

# 1

## Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung

Mit elektrischer Ladung verknüpfte Kenntnisse werden als so alt wie die Menschheitsgeschichte angenommen. Thales von Milet beschrieb um 600 v. Chr. Phänomene, die er beim Reiben von Bernstein beobachtete, als elektrostatische Ladung. Die Erzeugung von Ladungen, genauer die Ladungstrennung, und Phänomene, die mit gleichartigen oder entgegengesetzten Ladungen verbunden sind, waren für Jahrhunderte Gegenstand der Neugierde und wissenschaftlicher Untersuchungen. Diese Studien waren allerdings durch ein inhärentes Problem begrenzt: die Speicherung der Elektrizität, genauer der elektrischen Ladung. Ein kondensatorartiges Gebilde wie die Leyden'sche Flasche (1745) hatte nur eine sehr begrenzte Kapazität, ähnliche Anordnungen halfen kaum weiter. Erst kürzlich (tatsächlich beginnend mit einem Patent aus dem Jahr 1957) wurde das Konzept des Kondensators zu neuen Speichern entwickelt: dem Superkondensator und dem Ultrakondensator (s. Kap. 11).

1800 beobachtete Alessandro Volta, daß Zink- und Silberplatten mit einer salzwassergetränkten Pappe dazwischen eine elektrische Spannung zeigten. Dies wurde zur ersten Quelle eines ständigen Nachschubs an Elektrizität; das System wird immer noch als Volta-Zelle bezeichnet. Aufeinanderstapeln vieler solcher Zellen wie in einem Sandwich resultierte in einer vielfach größeren elektrischen Spannung dank der erzielten Serienschaltung – der Volta-Säule. Für einige Zeit war dieses Gebilde zusammen mit dem Daniell-Element (1836) die einzige Quelle von Elektrizität, die ständigen Stromfluß im Vergleich zu den kurzen Entladestromstößen eines Kondensators bereitstellte und die bis in die 1850er Jahre in der Telegraphie eingesetzt wurde. Der französische Physiker Gaston Planté konstruierte 1859 den ersten Blei-Säure-Akkumulator. Waldemar Jungner (1899) erfand den Nickel-Cadmium-Akkumulator, der bis zur kommerziellen Nutzung durch die Erfindung der porösen Elektroden durch Schlecht und Ackermann in 1932 weiterentwickelt wurde. Durch von Neumann in 1947 entwickelte Veränderungen in Zell- und Elektrodenaufbau waren komplett verschlossene Zellen möglich, die in zahllosen Anwendungen bis vor kurzem – als die Toxizität des Cadmiums in den Vordergrund trat und Ersatz für diese Elektrode gefunden war – weit verbreitet waren. Dieser Ersatz geht auf die Beobachtung des großen Wasserstoffspeichervermögens von intermetallischen Verbindungen wie  $\text{SmCo}_5$  und  $\text{LaNi}_5$  zurück, die als nichttoxischer Ersatz für die Cadmiumelektrode den Übergang zum NiMH-Akkumulator in vielen Anwendungen anstelle der bislang eingesetzten NiCd-Akkumulatoren ermöglichte. Schließ-

## 2 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung

lich wurden 1991 Lithium-Ionen-Batterien nach anfänglichem Versagen von Lithiumsekundärbatterien mit metallischen Lithiumelektroden erfolgreich kommerzialisiert.

Die Entwicklung des dynamoelektrischen Prinzips und die Erfindung des ersten elektrischen Generators durch Werner (von) Siemens (1866) ermöglichten Ingenieuren in den 1850er Jahren die Lösung von mit elektrisch angetriebenen Fahrzeugen und ganz allgemein der Anwendung elektrischer Energie verbundenen Herausforderungen. Nun konnte elektrische Energie durch Umwandlung mechanischer Energie aus einer Vielzahl von Quellen durch Verknüpfung der Quellen in geeigneter Weise mit einem Generator gewonnen werden. Auch wenn am Anfang noch nicht klar erkennbar erlangte Wechselstrom (AC) wirtschaftliche Bedeutung und wurde dem Gleichstrom (DC) vorgezogen. Nachdem Leistung und Energie aus Batterien stets durch Zahl und Größe begrenzt waren, konnte nun die große Nachfrage für zahlreiche Anwendungen durch Bereitstellung von Wechselspannung befriedigt werden. Batterien gerieten aus dem Fokus des Interesses – allerdings nur für kurze Zeit. Die frühe Entwicklung mobiler Produkte wie von Automobilen oder elektrischen Fahrrädern löste Bedarf für mobile Quellen elektrischer Energie aus. Nur Batterien konnten diesen Bedarf halbwegs befriedigen. Die ersten mit Elektromotoren angetriebenen Fahrzeuge genossen weiten kommerziellen Erfolg, während mit Dampfmaschinen versehene Fahrzeuge wie 1769 in Paris Einzelfälle blieben. Das erste elektrisch angetriebene Fahrzeug, später als Kutsche bezeichnet, wurde vom schottischen Erfinder Robert Anderson zwischen 1832 und 1839 gebaut. Wenig mehr als Berichte von ersten Experimenten in 1837 ist bekannt; und da wiederaufladbare Batterien noch nicht erfunden waren, geriet die Kreation in Vergessenheit. Professor Stratingh und sein Assistent Christopher Becker (Groningen, Holland) und der Schmied Thomas Davenport (Brandon, Vermont) bauten kleine elektrische Fahrzeuge in 1835. Mit den langsam verbesserten (aber noch immer nicht wiederaufladbaren) Batterien bauten Davenport und Robert Davidson um 1842 etwas praktischere und erfolgreiche elektrische Vehikel. Ein von Gustave Trouvé gebautes elektrisch angetriebenes Dreirad erlebte 1881 in Paris seine Premiere mit einer berichteten Geschwindigkeit von  $12 \text{ km h}^{-1}$ . Serienfertigung elektrischer Fahrzeuge begann 1890; William Morrison produzierte Fahrzeuge mit einem ca. 2,5 PS leistenden Elektromotor. Ein 1899 von Camille Jenatton passendes Fahrzeug *La Jamais Contente* (Die nie Zufriedene) genannte Fahrzeug passierte die  $100 \text{ km h}^{-1}$ -Marke mit einer Maximalgeschwindigkeit von  $105,8 \text{ km h}^{-1}$ ; die Deutsche Reichspost betrieb die ersten elektrischen Fahrzeuge. Bei einer Ausstellung in Berlin wurde 1899 ein als *Electra* bezeichnetes Vehikel (Abb. 1.1) mit einer Zink/PbO<sub>2</sub>-Batterie vorgestellt.

Um 1903 stellten in großen Städten wie Paris, London und New York elektrisch angetriebene Fahrzeuge ein Drittel aller Fahrzeuge, ein weiteres Drittel war dampfgetrieben, und weniger als ein Drittel hatte einen Verbrennungsmotor. F. Porsche, später berühmt für seine Sportwagen und andere Entwicklungen, montierte für den Produzenten L. Lohner zwei Elektromotoren mit jeweils 2,5 PS an eine Kutsche – dieser Lohner-Porsche wird mitunter als das erste Elektroauto bezeichnet. Zum Auf-



**Abb. 1.1** Batteriebetriebenes Fahrzeug *Electra* (Krüger, Berlin, 1899).

laden der Batterie baute Porsche einen kleinen Verbrennungsmotor ein.<sup>1)</sup> 1919 begann R. Slaby mit der Produktion elektrisch angetriebener Fahrzeuge in Sachsen; später wurde dieses Unternehmen von J.S. Rasmussen, dem Namensgeber von Audi, gekauft. Der ausbleibende Erfolg führte zum Ende der Produktion in 1927. Das in Abb. 1.2 gezeigte Fahrzeug wog nur 180 kg, die 12 V-Batterie erlaubte eine Leistung von 2 PS an der Antriebswelle, die eine Spitzengeschwindigkeit von  $24 \text{ km h}^{-1}$  ermöglichte.

