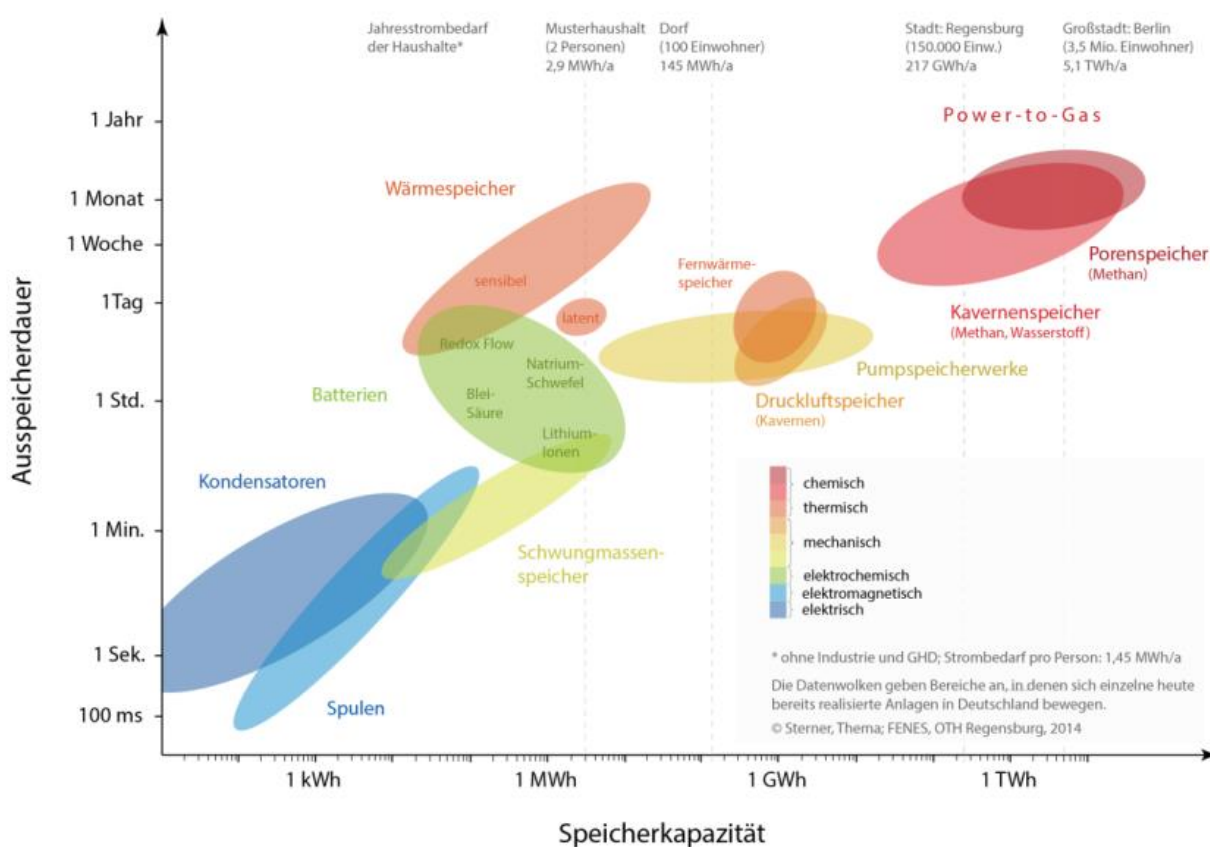
Es reichen 950 MW produzierte Leistung aus, um den Strombedarf von rund einer Million Menschen sieben Stunden zu decken.

2 Weil, M. (2015). „Energiespeicher für Energiewende und Elektromobilität“, Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis 24. Jg., Heft 3 Dezember 2015, S. 4

Bundesregierung (2016). „Bundesbericht Forschung und Innovation 2016“, BT-Drs [18/8550](#), S. 129 ff

3 Weil, M. (2015). „Energiespeicher für Energiewende und Elektromobilität“, Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis 24. Jg., Heft 3 Dezember 2015, S. 5

Die Speicherung von Strom ist mit Verlusten verbunden und teuer. Derzeit stehen verschiedene Speichertechnologien zur Wahl: Pumpspeicher, Druckluftspeicher, Batterien (Blei-Säure, Lithium-Ionen, Redox-Flow-Akkumulatoren) oder Erzeugung und Rückverstromung von Wasserstoff oder Methan („Power-to-Gas“). Die einzelnen Techniken unterscheiden sich in ihrer Energiedichte, Speicherkapazität, Wirkungsgrad, Zyklenfestigkeit und Kosten. Es gibt eine Vielzahl verschiedener Technologien in unterschiedlichen Anwendungsgebieten und Entwicklungsstadien. Die folgende Grafik<sup>4</sup> zeigt verschiedene Speicherarten im Vergleich nach Speicherkapazität und Ausspeicherungsdauer.



Die ökonomische Bewertung der Speichertechnologien hängt auch von den Stromgestehungskosten ab. Dazu gehören die Speicherinfrastruktur, die Betriebskosten und der Wirkungsgrad. Je geringer die Zahl der Speicherzyklen, desto stärker steigen die Stromgestehungskosten. Die Differenz des Strompreises bei Einspeisung und Entleerung (Spread) spielen ebenso eine Rolle.

Je nach Anwendungsfall favorisieren Entwickler und Unternehmen unterschiedliche Energieerzeugungsarten und Speichertechnologien. Ein paar Beispiele zeigen die unterschiedliche Interessenlage:

4 Sterner, M., Stadler, I. (2014). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, S. 605

Die Deutsche Energieagentur (dena) fordert die Unterstützung der Energieverbände (BDEW, BEE, BNE, BVES, VDMA und VKU) und wirtschaftlichere Rahmenbedingungen zu Energiespeichern. „Der Gesetzgeber sollte das Strommarktgesetz nutzen, um einen einheitlichen Gesetzesrahmen für Energiespeicher zu schaffen. Insbesondere die Einstufung von Energiespeichern als „Letztverbraucher“ würde Speicherbetreiber mit Entgelten und Abgaben belasten, die den wirtschaftlichen Betrieb gefährden. [...] Neben Stromspeichern betrifft das auch Power to Gas als eine wichtige Option für die Sektorkopplung. Sie ermöglicht die Integration erneuerbarer Energien beispielsweise in den Verkehrs- oder Wärmebereich.“<sup>5</sup>

Nach Aussage der iw-Dienstes rät der VDE (Verband der Elektrotechnik Informationstechnik) beispielsweise bei einem Anteil von 40% erneuerbarer Energien die Produktion zu begrenzen, statt weitere Pump- bzw. Druckluftspeicher zu bauen.<sup>6</sup>

Das Unternehmen „The Mobility House“ favorisiert die Kombination von Solarenergie und Speicher. Ein Schwarm von privaten Elektroautos soll sich privat und gewerblich intelligent und bidirektional laden lassen (Vehicle-to-Grid).<sup>7</sup>

Im Rahmen der Forschungsinitiative der Bundesregierung verfolgen „Forscher im Projekt WOMBAT die Idee, das Strom- und Gasnetz miteinander zu verbinden. Überschüssiger Strom aus regenerativen Quellen soll zur Gewinnung von Wasserstoff genutzt werden. Dieser wird mit Kohlendioxid in einer Biogasanlage zu Methan, also der Hauptkomponente von Erdgas, synthetisiert. So lässt sich die komplexe Infrastruktur der Gaswirtschaft vom Transport bis zur Speicherung nutzen.“<sup>8</sup>