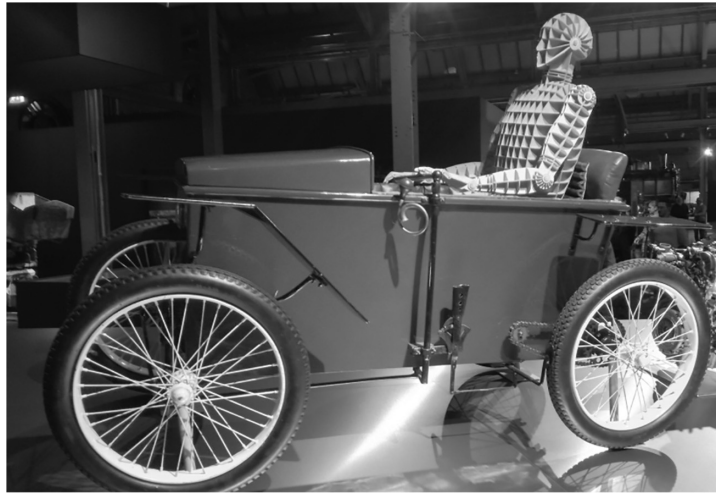
1938 wurden mehr als 2600 elektrische Fahrzeuge von der Deutschen Post betrieben, manche waren mehr als 40 Jahre in Betrieb. Etwas im Schatten der Entwicklung von Autos stehend wurden batterieelektrisch angetriebene Hauptbahnfahrzeuge eingesetzt, z. B. in Deutschland 1894.

Die Erfindungen von Otto und Diesel lösten neue Entwicklungen aus (und die Deutsche Post legte ihren letzten elektrisch angetriebenen Transporter 1973 still). Die schnelle Entwicklung von Verbrennungsmotoren, die nicht automatisch leistungsstärker als Elektromotoren waren (es war zunächst genau umgekehrt), aber keine voluminösen und schweren Batterien mit ätzender Flüssigkeit benötigten, die zudem zum Platzen und Auslaufen neigten, überholte den Elektroantrieb schnell.

Für kurze Zeit schien alles wohlgeordnet: Dampfmaschinen waren für schwere Fahrzeuge wie Lokomotiven geeignet, elektrisch angetriebene Fahrzeuge waren

<sup>1)</sup> In diesem Buch sind damit vor allem Verbrennungsmotoren gemeint, die nach den Ideen von Nikolaus Otto und Rudolf Diesel funktionieren. Gasturbinen gehören auch dazu, sie werden aber nur selten in mobilen Anwendungen eingesetzt.

4 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung



**Abb. 1.2** Batteriebetriebenes Fahrzeug von R. Slaby um 1919 produziert.

prädestiniert für den urbanen Verkehr, und Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor waren wegen ihrer Reichweite vor allem für die ländliche Umgebung geeignet. Weitere Entwicklungen vor allem in der Elektrotechnik änderten all dies. Die Produktion von Magnetzündern (Bosch, 1902) und zuverlässigen elektrischen Anlassern (Kettering, 1911) wie auch die gute Verfügbarkeit von billigem Benzin lösten einen langen Abstieg der Elektrofahrzeuge aus, der in einigen Anwendungsnischen und dem Vergessenwerden endete.

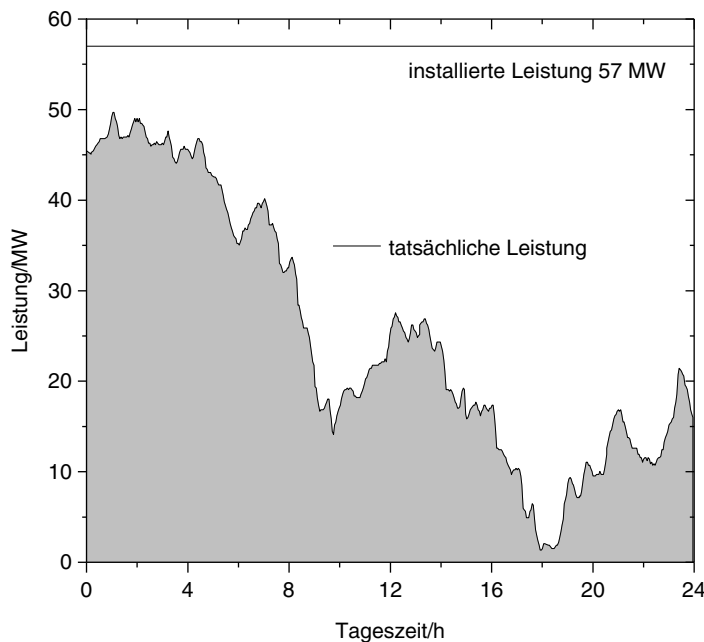
Anderswo sicherte die Entwicklung landes- oder sogar kontinentweiter elektrischer Verbundnetze eine zuverlässige Stromversorgung selbst in den abgelegenen Dörfern – fast. Wie in Kap. 2 dargestellt wurden Speicher für elektrische Energie schon immer in abgelegenen Orten genutzt. Da elektrische Energie wirtschaftlich nur durch Wandlung in z. B. chemische Energie (und zurück) gespeichert werden kann, waren Systeme zur Energiewandlung stets mit der Speicherung eng verknüpft.

Dieses Szenario ändert sich aktuell wieder, an manchen Stellen langsam, aber in dramatischen Schritten. Einige Faktoren können leicht identifiziert werden:

- Einige Energiewandlungsprozesse beruhen auf der Nutzung fossiler Energieträger, deren Vorräte begrenzt sind oder deren Ende bereits absehbar ist (peak oil).
- Der exzessive Gebrauch fossiler Energieträger verursacht eine substantielle Erzeugung von Kohlendioxid. Ob dies wirklich der Grund von Klimaveränderungen ist, halten manche noch immer für eine offene Frage. Der vorherrschende Rat ist allerdings, nicht auf eine experimentelle Verifizierung der vorherrschenden Prognosen zu warten; es könnte nur einen Versuch geben.
- Mobilität verursacht nicht nur dichten Verkehr und Staus, sondern auch Lärm und Luftverschmutzung. Dies kann wiederum auf Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren zurückgeführt werden. Der Ersatz dieser Wandler durch andere Systeme könnte substantielle Erleichterung bewirken.

- Die Nutzung anderer Energiequellen wie Wind, Sonnenlicht, Wasserkraft oder Solarwärme benötigt große Speicher zur Anpassung des stark fluktuierenden Angebotes an die schwankende Nachfrage,<sup>2)</sup> zum Spitzenausgleich (peak shaving) und zur Qualitätssicherung. Die meisten erneuerbaren<sup>3)</sup> Energiequellen werden mit dem Stromnetz über DC-Zwischenkreise gekoppelt; sie können daher zur Frequenzstabilisierung als Teil der Qualitätssicherung nicht genutzt werden. Um die Netzfrequenz innerhalb  $\pm 0,1$  Hz z. B. in Deutschland zu halten, werden 2,7 GW AC-gekoppelte Leistung benötigt, um eine Regelung innerhalb einer halben Sinuswelle der Wechselspannung, d. h. in weniger als 10 ms, zu gewährleisten.

Weitergehende Erfüllung der genannten Forderungen wird nur möglich sein, wenn weitere stationäre wie mobile Energiespeicher und -wandler verfügbar werden. Zur Illustration sind in Abb. 1.3 typische Schwankungen der von einem Windpark mit

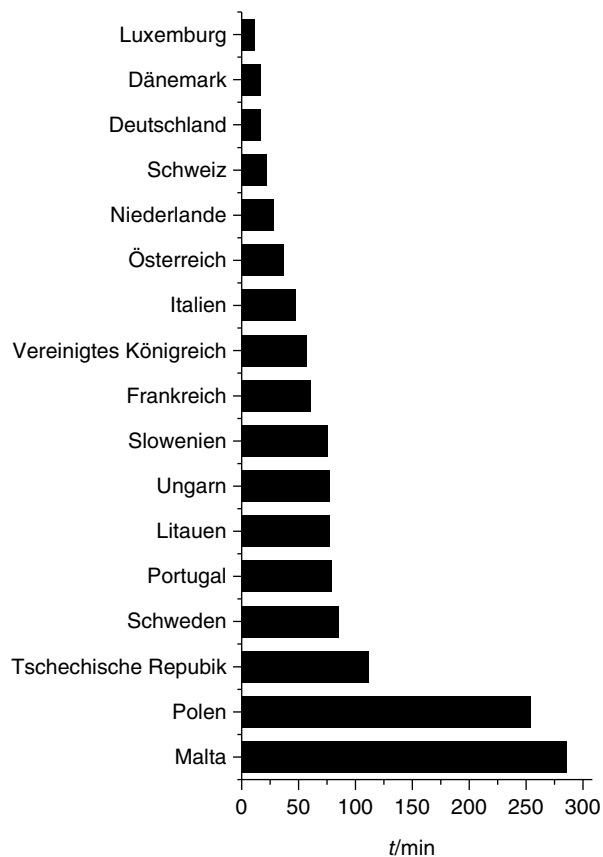


**Abb. 1.3** Tatsächliches Leistungsangebot eines Windparks (76 Windräder) in Cap-Chat (Québec, Kanada) am 16.03.2004.

2) Load leveling (LL) bezeichnet den langfristigen Abgleich von Angebot und Nachfrage: zwischen Tag und Nacht, Winter und Sommer und über längere Zeiträume. Power quality (PQ) meint die Konstanzhaltung elektrischer Parameter der Stromversorgung wie Spannung und Frequenz. Peak shaving (PS) nennt man den Ausgleich der Folgen plötzlicher Änderungen von Angebot und Nachfrage (wenn z. B. plötzliche viele Verbraucher eingeschaltet werden und damit ein Absinken von Netzfrequenz und -spannung verursacht wird).

3) Die Adjektive „erneuerbar“, „regenerativ“ und „nachhaltig“ werden in der Diskussion munter gemischt und offenbar meist als Synonym betrachtet. Hier wird nur der erste Begriff verwendet und auf eine Diskussion der Ungenauigkeit aller Adjektive verzichtet.

6 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung



**Abb. 1.4** Netzausfälle in Minuten pro Jahr in 2013 in Europa.

76 Windrädern am 16.03.2004 in Cap-Chat (Québec, Kanada) bereitgestellten Leistung dargestellt.

Aktuelle Berichte über Netzausfälle (Abb. 1.4) verschaffen nur begrenzte Erleichterung, denn sie zeigen nur Details und Konsequenzen eines schnell voranschreitenden Trends: Veränderungen in den Beiträgen verschiedener Primärenergiequellen zur Elektrizitätserzeugung. Die für 1973 ermittelte Verteilung ist in Abb. 1.5 dargestellt. Einige Jahrzehnte später hat sich das Bild sichtbar geändert (Abb. 1.6). In Abb. 1.7 schließlich werden die Änderungen noch deutlicher sichtbar, unter „Andere Energieträger“ sind alle erneuerbaren Energiequellen zusammengefasst.

Mit dem ständig wachsenden Anteil von elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen wird ihre Speicherung immer wichtiger, vor allem wenn ihr Anteil so groß ist wie mit 29% in Deutschland 2015 (12,3% aus Windenergie und 6% aus Photovoltaik, zwei besonders volatile Quellen).

1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung | 7

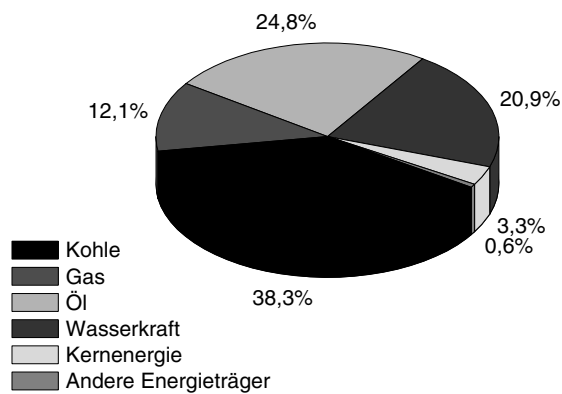


Abb. 1.5 Primärenergiequellen in der Elektrizitätserzeugung 1973, insgesamt 6131 TWh.

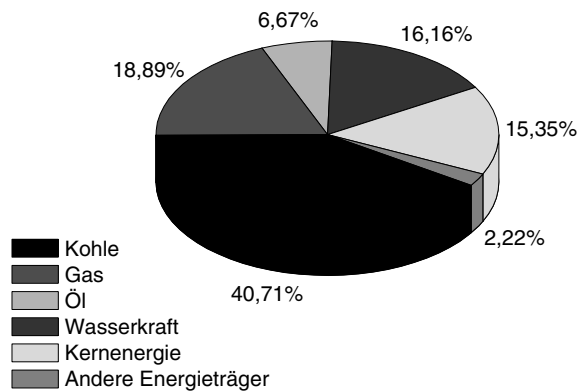


Abb. 1.6 Primärenergiequellen in der Elektrizitätserzeugung in 2005.

Speicherung von elektrischer Energie ist auf verschiedenen Wegen möglich.  
Mechanisch:

- Pumpspeicherkraftwerk
- Druckluftspeicherkraftwerk (CAES, compressed air (oder gas) energy storage)
- Schwungrad

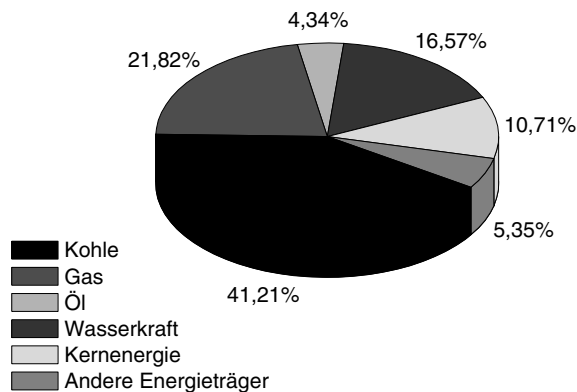
Elektrisch:

- Kondensator
- Magnetspule

Elektrochemisch:

- Akkumulator
- Flußbatterie
- Elektrolyseur und regenerative Brennstoffzelle

8 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung



**Abb. 1.7** Primärenergiequellen in der Elektrizitätserzeugung in 2014, insgesamt 23 816 TWh.

Pumpspeicherkraftwerke nutzen die potentielle Energie von in einem höher gelegenen Staubecken oder See gespeichertem Wasser. Dieses Wasser treibt bei Bedarf Turbinen mit angeschlossenen Generatoren an; es wird im unteren Speicher gesammelt. Bei einem Überschuss elektrischer Energie im Netz wird dieses Wasser wieder in den oberen Speicher gepumpt. In 2011 gab es in Deutschland 33 Pumpspeicherkraftwerke mit einer Gesamtleistung von 6,6 GW; nur ein weiteres Kraftwerk ist für die Inbetriebnahme in 2024 geplant. Diese überschaubare Kapazität liegt an den für einen wirtschaftlichen Bau und Betrieb benötigten Voraussetzungen: Beide Wasserspeicher müssen vorhanden oder leicht einrichtbar sein mit einem ausreichend großen Höhenunterschied. Die Technologie ist zuverlässig und hocheffizient: 75–85 % der gespeicherten Energie werden wiedergewonnen. Nur Verdunstung verursacht Verluste; auch eine langfristige Speicherung ist sehr gut möglich und macht jahreszeitlichen Ausgleich möglich. Die Kraftwerke können in ca. 15 s ohne äußere Energiezufuhr an- und abgeschaltet werden (Schwarzstartfähigkeit) und daher auch für kurzfristige Speicherung zum täglichen Lastausgleich genutzt werden. Nach vorliegenden Berichten waren 2017 mehr als 90 % der weltweiten Speicherkapazität für elektrische Energie in Pumpspeicherkraftwerken installiert.