Das Öko-Institut arbeitete bis 2015 an einem Projekt über „Zukünftige innovative Energiespeicher: Recycling- und Umweltaforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken für deren Fertigung“. „Im Projekt wird flankierend zur Energiewende frühzeitig der umwelt- und ressourcenbezogene Handlungsbedarf ermittelt, der sich aus dem zunehmenden Einsatz an Energiespeichern ergeben wird. Der Schwerpunkt liegt auf Hochleistungsbatterien und der Erzeugung, Speicherung und Nutzung von Wasserstoff. Es werden die zu erwartenden Rohstoffbedarfe ermittelt und Empfehlungen hinsichtlich Versorgungssicherheit, Ressourcenschonung, Recycling

---

5 Deutsche Energieagentur (dena) (2016). „dena unterstützt Forderungen der Energieverbände zu Energiespeichern“ <http://www.dena.de/aktuelles/alle-meldungen/dena-unterstuetzt-forderungen-der-energieverbaende-zu-energiespeichern.html>

Deutsche Energieagentur (dena) (2014). „Die Bedeutung von Stromspeichern im Energiesystem“, [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Presse/Meldungen/2014/14-10-07\\_dena\\_Beitrag\\_SpeicherDebatte.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Presse/Meldungen/2014/14-10-07_dena_Beitrag_SpeicherDebatte.pdf)

6 iw-Dienst (2013). „Wohin mit der erneuerbaren Energie?“, Nr. 24, 13.Juni 2013, S. 6

7 bild der wissenschaft (2016). Themenheft „Die Challenge“, (2016)

8 Forschungsinitiative der Bundesregierung „Energiespeicher“ (2013). [http://forschung-energiespeicher.info/projekt-schau/gesamtliste/projekt-einzelsicht/95/Weltweit\\_erste\\_industrielle\\_Power\\_to\\_Gas\\_Anlage/](http://forschung-energiespeicher.info/projekt-schau/gesamtliste/projekt-einzelsicht/95/Weltweit_erste_industrielle_Power_to_Gas_Anlage/)

und Umweltaforderungen abgeleitet. Auch wird der Anpassungsbedarf rechtlicher Regelungen geprüft.“<sup>9</sup> Der schriftliche Bericht steht noch aus.

In seinem Gutachten kommt der Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) auch zu dem Schluss, „dass bis zu einer weitestgehend auf erneuerbare Energien basierenden Stromversorgung erhebliche technische Fortschritte erfolgen werden.“<sup>10</sup>

Die wichtigsten Energiespeichersysteme werden im Folgenden kurz vorgestellt. Tabelle 1 im Anhang, „Beispiele verschiedener Energiespeichertechnologien und Kombinationen aus Speichereinheiten“<sup>11</sup>, liefert Informationen zur Speicherklasse der Speichertechnologien, ihres Einspeicherns, Speicherns und Ausspeicherns und ihrer Funktion aus Sicht des Strom-, Wärme- und Verkehrssektors.

Einen Überblick über Mittelwerte der wichtigsten technischen und ökonomischen Parameter verschiedener Speichertechnologien finden sich in Tabelle 2<sup>12</sup> (s. Anhang). Eine weitere Tabelle 3<sup>13</sup> stellt die Stärken und Schwächen verschiedener Speichertechnologien gegenüber.

### 2.1. Power-to-Gas

Durch Elektrolyse, dem elektrochemischen Spalten von Wasser, erhält man Wasserstoff, den man zu Methan weiter verarbeitet. Bei diesem Prozess benötigt man zudem CO<sub>2</sub>. Methan wird als künstliches Erdgas ins Erdgasnetz geleitet oder in Erdgastanks gespeichert. Man nennt dies auch synthetisches Gas (Synthetic oder Substitute Natural Gas, SNG). Dieses Gas eignet sich zum Kochen, Heizen, Erdgasfahrzeuge tanken oder als Brennstoff für Gaskraftwerke. Mit dieser Methode lassen sich große Mengen über eine lange Zeit speichern. Der Gesamtwirkungsgrad mit Rückverstromung liegt heute um 30 %. Für 2050 erwarten Prognosen 40 %.<sup>14</sup>

Der Sachverständigenrat für Umweltfragen hält diese Speichertechnologie für teurer und stärker verlustbehaftet als andere Speichertechnologien. Der SRU räumt der Umwandlung von Strom aus

---

9 Öko - Institut e.V. (2015). Projekt „Zukünftige innovative Energiespeicher: Recycling- und Umweltaforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken für deren Fertigung“, <http://www.oeko.de/for-schung-beratung/projekte/pr-details/ableitung-von-recycling-und-umweltaforderungen-und-strategie-zur-vermeidung-von-versorgungsrisiken/>

10 Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2013). Sondergutachten „Den Strommarkt der Zukunft gestalten“, (2013), S.49 ff

11 Sterner, M., Stadler, I. (2014). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, S.31 f

12 Sterner, M., Stadler, I. (2014). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, S.600 ff

13 Sterner, M., Stadler, I. (2014). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, S. 614 ff

14 Wietschel, M. et. al., (2015). „Energietechnologien der Zukunft“, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2015, S. 229 ff

erneuerbaren Energien in Wasserstoff oder Methan (Power-to-Gas) aber auch die größten Entwicklungspotenziale ein.<sup>15</sup>

Die Wasserstoffproduktion mit Hilfe von Strom sieht Brennstoffzellenautos als Abnehmer dieses „grünen“ Wasserstoffs.

Nachteil der Power-to-Gas-Anlagen ist die derzeitige Wirtschaftlichkeit des Betriebes. Erst bei 3.000-4.000 Volllaststunden pro Jahr sollen sich die Anlagen rentieren. 4.000 Stunden aus Überschussstrom sollen aber erst bei einem Anteil erneuerbarer Energien von 90 Prozent erreicht werden.<sup>16</sup>

Bei Power-to-Liquid entsteht synthetischer Flüssigkraftstoff wie Diesel, Benzin oder Kerosin aus Wasserstoff und CO<sub>2</sub>. Der Wirkungsgrad liegt bei ca. 65 %.

## 2.2. Pumpspeicherkraftwerk

Bei Pumpspeicherkraftwerken wird bei Bedarf Wasser in ein künstliches oder natürliches Oberbecken gepumpt. Meist geschieht dies nachts mit dem preiswerteren Grundlaststrom.<sup>17</sup> Wird Strom gebraucht, fließt das Wasser durch Turbinen zurück und erzeugt Strom. Pumpspeicherkraftwerke sind flexibel. Sie können mehrere Hundert Megawatt Strom aufnehmen oder abgeben und Schwankungen der erneuerbaren Energien ausgleichen. Ihr Wirkungsgrad von rund 75 % liegt verglichen mit anderen Speichern im Mittelfeld. Pumpspeicherkraftwerke gelten derzeit als die wirtschaftlichste Speichertechnologie, stoßen aber nicht immer auf eine Akzeptanz der Öffentlichkeit.

## 2.3. Druckluftspeicher

Druckluftspeicher nutzen den überschüssigen Strom, um Luft durch Kompressoren zu verdichten und in unterirdischen Hohlräumen oder porösem Gestein zu speichern. Wird Strom benötigt, treibt die Druckluft Turbinen zur Stromerzeugung an. Da die rückströmende Luft sehr kalt ist, muss diese erwärmt werden, damit die Turbinen nicht vereisen. Der Wirkungsgrad leidet darunter (unter 50%). Entwickler versuchen die bei der Kompression entstandene Wärme zu speichern und für die Erwärmung der Luft zu nutzen.

Druckluftspeicher sind an örtliche Gegebenheiten gebunden und gelten derzeit noch als unrentabel.

---

15 Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2013). Sondergutachten „Den Strommarkt der Zukunft gestalten“, (2013), S.43

16 Frick, F. (2016). „Viel Wind um Windgas“, bild der wissenschaft (2016). Themenheft „Die Challenge“, (2016)

17 Zahoransky, R. (Hrsg.) (2010). „Energietechnik“ Vieweg und Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010



## 2.4. Power-to-Heat

Der Begriff Power-to-Heat bezeichnet unterschiedliche Konzepte zur Umwandlung von (überschüssigem) Strom in Wärme wie z.B. Wärmepumpen oder Heizstäbe.<sup>18</sup> Thermische Speicher speichern den Strom als Wärme, die für unterschiedliche Einsätze verwendet wird. Eine Wiedereinspeisung ins Stromnetz ist in der Regel nicht gegeben. Power-to-Heat soll die kostengünstigste Speicherform sein.<sup>19</sup>

## 2.5. Batteriespeicher

Batterien in Verteilernetzen sollen helfen, Lastspitzen zu speichern und bei Bedarf selbst zu verbrauchen (Elektroautos) oder wieder ins Netz abzugeben. Wobei weniger der Superakku für alles im Vordergrund steht, sondern vielmehr wiederaufladbare Batterien für universelle Anwendungen, wie z.B. private Photovoltaikanlagen in Kombination mit hauseigenen Batteriespeichern. Der Strom kann an das Stromnetz zurückgegeben werden (Rückverstromung).

Batteriespeicher haben zyklische und kalendarische Lebensdauern. Die zyklische Lebensdauer liegt zwischen 760 und 1.200 Ladezyklen. Lediglich die Redo-Flow-Batterien haben Lebensdauern von ca. 5.000 Zyklen. Im Vergleich dazu haben elektrische Speicher wie Kondensatoren oder Spulen eine zyklische Lebensdauer von ca. eine Million Zyklen, aber deutlich niedrigere Speicherkapazitäten. Während der Lebensdauer z.B. eines Hybridfahrzeugs wird daher der Ersatz der Batterie notwendig. Die Betriebskosten steigen damit.

Entwickler arbeiten noch an der Lösung technischer Probleme. Derzeit gelten Batteriespeicher als zu teuer und schwer und haben zu lange Ladezeiten.

### 2.5.1. Redox-Flow-Batterien

Diese Flüssigbatterien speichern die Energie in chemischen Verbindungen. Sie besitzen einen externen Speicher. Die Speicherzeiten sind lang und die Tankgröße ist beliebig. Erste Heimspeicher sind auch mit dieser Technologie auf dem Markt. Ein Modellprojekt auf der Insel Pellworm soll die Funktion des Batterietyps als Großspeicher bestätigt haben. Die 110 000 Liter Elektrolytflüssigkeit auf Vanadium-Basis haben eine hohe Kapazität (1,6 MWh), können aber von den möglichen 7 MW Strom aus erneuerbaren Energien nur 200 Kilowatt aufnehmen. Ein schnell ladender Lithium-Ionen-Akku mit geringer Kapazität (0,56 MWh) muss das System ergänzen.<sup>20</sup>

---

18 Altrock, M., Thomas, H., Vollprecht, J. (2016). „Power to Heat – Kostenbelastungen, Regelenergie und Überschussstrom“, Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft: EnWZ – (2016), 3, S.106 - 112

19 Sterner, M., Stadler, I. (2014). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, S. 743

20 Austen, F. (2016). „Insel der Zukunft“, bild der wissenschaft Themenheft „Die Challenge“, (2016)

### 2.5.2. Lithium-Ionen-Akkus

Lithium-Ionen-Batterien haben eine hohe Energiedichte und wenig Kapazitätsverlust bei häufigem Laden. Sie haben einen internen Speicher und werden in Laptops und Smartphones eingesetzt. Die bei der Herstellung verwendeten Rohstoffe Lithium und Kobalt gelten als knapp.

Ein Beispiel für einen Großbatteriespeicher liefert die Firma Younicos. Dort sind über 25.000 Lithium-Ionen-Zellen mit einer Leistung von 5 MW errichtet worden.<sup>21</sup> Auch in Elektroautos werden Lithium-Ionen-Akkus eingesetzt. Der Professor für Energiespeicherung an der Universität Stuttgart, Butscher, meint in einem Interview<sup>22</sup>, dass der Batteriepreis auf ein Zehntel gedrückt werden müsste, um die Einführung von Elektroautos in den Städten zu ermöglichen. Auch viele Heimspeicher setzen diese Technologie ein. Die kalendarische Lebensdauer von unter fünf Jahren reicht für den Konsumgüterbereich, für den Industriebereich sind Lebensdauern von über 10 Jahren akzeptabel.<sup>23</sup>

### 2.6. Flüssigsalz als Wärmespeicher

Diese Technologie nutzt die Strom-Wärme-Strom-Speicherung. Strom wird in Wärme umgewandelt. Die Wärme wird in Wasserbehältern oder Salzschnmelzen gespeichert und bei Bedarf wieder in Strom umgewandelt. Der Wirkungsgrad ist derzeit kleiner als bei Druckluftspeichern.<sup>24</sup>

Zum Beispiel entwickeln Forscher für private Haushalte eine Wärmebatterie. Der zwei Kubikmeter große Salztank soll 85 KWh Wärme speichern können.<sup>25</sup>

### 2.7. Stromexport

Überschussstrom kann auch für den Stromexport von deutschen Stromproduzenten in andere Länder genutzt werden. Auch den Export in andere Länder zur Speicherung (wie in norwegische Pumpspeicherkraftwerke) mit späterem Import nutzen die Energieversorger schon jetzt.

Allerdings stehen nicht alle deutschen Nachbarländer dem deutschen Überschussstrom positiv gegenüber. Aus Sorge um die Stabilität der eigenen Stromnetze und um Strom exportieren zu können, installieren bzw. arbeiten beispielsweise Tschechien, Polen, die Niederlande, Belgien und Frankreich derzeit an Blockadevorrichtungen. Die Länder haben Deutschland aufgefordert,

---

21 Frick, Frank, (2016). „Boom für Batterieparcs“, bild der wissenschaft Themenheft „Die Challenge“ (2016), S.31

22 Butscher, R., Hess, W. (2016). „Die Welt der Energie wird deutlich bunter“, bild der wissenschaft Themenheft „Die Challenge“ (2016), S.50

23 Sterner, M., Stadler, I. (2014). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014, S. 270

24 Bine Informationsdienst (2014). „Flüssiges Salz überträgt Wärme“, <http://www.bine.info/themen/news/fluessiges-salz-uebertraegt-waerme/#>

25 Wiemker, H. (2016). „Hitze für später“, bild der wissenschaft Themenheft „Die Challenge“, (2016)

das eigene Stromnetz auszubauen und mit zukünftiger Aussperrung gedroht, wenn dies nicht geschieht.<sup>26</sup>