In CAES wird Überschussenergie aus dem elektrischen Netz zur Kompression von Luft auf typisch 10 MPa genutzt, die in unterirdischen Kavernen gespeichert wird. Bei der Entladung erspart die Nutzung der komprimierten Luft die Kompression von Verbrennungsluft für eine Gasturbine (typisch 7,5 MPa), die einen elektrischen Generator antreibt. Weltweit gibt es zwei derartige Speicher, jeweils einen in den USA und in Deutschland. Zwei Betriebsarten sind möglich: Beim diabatischen Modus wird die bei der Kompression freiwerdende Wärme nicht genutzt; dies resultiert in einer Gesamteffizienz von 45 %. Wenn diese Wärme dagegen genutzt wird, steigt die Effizienz auf 55 %. Die in Huntorf, Deutschland, betriebene Anlage gibt 290 MW in das elektrische Netz ab; im Speicherbetrieb nimmt sie bis zu 60 MW auf. Ein ausreichend großer unterirdischer Speicher ist nötig; im Beispiel wird eine ausgelaugte 300 000 m<sup>3</sup> große Salzkaverne genutzt. Das Vorhandensein solcher Speichermöglichkeiten ist wesentliche Voraussetzung für die Errichtung einer Anlage. Kleine-



re Anlagen (SSCAES, small-scale compressed air (oder gas) energy storages) wurden entwickelt, die Luft bei 300 bar in Druckgefäßen speichern. Die Gesamteffizienz liegt bei 45 %, die Lebensdauer ist von der mechanischen Ermüdung der Druckgefäße begrenzt. Ein etwas umständlicherer Prozeß nutzt Überschußenergie aus dem Netz ebenfalls zur Kompression gereinigter Umgebungsluft. Nach ausreichender Abkühlung wird die Luft schließlich verflüssigt und bei  $-196\text{ °C}$  in isolierten Tanks gelagert. Bei Bedarf wird die verflüssigte Luft in einen Druckbehälter gepumpt und mit Wärme aus der Umgebung wieder verdampft. Die so erzeugte Druckluft wird wie dargestellt in einer Gasturbine genutzt.

Schwungräder können direkt an Elektromotoren gekoppelt werden, die bei Entnahme der in mechanischer Form gespeicherten Energie als Generator genutzt werden. Bekannte Anwendungen sind meist klein. In einem Sportwagen treibt ein Schwungradspeicher zwei Elektromotoren an den Vorderrädern mit zusätzlichen 160 PS für kurze Beschleunigungszeiten (6–8 s) an. Das Schwungrad wird beim Bremsen auf bis zu 40 000 Umdrehungen pro Minute gebracht. Größere Schwungräder wurden in Omnibussen (Gyrobuss) an Bushaltestellen aufgeladen. Vor allem die mechanischen Anforderungen sind beträchtlich; weitverbreitete Nutzung vor allem in größeren Einheiten erscheint unwahrscheinlich.

Direkte Speicherung elektrischer Energie, d. h. ohne Umwandlung in eine andere Energieform, ist in Magnetspulen und Kondensatoren möglich. Riesige Magnete mit Drähten aus supraleitendem Material wie in Teilchendetektoren in Forschungseinrichtungen (z. B. CERN, Genf) können tatsächlich erhebliche Energiemengen speichern. Der Magnet an der Wasserstoffblasenkammer speichert 216 kWh bei einem Strom von 5700 A und einer Selbstinduktivität von 48 Hy bei einem Gewicht von 276 t. Grobe Schätzungen für große Speicherprojekte (5000–10 000 MWh) führen zu großen Spulen von mehreren Hundert Metern im Durchmesser, die ihrerseits starke Magnetfelder erzeugen würden, die eine unterirdische Installation an abgelegener Stelle erzwingen. Offenbar ist dieses Speicherverfahren für eine Speicherung in großem Umfang nicht geeignet; dagegen ist eine kurzzeitige Speicherung in kleinen Superleitermagneten für lokale Nutzung denkbar.

Konventionelle Kondensatoren wie in Elektronik und Elektrotechnik allgegenwärtig wurden bislang nicht für die Speicherung substantieller Mengen elektrischer Energie verwendet, da ihr Speichervermögen zu klein und ihre Selbstentladung zu hoch ist. Neue Anwendungen für verbesserte Kondensatoren sowie neue Einsatzmöglichkeiten mit elektrischen Motoren, die leicht als Generatoren genutzt werden können, haben die Situation stark verändert und zur erfolgreichen Entwicklung und zu Anwendungen von Superkondensatoren mit drastisch gesteigerten Speichervermögen beigetragen.

In allen elektrochemischen Speicher- und Wandler-Systemen wird elektrische Energie in chemische Energie (beim Laden einer Batterie) gewandelt; bei der Entladung dreht sich die Richtung des Wandlungsvorgangs um. Diese indirekte Speicherung auf dem Weg über Umwandlungsprozesse ist mit Verlusten behaftet. Traditionell werden elektrochemische Speicher mit einigen Hauptanwendungsgebieten assoziiert:

10 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung

- Unterbrechungsfreie Stromversorgung für Krankenhäuser, Verkehrslenkung, Flugzeuge etc.
- Anlassen, Beleuchten und Zündung (starting, lighting, and ignition, SLI) in Fahrzeugen
- Stromversorgung netzferner Gebiete (remote area power supply, RAPS)
- Mobile und tragbare<sup>4)</sup> Anwendungen in Kameras, Mobiltelefonen, elektronischen Geräten, tragbaren Computern etc.

In jüngster Zeit ist die Notwendigkeit von Speichern zum Ausgleich von Angebot und Bedarf bei der Nutzung fluktuierender erneuerbarer Energiequellen als weiteres wichtiges Anwendungsfeld hinzugetreten.

Weil dieses Anwendungsfeld eine Hauptherausforderung werden könnte, sind Entwicklungsziele für stromnetzbezogene Speicheranwendungen von allgemeinem Interesse. Daten vor allem für den amerikanischen Markt sind in Tab. 1.1 zusammengefaßt.

Bemühungen um gesteigerte Energieeffizienz und bessere Energienutzung (manchmal der wirksamste Weg, um die Notwendigkeit weiterer Kraftwerke zu vermeiden) erfordern leistungsfähige Speicher für z. B. die Energierückgewinnung in Fahrzeugen. Dieses bei elektrischen Eisenbahnen mit einer Oberleitung seit Jahrzehnten gut funktionierende Verfahren ist nicht bei allen AC- und DC-Systemen einsetzbar. Zudem sind diese Systeme in ihrer Leistungsaufnahme beim Bremsen mancher Lokomotiven überfordert. In Untergrundbahnen und anderen Formen des urbanen Massenverkehrs werden zudem Systeme benötigt, die die große beim zeitnahen Abbremsen zahlreicher Fahrzeuge freiwerdende Energie aufnehmen können. Wiederum erscheinen elektrochemische Speicher als vielversprechende Lösung.

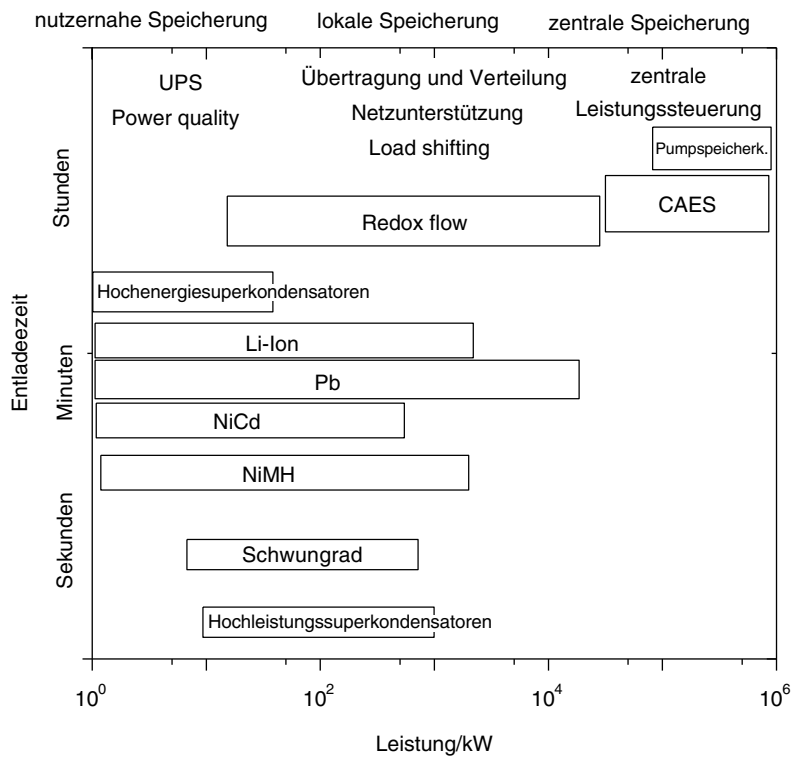
Zuordnungen von Systemen zu denkbaren Anwendungen sind in Abb. 1.8 gezeigt.

Ein mit dieser Darstellung eng verknüpfter Begriff ist die Betriebsreserve. Er bezeichnet die auf verschiedenen Zeitskalen verfügbare Speicher- und Stromabgabekapazität zur Aufnahme von Überschuß und Deckung von Mangel. Abhängig von der Reaktionszeit (s. Abb. 1.9), werden verschiedene Reaktionszeiten betrachtet (die tatsächlichen Zeitfenster unterliegen nationaler wie internationaler Regelungen; sie können Änderungen ebenso unterliegen wie Vorschriften zur Vorankündigung von Maßnahmen, Ausschreibungen etc.):

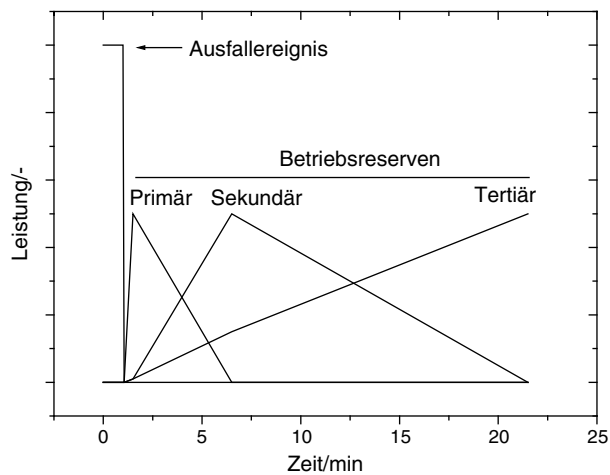
- Primäre Betriebsreserve: Der zugesagte Energiebetrag muß innerhalb von 30 s nach Anforderung bereitgestellt werden.
- Sekundäre Betriebsreserve: Das Gleiche mit einem Zeitrahmen von 5 min.
- Tertiäre Betriebsreserve: Das Gleiche mit einem Zeitrahmen von 15 min.

Außerdem ist die „rotierende Reserve (spinning reserve) zu betrachten. Es handelt sich um den zusätzlichen Energiebetrag, der durch eine kurzzeitige Steigerung

4) Die Unterscheidung erscheint nicht fest definiert zu sein; vermutlich ist ein Auto keine tragbare, sondern eine mobile Anwendung, während eine Kamera meist tragbar ist. Ein Mobiltelefon ist beides – was die Verwirrung steigert. Vermutlich können kleine Speicher am ehesten mit tragbaren Anwendungen, größere Speicher mit mobilen Anwendungen verbunden werden.



**Abb. 1.8** Typische Entladezeiten und spezifizierte Leistung elektrochemischer Speichersysteme (zu Akronymen siehe Text).



**Abb. 1.9** Schematische Darstellung der Beiträge verschiedener Betriebsreserven nach dem Ausfall einer Energiequelle.

12 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung

**Tab. 1.1** Entwicklungs- und Leistungsziele für netzbezogene Energiespeicherung.

Anwendung	Dauer	Zweck	Ziele
Frequenz- und regionale Regelung	Kurz	Anpassung von Angebot und Nachfrage, Netzqualität (power quality)	Betriebskosten: US\$ 20/MW Gesamteffizienz: 85–90 % Systemlebenserwartung: 10 a Entladedauer: 0,25–2 h Reaktionszeit: ms
Integration von erneuerbaren Quellen	Kurz	Kompensation kurzfristiger Schwankungen der Energielieferung von Photovoltaikquellen	Gesamteffizienz: 90 % Systemlebenserwartung: 10 a Kapazität: 1–20 MW Reaktionszeit: s
Aufschiebung von Netzausbau	Kurz	Verschiebung oder Vermeidung von Investitionen in das Netz	Kosten: US\$ 500/kWh Kapazität: 1–100 MW Zuverlässigkeit: 99,9 % Systemlebenserwartung: 10 a
Lastfolge	Lang	Erlaubt den Betrieb von Wandlersystemen bei maximalem Wirkungsgrad bei schwankender Last	Kapitalkosten: US\$ 1500/kW oder US\$ 500/kWh Betriebskosten: US\$ 500/kWh Entladedauer: 2–6 h
Ausgleich tageszeitlicher Schwankungen	Lang	Speicherung von Überschußenergie und Abgabe bei hohem Bedarf (load leveling)	Kapitalkosten: US\$ 1500/kW oder US\$ 500/kWh Betriebskosten: US\$ 250–500/kWh Entladedauer: 2–6 h Effizienz: 70–80 % Reaktionszeit: 5–30 min
Ausgleich jahreszeitlicher Nachfrageschwankungen	Sehr lang	Speicherung von Energieüberschüssen bei hohem Angebot, Abgabe bei großem Bedarf (Wind- und Sonnenenergie)	–

der Abgabeleistung eines Generators zur Verfügung gestellt werden kann. Im Unterschied dazu sind die oben betrachteten Betriebsreserven „nichtrotierende Reserven“. Neben Betriebsreserven von generatorbasierten Kraftwerken werden weitere geeignete Energiequellen benötigt; wiederum sind elektrochemische Systeme interessant. In einer typischen Installation, die im August 2017 in Deutschland an das Netz ging, können 15,9 MWh gespeichert werden. Die Anlage enthält 4008 Lithium-Ionen-Batteriemodule, die bis zu 14 MW Leistung abgeben können. Dies entspricht 1 % der primären Betriebsreserve in Deutschland.