## 2.8. Stromspeicherung und Energieregulierung

„Im Bereich der Energiespeicher (positive und negative Ausgleichsenergie bereitstellbar) sind bei den großen typischen Leistungen von 100 MW bis 1 GW v. a. Druckluftspeicher (100 MW - 1 GW) und Pumpwasserkraftwerke (10 MW - 1 GW) sowie Wasserstoffspeicher (10 kW - 1 GW) (z. B. Kavernen mit entsprechender Rückverstromung über Gasturbinen) zu nennen. Sie sind v. a. für die mittel- und langfristige Speicherung nutzbar. Bei modularen Speichern mit geringerer typischer Leistung von 1 kW bis 100 MW und ohne Doppelnutzen sind v. a. Akkumulatoren und elektrische Speicher zu erwähnen. Während Kondensatoren, Schwungräder und Nickel-Cadmium-/Nickel-Metalhydrid-Akkumulatoren v. a. im Sekunden bis Minutenbereich der Bereitstellung von Ausgleichsenergie genutzt werden können, da sie ein hohes Leistungs- zu Energieverhältnis aufweisen, können Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Akkumulatoren im Bereich von Sekunden bis mehreren Stunden eingesetzt werden. Weitere Akkumulatoren für den Stundenbereich sind Natrium-Schwefel- und Zink-Brom-Akkumulatoren. RedoxFlow-Akkumulatoren haben den Vorteil, dass der Strom in chemischer Energie in flüssigen Medien gespeichert wird, die die Aufgabe der Elektroden übernehmen. Durch Austausch der Flüssigkeit und Speicherung in extra Tanks kann die Speicherkapazität beliebig erhöht werden. Dadurch ist der Redox-Flow-Akkumulator auch für längerfristige Speicherung sehr gut nutzbar. Die Technologie ist allerdings noch in der Entwicklung. Modulare Speicher mit Doppelnutzen (1 kW–1 MW) sind v. a. Elektro- und Plug-in-Hybrid-Fahrzeuge, die bidirektional geladen werden können, und Akkumulatorensysteme, die zusätzlich zu Photovoltaikanlagen installiert wurden. Sie sind typischerweise im Sekunden bis Stundenbereich einsetzbar.“<sup>27</sup>

## 3. Rechtliche und technische Rahmenbedingungen des abgeregelten Stroms<sup>28</sup>

Die vier Regelsetzer Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN), Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (DKE), Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI) und Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. (DVGW) haben die technischen Regelungen zum Themenkomplex „Energiespeicher“ in einer Normungsroadmap „Energiespeicher“ federführend zusammengefasst. In regelmäßigen Abständen wird diese Roadmap aktualisiert und bewertet.<sup>29</sup>

---

26 Oroschakoff, K., Die Welt online (2015). „Nachbarländer wollen deutschen Strom blockieren“, <http://www.welt.de/wirtschaft/energie/article144757879/Nachbarlaender-wollen-deutschen-Strom-blockieren.html>

27 Droste-Franke, B. (2015). „Energiespeicher und alternative Energieausgleichsoptionen aus diversen systemischen Perspektiven“, Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis 24. Jg., Heft 3 Dezember 2015, S. 40

28 Wietschel, M. et. al., (2015). „Energietechnologien der Zukunft“, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2015

29 Deutsches Institut für Normung (DIN e.V.) (2016) „Deutsche Normungsroadmap Energiespeicher“, Version 1, <http://www.din.de/blob/117984/2d5a13f0649b2e807f5dba34f6ea1bd7/normungsroadmap-energiespeicher-data.pdf>

Zu den technischen Regelungen kommen zahlreiche gesetzliche Regelungen, die zum Teil für alle Speicherarten gelten, zum Teil auf die Besonderheiten der Speicherrahmenbedingungen eingehen. Die folgende Aufstellung erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit.

RICHTLINIE 2009/28/EG DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 23. April 2009 zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen und zur Änderung und anschließenden Aufhebung der Richtlinien 2001/77/EG und 2003/30/EG, <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:DE:PDF> , Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2014, Novelle 2016 EEG 3.0

Fortschrittsbericht nach Artikel 22 der Richtlinie 2009/28/EG zur Förderung der Nutzung von Energie aus erneuerbaren Quellen, [http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/fortschrittsbericht-artikel-22-richtlinie-2009-28-eg.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](http://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/fortschrittsbericht-artikel-22-richtlinie-2009-28-eg.pdf?__blob=publicationFile&v=1)

### 3.1. Elektrochemische Speicher

- Punktuelle gesetzliche Regelungen im EnWG und EEG, kein umfassender Ansatz
- Seit 2013 KfW-Marktanreizprogramm für PV-Batteriespeicher
- Normen und Standards sind vorhanden

### 3.2. Druckluftspeicher und Wasserspeicher

- §118 Abs. 7 EnWG (Befreiung von Netzentgelten für den Ladestrom)
- Richtlinie 2003/54/EG (Unbundling), Speicher gelten nicht als Infrastruktur
- §12 Abs. 1 EEG (Entschädigungszahlung bei Abregelung wegen Netzengpässen für erneuerbare Energien)

### 3.3. Power-to-Gas

- § 3 Abs. 10c EnWG (SNG zählt als Biogas, wenn überwiegend regenerative Quellen für Elektrolysestrom/CO<sub>2</sub> verwendet werden)
- §§ 33 GasNZV und § 20a GasNEV (Netzbetreiber trägt Anschlusskosten, vorrangige Einspeisung, Vergütung vermiedener Netzentgelte (0,7 ct/kWh))
- DVGW-Arbeitsblätter G 260, G 262 (Einspeisegrenze für H<sub>2</sub> ins Gasnetz: 5%)
- (Bestehende) Anwendungen, maximaler H<sub>2</sub> – Anteil: Gasturbinen ca. 2 %, Erdgasfahrzeuge: 2 % (DIN 51624)
- Technische Richtlinien für den Netzanschluss (BDEW 2008, VDN 2004 und 2007)

### 3.4. Verbrauchssteuerung

- § 6 – 10 EnWG (Entflechtung), AbLaV zur Förderung von Lastflexibilität, StromNEV, geplantes Verordnungspaket „Intelligente Netze“

### 3.5. Elektromobilität

- CO<sub>2</sub>-Flottenemissionen von Neuwagen, batterieelektrische Fahrzeuge BEV als Null-Emissions-Fahrzeuge bilanziert und Bonus-Regelung bis 2023

### 3.6. Weitere Gesetze, Verordnungen und Richtlinien

- EU-Ökodesign Richtlinie (2009/125/EG)
- EU-Energieeffizienz Richtlinie (2012/27/EG)
- EEG-Umlage und Energiesteuer
  - o Beispiele: § 37 Abs. 4 EEG 2012 regelt die EEG-Umlagebefreiung von Stromspeichern (z. B. Pumpspeicherkraftwerke und Batteriespeicher), sofern der gespeicherte Strom ausschließlich wieder in das Netz, aus dem er bezogen wurde, eingespeist wird. Auch § 57 Abs. 4 Satz 1 und 2 des Regierungsentwurfs für ein Gesetz zur grundlegenden Reform des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und zur Änderung weiterer Bestimmungen des Energiewirtschaftsrechts (EEG-RegE) sieht diese EEG-Umlagebefreiung für Stromspeicher weiterhin vor.<sup>30</sup>
- EEG-WärmeG
- VDE – Technikregeln
- Technische Richtlinien für den Netzanschluss
- Umweltverträglichkeitsprüfung; Regelungen der Auswirkungen auf das Landschaftsbild, Menschen sowie ökologischen Einflüssen
- EEG-Einspeisevorrang und Einspeisebedarf für Photovoltaik

## 4. Quellen und weiterführende Literatur

Die Internetseiten sind zwischen dem 12. und 27. Mai 2016 aufgerufen worden.