Wasserelektrolyseure, die für die Wandlung elektrischer in chemische Energie wichtig sind (zu Details s. Kap. 9), können sicher auch bei einem Bruchteil ihrer nominalen Kapazität (bis zu 10 %) wie auch bei erheblicher Überlast (bis zu 300 %) betrieben werden. Diese Anlagen können eine Betriebsreserve in erweitertem Sinn durch Drosselung ihrer Leistungsaufnahme im Bedarfsfall liefern.

**Tab. 1.2** Vergleich einiger Energiespeichersysteme für z. B. Übertragungs- und delokalisierte Netzunterstützung.

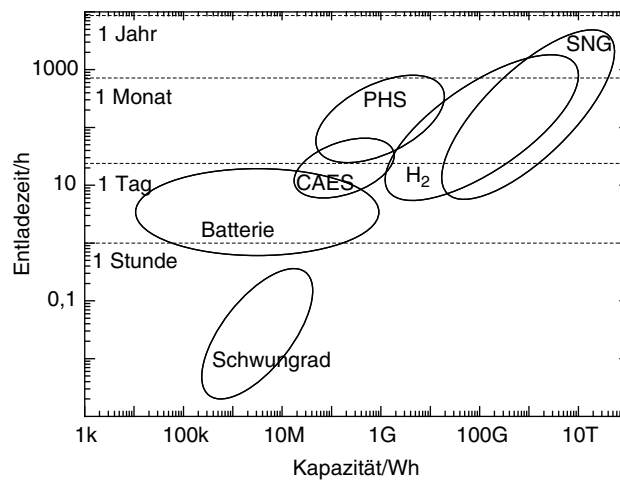
Typ	Leistung	Mobil	Entladezeit/h	Reaktion	Effizienz (%)	Zyklenzahl bei 80 % DOD <sup>a)</sup>	Kommerzialisiert?	Kosten (US\$/kWh)
Pumpspeicher	MW–GW	–	> 8	Schnell	70–85	2–5 × 10 <sup>4</sup>	++	–
Elektromagnet	MW	–	0,25	Schnell	90–95	0,1–1 × 10 <sup>4</sup>	?	–
Druckluft	MW–GW	–	0,1–15	Sehr schnell	60–79	0,9–3 × 10 <sup>4</sup>	+	390–430
Schwungrad	kW	+	0,1–1	Schnell	> 90	> 2 × 10 <sup>4</sup>	+	–
Superkondensator	kW	+	0,02–1	Sehr schnell	> 95	1–10 × 10 <sup>4</sup>	++	–
Thermal	MW	–	1–45	Langsam	60	0,4–1 × 10 <sup>4</sup>	+	–
Blei-Säure	kW–MW	++	0,1–4	Schnell	70–76	200–1500	++	625–1150
Natrium-Schwefel	MW	–	1–10	Schnell	85–90	210–4500	+	445–555
Lithium-Ionen	kW–MW	++	0,1–1	Schnell	> 90	5–7 × 10 <sup>3</sup>	++	900–1700
Flußbatterie	kW–MW	–	1–20	Schnell	75–85	0,5–14 × 10 <sup>4</sup>	+	340–1350

a) DOD = Entladetiefe (depth of discharge).

Tabelle 1.2 vergleicht Energiespeichersysteme und nennt wichtige Kriterien. Daten können sich täglich ändern, die Tabelle kann daher nur einen momentanen Schnappschuß zeigen.

Einige Systeme sind allgegenwärtig (++) in verschiedenen Dimensionen (Lithium-Ionen-Batterien meist bei portablen und mobilen Anwendungen, Blei-Säure-Batterien als Starterbatterie und in unterbrechungsfreien Stromversorgungen, Superkondensatoren zur Kurzzeitspeicherung und in vielen Anwendungen, Pumpspeicherkraftwerke als Speicher im Netz an Orten mit geeigneter Topographie), einige (+) sind verfügbar, aber aus verschiedenen Gründen kaum im Einsatz (Schwungräder und Thermalspeicher sind noch immer kostspielig, Kavernen zur Druckluftspeicherung sind noch seltener als geeignete Orte für Pumpspeicherkraftwerke, Na-S ist noch immer kostspielig, Flußbatterien werden oft noch als experimentell angesehen), und einige sind für praktische Anwendung schlicht unwahrscheinlich. Gewiß ist Tab. 1.2 nicht abschließend, denn manche Zahlen sind subjektive Bewertungen der Autoren und daher Gegenstand weiterer Diskussion und Entwicklung. In jedem Fall decken elektrochemische Systeme einen weiten Bereich von Leistungs- und Speichervermögen ab; viele können leicht sehr klein wie sehr groß ausgeführt werden. Und alle haben einen gemeinsamen Vorteil: Sie speichern elektrische Energie als wohl „wertvollste“ Energieform und geben sie wieder ab. Zusammen mit dem wachsenden Anteil elektrischer Energie aus erneuerbaren Quellen, deren Angebot mit der Tageszeit, mit der Jahreszeit oder mit der Windstärke variiert, bieten elektrochemische Systeme wichtige, möglicherweise entscheidende Beiträge zur Entwicklung der Energienutzung fossiler und nuklearer Energiequellen. Schließlich können sie wegen ihrer geringen Umweltbeeinträchtigungen (keine Abgase, kein Qualm, geringe Abwärme, keine Notwendigkeit voluminöser Brennstoffzufuhr, fast lärmfrei) nahezu überall aufgestellt werden. Dies

14 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung



**Abb. 1.10** Speicherkapazität und typische Entladezeiten verschiedener Speichertechnologien.

ist vor allem wegen der Vermeidung von Übertragungsverlusten nützlich und kann beim Übergang zu einer verteilten Verteilungsinfrastruktur weg von einer zentralisierten Struktur mit ihren Risiken und Effizienzmängeln helfen. Schließlich haben sie kurze Reaktionszeiten und können damit Bedarfsschwankungen auch von Verbrauchern mit hohen Ansprüchen an eine zuverlässige Versorgung bei hoher Spannungs- und Frequenzkonstanz ebenso befriedigen wie die Fluktuation erneuerbarer Quellen mit z. B. plötzlichen Schwankungen in der Abgabeleistung einer Photovoltaikanlage bei plötzlicher Wolkenverdichtung ausgleichen (zum Vergleich s. Abb. 1.10).

Bei der Abwägung von Energiespeichern und -wandlern für aktuelle und zukünftige Systeme und Ökonomien sollte auch das „Nachhaltigkeitsprofil“ von Systemen und Quellen berücksichtigt werden (s. Tab. 1.3).

Kritische Parameter aller Energiespeichersysteme sind ihre gravimetrischen und volumetrischen Energie- und Leistungsdichten. Tabelle 1.4 gibt einen Überblick einschließlich der Dichte von Speichermaterialien als Verbindung zwischen den beiden Dichten. Tatsächliche Zahlenwerte können schwanken, weil Annahmen bezüglich chemischer Reaktionen bei den Wandlungsprozessen und beim Einschluß/Ausschluß weiterer Reaktanden variieren können.

Der aktuelle Sachstand aus Tab. 1.4 ist in Abb. 1.11 illustriert. Weitere, mehr spezifisch-numerische – weiterhin theoretische – Werte sind für ausgewählte Systeme in Abb. 1.12 dargestellt.