Altrock, M., Thomas, H., Vollprecht, J. (2016). „Power to Heat – Kostenbelastungen, Regelenergie und Überschussstrom“, Zeitschrift für das gesamte Recht der Energiewirtschaft: EnWZ – (2016), 3, S. 106 - 112

Austen, F. (2016). „Insel der Zukunft“, bild der wissenschaft Themenheft „Die Challenge“, (2016)  
bild der wissenschaft (2016). Themenheft „Die Challenge“, (2016)

Bine Informationsdienst (2014). „Flüssiges Salz überträgt Wärme“, <http://www.bine.info/themen/news/fluessiges-salz-uebertraegt-waerme/#>

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (2015). „Bundesbericht Energieforschung 2015“, <https://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/bundesbericht-energieforschung.property=pdf.bereich=bmwi2012.sprache=de.rwb=true.pdf>

Bundesregierung (2016). „Bundesbericht Forschung und Innovation 2016“, BT-Drs [18/8550](#)

---

30 Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2014). „Definition des Begriffes Energiespeicher“, [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20140606-o-definition-des-begriffes-energiespeicher-de/\\$file/2014-06-06\\_Definition\\_Energiespeicher\\_final\\_ohne-Ansprechpartner.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20140606-o-definition-des-begriffes-energiespeicher-de/$file/2014-06-06_Definition_Energiespeicher_final_ohne-Ansprechpartner.pdf)

---

Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. (BDEW) (2014). „Definition des Begriffes Energiespeicher“, [https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20140606-o-definition-des-begriffes-energiespeicher-de/\\$file/2014-06-06 Definition Energiespeicher final ohne-Ansprechpartner.pdf](https://www.bdew.de/internet.nsf/id/20140606-o-definition-des-begriffes-energiespeicher-de/$file/2014-06-06%20Definition%20Energiespeicher%20final%20ohne-Ansprechpartner.pdf)

Bundesverband erneuerbare Energien (BEE) (2015). „Der positive Beitrag dezentraler Energiespeicher“, [http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/BEE\\_HM\\_FENES\\_Kurzstudie\\_Der\\_positiv\\_Beitrug\\_von\\_Batteriespeichern\\_2015.pdf](http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/BEE_HM_FENES_Kurzstudie_Der_positiv_Beitrug_von_Batteriespeichern_2015.pdf)

Büro für Energiewirtschaft und technische Planung GmbH (BET) (2013). „Möglichkeiten zum Ausgleich fluktuierender Einspeisungen aus Erneuerbaren Energien“, [http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Plattform/BEE-Plattform-Systemtransformation\\_Ausgleichsmoeglichkeiten.pdf](http://www.bee-ev.de/fileadmin/Publikationen/Studien/Plattform/BEE-Plattform-Systemtransformation_Ausgleichsmoeglichkeiten.pdf)

Butscher, R., Hess, W. (2016). „Die Welt der Energie wird deutlich bunter“, bild der wissenschaft Themenheft „Die Challenge“ (2016), S.50

Deutsche Energie-Agentur (dena) (2012) „Integration der erneuerbaren Energien in den deutsch-europäischen Strommarkt“, Endbericht 2012, [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Presse/Meldungen/2012/Endbericht\\_Integration\\_EE.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Presse/Meldungen/2012/Endbericht_Integration_EE.pdf)

Deutsche Energieagentur (dena) (2014). „Die Bedeutung von Stromspeichern im Energiesystem“, [http://www.dena.de/fileadmin/user\\_upload/Presse/Meldungen/2014/14-10-07\\_dena\\_Beitrug\\_SpeicherDebatte.pdf](http://www.dena.de/fileadmin/user_upload/Presse/Meldungen/2014/14-10-07_dena_Beitrug_SpeicherDebatte.pdf)

Deutsche Energieagentur (dena) (2016). „dena unterstützt Forderungen der Energieverbände zu Energiespeichern“ <http://www.dena.de/aktuelles/alle-meldungen/dena-unterstuetzt-forderungen-der-energieverbaende-zu-energiespeichern.html>

Deutsches Institut für Normung (DIN e.V.) (2016) „Deutsche Normungsroadmap Energiespeicher“, Version 1, <http://www.din.de/blob/117984/2d5a13f0649b2e807f5dba34f6ea1bd7/normungsroadmap-energiespeicher-data.pdf>

Droste-Franke, B. (2015). „Energiespeicher und alternative Energieausgleichsoptionen aus diversen systemischen Perspektiven“, Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis 24. Jg., Heft 3 Dezember 2015, S. 40

Forschungsinitiative der Bundesregierung „Energiespeicher“ (2013). [http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelsicht/95/Weltweit\\_erste\\_industrielle\\_Power\\_to\\_Gas\\_Anlage/](http://forschung-energiespeicher.info/projektschau/gesamtliste/projekt-einzelsicht/95/Weltweit_erste_industrielle_Power_to_Gas_Anlage/)

Frick, F. (2016). „Viel Wind um Windgas“, bild der wissenschaft (2016). Themenheft „Die Challenge“, (2016), S. 56

Frick, F. (2016). „Boom für Batterieparks“, bild der wissenschaft Themenheft „Die Challenge“ (2016), S. 31

iw-Dienst (2013). „Wohin mit der erneuerbaren Energie?“, Nr. 24, 13.Juni 2013, S. 6

Öko - Institut e.V. (2015). Projekt „Zukünftige innovative Energiespeicher: Recycling- und Umweltanforderungen und Strategien zur Vermeidung von Versorgungsrisiken für deren Fertigung“, <http://www.oeko.de/forschung-beratung/projekte/pr-details/ableitung-von-recycling-und-umweltanforderungen-und-strategie-zur-vermeidung-von-versorgungsrisiken/>

Öko - Institut e.V. (2016). „Dezentral und zentral gesteuertes Energiemanagement auf Verteilnetzebene zur Systemintegration erneuerbarer Energien“, <http://www.oeko.de/oekodoc/2514/2016-044-de.pdf>

Sachverständigenrat für Umweltfragen (SRU) (2013). Sondergutachten „Den Strommarkt der Zukunft gestalten“, (2013)

Schill, W.-P. DIW (2014). „Entwicklung der Residuallast und hypothetischer Speicherbedarf für Überschüsse“ [https://www.diw.de/documents/vortragsdokumente/220/diw\\_01.c.493075.de/v\\_2014\\_schill\\_ueberschuesse\\_stores7.pdf](https://www.diw.de/documents/vortragsdokumente/220/diw_01.c.493075.de/v_2014_schill_ueberschuesse_stores7.pdf)

Sterner, M., Stadler, I. (2014). „Energiespeicher“, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2014

Technology Review (2013). Special „Energie“, (2013)

Weil, M. (2015). „Energiespeicher für Energiewende und Elektromobilität“, Technikfolgenabschätzung Theorie und Praxis 24. Jg., Heft 3 Dezember 2015

Wiemker, H. (2016). „Hitze für später“, bild der wissenschaft Themenheft „Die Challenge“, (2016)

Wietschel, M. et. al., (2015). „Energietechnologien der Zukunft“, Springer Fachmedien, Wiesbaden 2015

Zahoransky, R. (Hrsg.) (2010). „Energietechnik“ Vieweg und Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2010