Batterien aller Art sind noch immer unterlegen; dieses Bild wird bei Betrachtung der praktischen Werte, die nur ca. 25 % der theoretischen Werte für Sekundär- und ca. 50 % für Primärbatterien erreichen (s. Kap. 3), noch unvorteilhafter. Ein realitätsnäheres Bild zeigen in Abb. 1.13 mögliche Reichweiten mit einer Tankfüllung von z. B. einem 50 l-Benzintank oder einer 350 kg schweren Batterie.

**Tab. 1.3** Nachhaltigkeitsprofil ausgewählter Prozesse für die Energiewandlung und -speicherung.

Nachhaltigkeitsprofil				
Technologie	Lange Lebensdauer	Unschädlich	Hinterläßt keine Veränderungen	Benötigte Durchbrüche
Solar	+	+	+	Billigere und effizientere Zellen, Energiespeicherung
Wind	+	+	+	Speicherung elektrischer Energie
CO <sub>2</sub> -Speicherung	0	+ Lecks?	-	Grundlagenverständnis ablaufender Reaktionen
Nuklear	0	+ Radioaktivität	-	Abfalllagerung, Materialien für Fusionsreaktoren
Biobrennstoffe	+	+	+	Verbesserte Nutzung von Zellulose, chemische Katalyse
Elektromobilität	+	+	+	Bessere Batterien, saubere Quellen elektrischer Energie

Wiederum sind die Daten nur ein tagesaktueller Schnappschuß derzeitiger Möglichkeiten; sie können sich täglich ändern und illustrieren die enttäuschenden Möglichkeiten praktisch aller elektrochemischer Speichersysteme. Eine mit Benzin oder einem einfachen Brennstoff betriebene Brennstoffzelle kann – wie in Kap. 9 dargestellt – eine effizientere Möglichkeit darstellen.

Mitunter wird Wasserstoff als Energieträger anstelle von Elektrizität betrachtet. Der Vergleich von Wasserstoff und wasserstoffhaltigen Chemikalien (z. B. Toluol/Methylcyclohexan<sup>5)</sup> oder Dimethylether<sup>6)</sup>) in Tab. 1.5 zeigt typische Vor- und Nachteile.

Eine eingehende Darstellung der Wasserstoffökonomie liegt außerhalb des vorliegenden Buches; ein kurzer Blick in Tab. 1.6 auf Wasserstoff im Rahmen der Speicherung elektrischer Energie auf der Grundlage von Wasserelektrolysen mit Überschußenergie aus erneuerbaren Quellen (vor allem Wind und Sonne) ist dennoch instruktiv.

Optionen für die Wasserstoffproduktion und -nutzung sind schematisch in Abb. 1.14 zusammengestellt.

5)  $\text{Toluol} + 2,5\text{H}_2 \rightarrow \text{Methylcyclohexan}$  kann als eine Speicherreaktion aufgefaßt werden; ihre Umkehrung ist die Freisetzung von Wasserstoff. Die beteiligten Flüssigkeiten können als Speichermedien aufgefaßt werden.

6) Dimethylether (DME) ist ein Wasserstoffträger mit technischen Eigenschaften ähnlich denen von Dieselmotortreibstoff. Wasserstoff kann zudem aus DME mit katalytischen Prozessen freigesetzt werden. Als Treibstoffersatz kann DME schlicht mit geringeren Emissionen verbrannt werden.

16 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung

**Tab. 1.4** Volumetrische und gravimetrische Energiedichten ausgewählter Energiespeichermaterialien.

	Volumetrische Energiedichte		Dichte kg l <sup>-1</sup>	Gravimetrische Energiedichte	
	kWh l <sup>-1</sup>	MJ l <sup>-1</sup>		kWh kg <sup>-1</sup>	MJ kg <sup>-1</sup>
Benzin	8,6	31,0	0,7	12,2	44,0
Superbenzin	8,4	30,3	0,7	12,0	43,2
Dieselmotortreibstoff	9,6	35,0	0,8	11,8	42,7
Methanol	4,4	16,1	0,792	5,5	19,9
Bioethanol	5,9	21,2	0,8	7,4	26,6
Pflanzenöl	9,2	33,1	0,9	10,2	36,8
Biodiesel	8,9	32,0	0,8	10,3	37,0
Synthesebenzin	8–10	30–35	0,8–0,9	10–12	38–44
Autogas	6,4	23,0	0,5	12,8	46,1
Methan	5,9	21,5	0,000 656 <sup>a)</sup>	13,9	50,3
Propan	7,5	27,3	0,000 493 <sup>a)</sup>	12,9	46,7
Butan	7,6	27,7	0,002 48 <sup>a)</sup>	12,7	46,0
Komprimiertes Erdgas bei 200 bar	11,5	41,4	0,7	14,4	52,0
Wasserstoff, flüssig, T = -253 °C	2,3	8,3	0,07	33,3	119,9
Wasserstoff 200 bar	0,5	1,8	0,02	33,3	119,9
Wasserstoff 650 bar	1,3	4,5	0,04	33,3	119,9
Blei-Säure-Akkumulator	0,05	0,2	1,1	0,06	0,22
Lithium-Ionen-Batterie	0,5	1,8	0,4	0,2	0,72
Steinkohle	8,8	31,7	1,1	8,1	29,3
Holzpellets	3,1	11,2	0,7	4,8	17,3

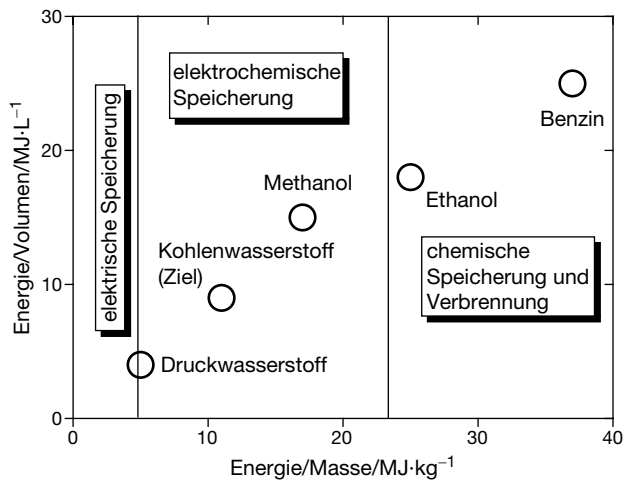
a) Im gasförmigen Zustand.

**Tab. 1.5** Vor- und Nachteile von Energieträgern.

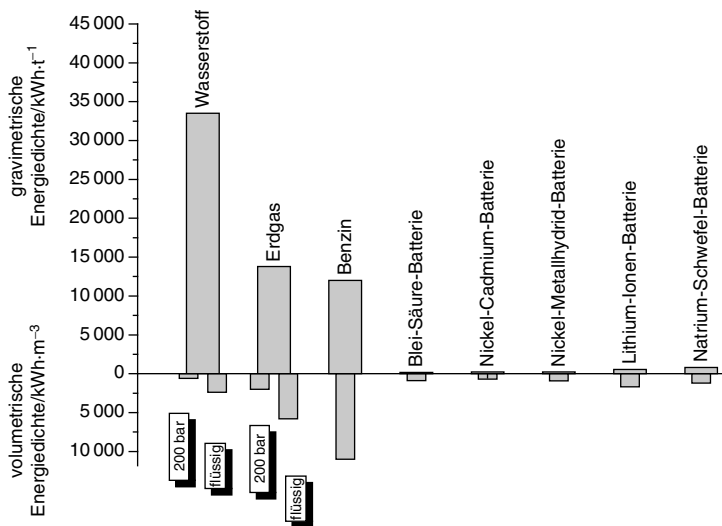
Träger	Betrieb	Übertragung
Elektrizität	Einfach	Einfach, Verluste steigen mit der Entfernung
Chemikalien	Umwandlungen nötig	Nur Transportkosten, keine Verluste

Auch wenn Energiespeicherung durch Wasserelektrolyse gewiß eine Speicheroption darstellt, die beim Gebrauch einer Wasserstoff-/Sauerstoff-Brennstoffzelle interessant wird, liegt sie außerhalb dieses Buches. Eine Ausnahme bilden Brennstoff-





**Abb. 1.11** Gravimetrische und volumetrische Energiedichten gängiger Speichermaterialien vor allem für mobile Anwendungen.