## 5. Anhang

### 5.1. Tabelle 1

**Tab. 2.1** Beispiele verschiedene Energiespeichertechnologien und Kombinationen aus Speichereinheiten

Speicher-klasse	Speichertechnologie	Einspeichern	Speichern	Ausspeichern	Funktion aus Sicht des Stromsektors	Funktion aus Sicht des Wärme-sektors	Funktion aus Sicht des Ver-kehrs-sektors
<i>Sektoral, Sektorenintegriert</i>							
elektrisch	Kondensatoren	direkt	Elektrisches Feld	direkt	Stromspeicher, Kurzzeit	-	Rekuperation, Kurzzeitstromspeicher
	Spulen	direkt	Magnetfeld	direkt	Stromspeicher, Kurzzeit	-	-
elektroche-misch	Alle Batterien außer Redox Flow	integr. el. - chem. Wandlung	Elektrode und Aktivmasse	integr. el. - chem. Wandlung	Stromspeicher, Kurz- und Langzeit	-	-
	Redox-Flow-Batterie	Pumpe, Zelle	Tank, chem. Verbindungen	Pumpe, Zelle	Stromspeicher, Kurz- und Langzeit	-	-
chemisch	Kraftstoffspeicher	Pumpe, Photo-synthese	Tank, Kraftstoff, Kaverne	Pumpe, Bren-ner, Motor	-	Brennstoffspei-cher	Kraftstoffspeicher
mechanisch	Pumpspeicher	Pumpe, Motor	Oberbecken, Wasser	Turbine, Generator	Stromspeicher, Kurz- und Langzeit	-	-
	Druckluftspeicher	Kompressor, Motor	Kaverne, Rohr, Warmespeicher	Turbine, Generator	Stromspeicher, Kurzzeit	-	-
	Lageenergiespei-cher	Pumpe, Motor	Bewegung von Granit, Gestein	Turbine, Generator	Stromspeicher, Kurz- und Langzeit	-	-
	Schwungmassen-speicher	Motor	Rotationsenergie	Generator	Stromspeicher, Kurzzeit	-	-
	Federenergiespei-cher	mech. Arbeit	Lageenergie	mech. Arbeit	Stromspeicher, Kurzzeit	-	Notbremse bei Energieausfall im Fahrzeug

**Tab. 2.1** Fortsetzung

Speicher-klasse	Speichertechnologie	Einspeichern	Speichern	Ausspeichern	Funktion aus Sicht des Stromsektors	Funktion aus Sicht des Wärme-sektors	Funktion aus Sicht des Ver-kehrs-sektors
thermisch	Warmwasserspei-cher	Wärmetauscher	Tank, Wasser	Wärmetau-scher	-	Wärmespeicher	-
	Latentwärmespei-cher	Wärmetauscher	Phasenwechsel-Materialien (PCM)	Wärmetau-scher	-	Wärmespeicher	-
	Thermochemische Speicher	Chem. Energie-wandlung	Zeolithe, Tanks	Chem. Ener-giewandlung	-	Wärmespeicher	-
<i>Sektorenübergreifend, Intersektoral</i>							
elektroche-misch	Batterien Elektro-mobilität	Leistungselektronik, integr. el. - chem.	Elektrode	Elektromobil, Hybrid	Lastmanagement	-	Energielieferant
chemisch	Power-to-Gas Strom	Elektrolyse, Met-hanisierung	Gasnetz, Gas-speicher	GuD, Gas-turbine	Stromspeicher, Langzeit	-	-
	Power-to-Gas Wärme	Elektrolyse, Met-hanisierung	Gasnetz, Gas-speicher	Gastherme	Lastmanagement	Wärmelieferant	-
	Power-to-Gas Mobilität	Elektrolyse, Met-hanisierung	Gasnetz, Gas-speicher	Gasauto, KFZ	Lastmanagement	-	Kraftstofflieferant
	Kohlenwasser-stoffe	Photosynthese	Biomasse, fossile Energie, Gas-speicher	Verbren-nungstechnik	Stromspeicher	Wärmelieferant	Kraftstofflieferant
thermisch	Power-to-Heat	Heizstab, Wärme-pumpe	Tank, Wasser, Wärmenetz	Wärmetau-scher	Lastmanagement	Wärmelieferant	-
	Sorptionwärme-speicher	Heizstab, Wärme-pumpe	Zeolithe, etc., Tank	Wärmetau-scher	Lastmanagement	Wärmelieferant	-
mechanisch	Zugantrieb	Motor	Schwungmasse (kin. Energie)		Lastmanagement	-	Antrieb
	Bremsenergie-rück-gewinnung		Schwungmasse (kin. Energie)	Generator	Lastmanagement	-	Bremse



5.2. Tabelle 2

**Tab. 12.1** Überblick über Mittelwerte der wichtigsten technischen und ökonomischen Parameter verschiedener Speichertechnologien. (Quellen: [1-52])

Technologie (heute)	Technik						Kosten		
	Energiedichte		Wirkungsgrad (%)	Selbstentladung	Lebensdauer		CAPEX		OPEX fix
	Gravimetrisch	Volumetrisch			Zyklisch	Kalenda- risch	€/kWh	€/kW	
	Wh/kg	kWh/m <sup>3</sup>	%	%/Tag	Zyklen	a			
<b>Elektrische Energiespeicher</b>									
Kondensatoren (DSK)	0,1-10	10	90-95	0,004-0,013	1 Mio.	10	5150-12000	125-300	k.A.
Spulen (SMES)	1	10	92	10-12	>1 Mio.	30	13570-75670	300-915	k.A.
<b>Elektrochemische Energiespeicher</b>									
<i>Niedertemperatur-Batterien</i>									
Blei-Säure-Batterien	25-40	25-65	74-89	0,17	203-1315	10	90-355	200-490	0,16-0,76
Nickel-Batterien	55-75	60-105	71	k.A.	350-2000	k.A.	385-1100	385-1100	k.A.
Lithium-Batterien	110-190	190-375	90-97	0,008-0,041	400-1900	15	170-600	170-600	0,13-0,76
<i>Hochtemperatur-Batterien</i>									
Natrium-Batterien	100-165	155-255	72-81	k.A.	2500-8250	17	265-645	285-1075	0,07-0,76
<i>Batterien mit externem Speicher</i>									
Redox-Flow Batterien	15-50	20-60	71-83	0	5755-8593	15	250-865	710-1790	k.A.

**Tab. 12.1** Fortsetzung

Technologie (heute)	Technik						Kosten		
	Energiedichte		Wirkungsgrad (%)	Selbstentladung	Lebensdauer		CAPEX		OPEX fix
	Gravimetrisch	Volumetrisch			Zyklisch	Kalenda- risch	€/kWh	€/kW	
	Wh/kg	kWh/m <sup>3</sup>	%	%/Tag	Zyklen	a			
<b>Chemische Energiespeicher</b>									
<i>Konventionelle chemische Speicher</i>									
Flüssiggas/Autogas/LPG	12870	6770	-	k.A.	-	-	k.A.	-	-
Heizöl/Rohöl-speicher	11830	10315	99,9	k.A.	-	k.A.	k.A.	-	-
<i>Biokraftstoffe</i>									
Bioethanol	7410	5850	-	k.A.	-	-	k.A.	-	-
Biodiesel	10305	8985	-	k.A.	-	-	k.A.	-	0,0002
<i>Power-to-Gas - Speichertechnik</i>									
Kavernenspeicher (Methan)	14300	1100	99	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Kavernenspeicher (Wasserstoff)	34000	350	95	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
Porenspeicher (Methan)	13450	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.	k.A.
<i>Ladetechnik</i>									
Alkalische Elektrolyse			61-79	k.A.	-	25-30	-	935-1500	k.A.
Membran-Elektrolyse (PEM)			67-82	k.A.	-	10-20	-	2000-6000	k.A.
Dampfelektrolyse			94	k.A.	-	2	-	2000	k.A.
Methanisierung thermochemisch (katalytisch)			80	k.A.	-	k.A.	-	800-1000	k.A.

Tab. 12.1 Fortsetzung

Technologie (heute)	Technik						Kosten		
	Energiedichte		Wirkungsgrad (%)	Selbstentladung	Lebensdauer		CAPEX		OPEX fix
	Gravimetrisch	Volumetrisch			Zyklisch	Kalenda- risch			
	Wh/kg	kWh/m <sup>3</sup>	%	%/Tag	Zyklen	a	€/kWh	€/kW	€/kWh
Methanisierung bio- logisch			80	k.A.	-	k.A.	-	650	0,04
<i>Entladetechnik</i>									
Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in BHKW			85		-	30	-	350- 1000	k.A.
Brennstoffzellen			43-53		-	k.A.	-	2305	47
Gasturbinenkraftwerk			35-38	k.A.	-	25	-	400	k.A.
Gas- und Dampf (GuD)			35-65		-	30	-	750	0,205
<i>Power-to-Gas – Gesamtprozess</i>									
Power-to-Wasserstoff (Kompr. 200 bar, Speiche- rung)			54-72	k.A.	-	-	-	k.A.	k.A.
Power-to-Methan (SNG, Kompr. 200 bar, Speiche- rung)			49-64						
Power-to-Wasserstoff (Kompr. 80 bar, Transport)			57-73						
Power-to-Methan (SNG, Kompr. 80 bar, Transport)			50-64						
Power-to-Wasserstoff (atmosphärisch)			64-77						

Tab. 12.1 Fortsetzung

Technologie (heute)	Technik						Kosten		
	Energiedichte		Wirkungsgrad (%)	Selbstentladung	Lebensdauer		CAPEX		OPEX fix
	Gravimetrisch	Volumetrisch			Zyklisch	Kalenda- risch			
	Wh/kg	kWh/m <sup>3</sup>	%	%/Tag	Zyklen	a	€/kWh	€/kW	€/kWh
Power-to-Methan (atmo- sphärisch)			51-65						
Power-to-Wasserstoff-to- Power (el. Gen. Bei $\eta = 0,6$ u. Kompr. 80 bar)			34-44						
Power-to-Methan-to- Power (el. Gen. Bei $\eta = 0,6$ u. Kompr. 80 bar)			30-38						
Power-to-Wasserstoff-to- KWK (40 % Power, 45 % Heat, Kompr. 80 bar)			48-62						
Power-to-Methan-to- KWK (40 % Power, 45 % Heat, Kompr. 80 bar)			43-54						
Power-to-Methan mit Dampfelektrolyse			75						
Power-to-Liquid mit Dampfelektrolyse			65						
<i>Mechanische Energiespeicher</i>									
Pumpspeicherwerke	0,3-1,4	0,35-1,1	70-82	0-0,5	12800- 33000	40-100	40-180	550- 2040	0,08
Druckluftspeicher (CAES)									
diabat		2-7	40-55	0-10	8620- 17100	40	40-80	340- 1145	0,01-0,26





5.3. Tabelle 3

**Tab. 12.3** Stärken und Schwächen verschiedener Speichertechnologien angelehnt an [17] mit eigenen Ergänzungen und aufbauend auf Tab. 12.1 und den Technologiekapiteln in Teil III

Technologie	Stärken und Möglichkeiten	Schwächen und Hindernisse
<b>Elektrische Energiespeicher</b>		
Kondensatoren (DSK)	Sehr hoher Wirkungsgrad	Geringe Energiedichte
	Hohe Leistungsfähigkeit	Hohe Kosten pro installierter Energie
	Lange Zyklenlebensdauer	Hochleistungsanwendungen können von »Leistungsbatterien« übernommen werden
	Einsatz für Anwendungen mit höchsten Anforderungen an Reaktionszeiten (z. B. Spannungsqualität)	
Spulen (SMES)	Hohe Leistungsfähigkeit	Enorm hoher Kühlaufwand
	Hohe Zyklenlebensdauer	Teure Rohstoffe für Supraleiter
	Neue supraleitende Materialien	Hoher Aufwand (Messelektronik, Kühlung)
	Anwendung für dezentrale Kurzschlussstrombereitstellung	Sicherheitsanforderungen (niedrige Temperaturen, starke magnetische Felder)
		Unzureichend erprobt
		Mit die höchsten spezifischen Investitionskosten
<b>Elektrochemische Energiespeicher</b>		
<i>Niedertemperatur-Batterien</i>		
Blei-Saure-Batterien	Am meisten etablierte Batterietechnologie	Lade- und Entladefähigkeit nicht symmetrisch
	Kostengünstigstes Batteriesystem mit kurzen Amortisationszeiten	Schädliche Tiefentladungen
	Akzeptable Energie- und Leistungsdichte für stationäre Anwendungen	Lange Standzeiten mit tiefen Ladezuständen
	Hohe Sicherheit im Vergleich zu Lithium- oder Natrium-Batterien	Gutes Temperaturmanagement erforderlich
	Kein komplexes Zellmanagement erforderlich	Batterieraumlüftung erforderlich
	Weltweit lange Erfahrungen vorhanden	Begrenzte Zyklenlebensdauer
	Seit 150 Jahren im Einsatz	Konkurrenz durch Kostensenkung bei Lithium-Batterien
	Durch vollautomatisierte Massenproduktion Kostensenkung möglich	Begrenzte Bleilagerstätten
	Unabhängig von Standortbedingungen	
	Viele Hersteller weltweit	
Nickel-Batterien	Gunstigster Speicher für Inselnetze	
	Sehr hohe zyklische und kalendarische Lebensdauer (geringes Dentrigenwachstum)	Hohe Kosten für Nickel

**Tab. 12.3** Fortsetzung

Technologie	Stärken und Möglichkeiten	Schwächen und Hindernisse
	Hohe Energiedichte	Konkurrenz durch Kostensenkung bei Lithium-Batterien
	Einsatz im Hochleistungsbereich	
	Anwendung im Consumer-Bereich und bei Hybridfahrzeugen	
	Einsatz bei tiefen Temperaturen und extremen Umgebungsbedingungen möglich	
	Tolerant gegenüber Tiefentladung und unterschiedlichen Ladezuständen	
Lithium-Batterien	Höchste Energiedichte	Keine inhärente Sicherheit (thermisches Durchgehen)
	Höchste Wirkungsgrade	Aufwendiges Batterie-managementsystem für Sicherheit und lange Lebensdauern erforderlich
	Hohe Leistungsfähigkeit	Einzelzellüberwachung
	Große Stückzahlen führen zu Kostensenkung	Herstellung (Packaging) und Kühlung aufwendig
	Keine speziellen Anforderungen an Standorte	Schnellladefähigkeit
	Anwendung im stationären und mobilen Bereich (Batterieparcs und Elektromobilität)	Lebensdauer begrenzt bei Ladezuständen außerhalb 30–70 %
	Großter Hoffnungsträger unter den Batterien in punkto Kostensenkung und Anwendungen	Hohe Kosten
	Entwicklung neuer Aktivmaterialien	Soziale Akzeptanzprobleme aufgrund Lithiumabbau
	Begrenzte Lithiumvorkommen	
<i>Hochtemperatur-Batterien</i>		
Natrium-Batterien	Hohe Energiedichte	Hoher Aufwand für Heizung und Kühlung
	Hohe Zyklen-, lange kalendarische Lebensdauer	Thermische Verluste
	Viele bestehende stationäre Anlagen	Hohe Selbstentladung bei längeren Stillstandszeiten
	Viele auslaufende Patente, neue Hersteller	Gefahrenpotenzial aufgrund hoher Betriebstemperatur
	Keine lokalen Voraussetzungen	Nur wenige Hersteller
	Günstige Rohstoffe (Natrium und Schwefel)	Konkurrenz zu Blei-Säure- und Li-Ion-Batterien
	Wenig Einschränkung in Verfügbarkeit der Rohstoffe	Sicherheitsprobleme (Brand)



Tab. 12.3 Fortsetzung		
Technologie	Stärken und Möglichkeiten	Schwächen und Hindernisse
		Isolation von Natrium gegenüber Umwelteinflüssen (vor allem Wasser)
<i>Batterien mit externem Speicher</i>		
Redox-Flow-Batterien	Energie und Leistung unabhängig skalierbar	Geringe Energiedichte
	Räumliche Trennung von Speicherbehälter und Reaktionszelle	Säurehaltige Flüssigkeiten verursachen Leckagen
	Hohe Zyklenlebensdauer	Teure Speichermedien
	Einsatz unterschiedlicher Redoxpaare möglich	Wartungsaufwand für Pumpen
	Ständig neue Materialkombinationen – kein Ressourcenengpass	Stromverbrauch der Pumpen
	Durch Materialverbesserungen Wirkungsgrade von bis zu 90 % und Kostenreduktionen möglich	Rechtliche Probleme bei Genehmigung durch große Säuremengen
	Standorte unbeschränkt	
	Viele auslaufende Patente, steigender Wettbewerbsdruck	
<b>Chemische Energiespeicher</b>		
<i>Konventionelle chemische Speicher</i>		
Flüssiggas/Autogas/LPG	Technisch ausgereift	Fossiler Energieträger mit allen Folgen (Klimawandel, Umwelterstörung, Importabhängigkeit, Ressourcenknappheit etc.)
Erdöl	Hohe Energiedichte	
	Verfügbare Infrastruktur	
	Verfügbare Anwendungstechnologie	
<i>Biokraftstoffe</i>		
Bioethanol	Ausgereifte Technik	Hoher Flächenbedarf für die Produktion
Biodiesel	Verfügbare Infrastruktur	Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion
	Hohe Energiedichte	Eingeschränktes nachhaltiges Potenzial
	Verfügbare und bezahlbare Fahrzeugtechnik	
<i>Power-to-Gas</i>		
Wasserstoffspeicherung	Neben Methan einzige Option zur Langzeitspeicherung	Hohe Kosten
	Geringer Flächenverbrauch	Geringer Wirkungsgrad
	Sehr große Energiemengen speicherbar	Um ein Drittel geringere Speicherdichte als Methan

**Tab. 12.3** Fortsetzung

Technologie	Stärken und Möglichkeiten	Schwächen und Hindernisse
	Hohe Energiedichte	Keine Wasserstoffturbinen verfügbar
	Wasser unbegrenzt verfügbar	Wettbewerb mit anderen Langzeitspeichern (z. B. Wasserkraft Skandinavien) und Flexibilitätsoptionen
	Alternative zu Biogas (Landnutzung und Monokulturen)	Konkurrenz in Nutzung geeigneter Kavernen zu Druckluft-, Erdöl-, Erdgas- oder CO <sub>2</sub> -Lagerung
	Wasserstoff in allen Energiesektoren nutzbar	Direkte Einspeisung von Wasserstoff ins Erdgasnetz meist auf 2% begrenzt
		Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur (Transport, Verteilung, Anwendung) notwendig und Kostentreiber
Methanspeicherung	Neben Wasserstoff einzige Option zur Langzeitspeicherung	CO <sub>2</sub> -Quelle notwendig oder Extraktion aus der Luft
	Geringer Flächenverbrauch	Hohe Kosten bzw. zusätzliche Kosten für Methanisierung und CO <sub>2</sub> -Bereitstellung
	Sehr große Energiemengen speicherbar	Geringer Wirkungsgrad
	Sehr hohe Energiedichte	Wettbewerb mit anderen Langzeitspeichern (z. B. Wasserkraft Skandinavien) und Flexibilitätsoptionen
	Geringere energiebezogene Kosten verglichen mit Wasserstoffspeicherung, da höhere Energiedichte	Reifegrad der Technologie der CO <sub>2</sub> -Methanisierung noch gering
	Energiespeicherung und -transport für Gasinfrastruktur möglich	
	Sehr hohe Speicherkapazitäten vorhanden	
	Alternative zu Biogas (Landnutzung und Monokulturen)	
	Wasser unbegrenzt verfügbar	
	Flexible Verwendung in allen Energiesektoren mit vorhandenen bezahlbaren Endanwendungen	
<b>Mechanische Energiespeicher</b>		
Pumpspeicher (PSW)	Ausgereifte, etablierte Technik	Sehr geringe Energiedichte
	Sehr lange Lebensdauer	Geografische Beschränkungen
	Geringe Selbstentladung	Hohe Investitionskosten
	Guter Wirkungsgrad	Langer Investitionsrückfluss
	Großes Potenzial in Norwegen und Schweden	Nur große Anlagen wirtschaftlich
	Günstige Speicherkosten	Lange Genehmigungsverfahren



Tab. 12.3 Fortsetzung		
Technologie	Stärken und Möglichkeiten	Schwächen und Hindernisse
	Einsatz teilweise auch als Langzeitspeicher möglich	Hohe Umweltstandards
		Zunehmender Wettbewerb mit anderen Speichern (vor allem Batterieparcs)
		Akzeptanz in Bevölkerung nicht immer gegeben
Druckluftspeicher (CAES)	Relativ geringe Kosten für den Speicher (Kaverne)	Geografische Beschränkungen
	Kleine Standfläche an der Erdoberfläche	Geologische Voraussetzungen (Dichtheit etc.)
	Lange Lebensdauer des Speichers (Kaverne) und der Kompressoren und Turbinen	Hohe Investitionskosten
	Geringe Selbstentladung	Geringer Wirkungsgrad
	Gute Korrelation zwischen Starkwindgebieten und Kavernenstandorten	Nur zwei alte Pilotanlagen in Betrieb, noch keine adiabaten Kraftwerke verfügbar
	Neue, dezentrale Konzepte (z. B. isotherm oder mit Hydraulik) vielversprechend	Langer Investitionsrückfluss
		Konkurrenz in Nutzung geeigneter Kavernen zu Wasserstoff-, Erdöl-, Erdgas- oder CO <sub>2</sub> -Lagerung
		Zunehmender Wettbewerb mit anderen Speichern (vor allem Batterieparcs)
Schwungmassenspeicher	Hohe Wirkungsgrade	Vakuumkammer erforderlich
	Hohe Energiedichte	Sicherheitsrisiken (rotierende Massen)
	Schnellladefähig	Kühlsystem für supraleitende Magnetlager
	Geringe Wartungsanforderungen	Hohe Selbstentladung
	Lange Lebensdauer	Konkurrierende Technologien
	Chance USV, Kurzschlussleistung und Mobilität	
<b>Thermische Energiespeicher</b>		
Sensible Wärmespeicher (Pufferspeicher, Fernwärmespeicher)	Kostengünstigster Speicher	Mittlere Wirkungsgrade
	Etablierte, bewährte, einfache Technik	Hohe Selbstentladung im Stand-by
	Viele Anlagen in Betrieb	
	Vielfach mit Solarenergie umgesetzt	
	Für Geothermie, Wärmepumpen und Flexibilisierung der KWK notwendig	



**Tab. 12.3 Fortsetzung**

Technologie	Stärken und Möglichkeiten	Schwächen und Hindernisse
	Chance Fernwärme, Wärmenetze, Langzeitspeicherung	
Latentwärmespeicher (PCM)	Hohe Wirkungsgrade	Noch nicht etabliert
	Geringe Investitionskosten	Mittlere Energiedichte
	Hohe Energiedichte	
	Chance Klimatisierung und Spezialanwendungen	
	Großes F&E-Potenzial	
Thermochemische Speicher	Sehr hohe Wirkungsgrade	Noch nicht etabliert
	Geringe Investitionskosten	
	Chance Spezialanwendungen, verlustfreier Wärmetransport und Langzeitspeicherung	
	Großes F&E-Potenzial	

ENDE DER BEARBEITUNG