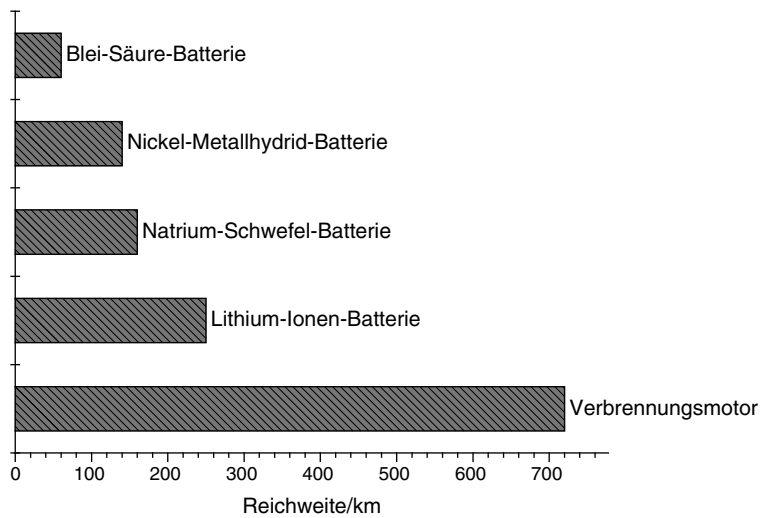


**Abb. 1.12** Theoretische gravimetrische und volumetrische Energiedichten ausgewählter wiederaufladbarer Batterien, zum Vergleich ausgewählte Treibstoffe.

zellen, die sowohl als Elektrolyseur wie auch als Brennstoffzelle arbeiten können. Sie werden in Kap. 9 vorgestellt.

Mit wachsender Marktdurchdringung von sowohl etablierten als auch neuen Systemen werden die Eigenschaften von Sekundärbatterien für die Anwendung noch interessanter. Die relative Bedeutung einiger Eigenschaften für ausgewählte typische Anwendungen ist in Tab. 1.7 zusammengestellt; die gefundene Reihung ist vermutlich nur eine von mehreren Möglichkeiten.

18 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung



**Abb. 1.13** Reichweiten von Fahrzeugen mit verschiedenen Antriebssystemen und Energiespeichern mit einer Tankfüllung.

**Tab. 1.6** Gebrauch von Wasserstoff in Energiespeicherung und -verteilung.

System	Konversion in elektrische Energie durch	Effizienz/%
Beimischung von H <sub>2</sub> in das Erdgasleitungsnetz	Gasturbine	27,4
	Kombikraftwerk	33,9
Methanproduktion	Gasturbine	17,9
	Kombikraftwerk	28,1
Flüssige Wasserstoffträger	Gasmotor	29,0
	Brennstoffzelle	30,4

Beim Versuch, aktuelle verfügbare oder zumindest ausreichend weit entwickelte Speichertechnologie mit typischen Anwendungen neben den omnipräsenten mobilen und transportablen Anwendungen zu verknüpfen, können vier Kategorien identifiziert werden:

1. Abgelegene Anwendung mit geringer Leistungsaufnahme in der Rundfunk- und Fernsehübertragung, der Überwachung, Notfallkommunikation etc., für autonomen Betrieb 10–30 Tage, Energiebedarf 1 Wh bis 100 kWh, typische Ladeströme  $0,05 \cdot C_{10}^{7)}$ , typische Entladeströme  $< 0,01 \cdot C_{10}$ , Entladetiefe pro Lade-/Entladezyklus 5%, typische 20 komplette Lade-/Entladezyklen, Ladung aus Photovoltaik
2. Netzferne Anwendungen mit mittlerem Leistungsbedarf in isolierten Plätzen, Häusern kleiner Siedlungen, autonomer Betrieb für 1–10 Tage, Energiebedarf

7)  $C_{10}$ : Maximal entnommene Energiemenge bei Entladung in 10 h.

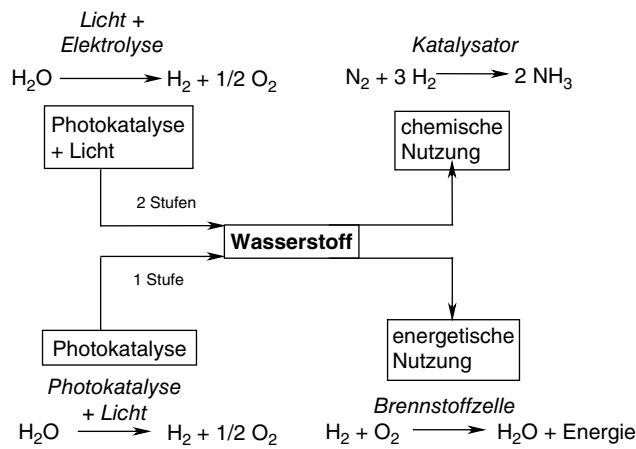


Abb. 1.14 Optionen für die Wasserstoffproduktion und -nutzung.

Tab. 1.7 Relative Bedeutung von Systemeigenschaften für ausgewählte Anwendungen.

Relative Bedeutung	Mobile/tragbare Anwendung	Elektrische Fahrzeuge	Netz
Hoch	Energiedichte Sicherheit	Leistungsdichte Sicherheit	Kosten Größe
	Kosten	Lebenszeitkosten	Leistung/Energiedichte
	Niedrig	Leistung	Energiedichte Sicherheit

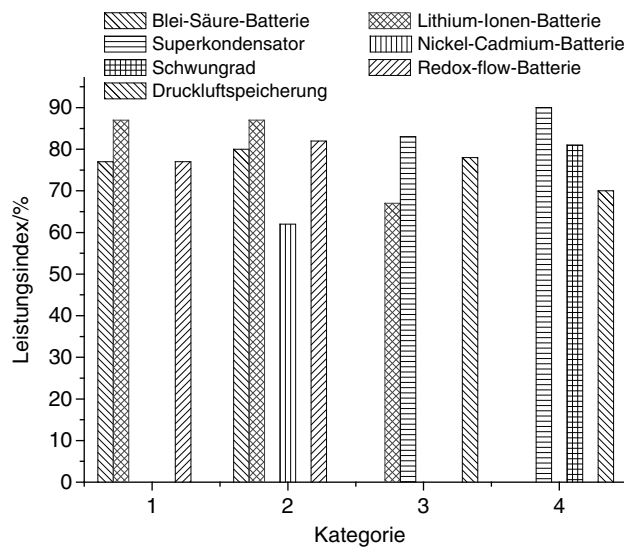
10 Wh bis 1 MWh, typischer Ladestrom  $0,05-0,2 \cdot C_{10}$ , typischer Entladestrom  $0,02-0,1 \cdot C_{10}$ , pro Zyklus genutzte Kapazität 10–30 %, typische Zahl kompletter Zyklen pro Jahr 50–400, Ladung aus Photovoltaik

- Netzgebundene Anwendungen zum Spitzenausgleich (z. B. in Verbindung mit Windrädern), autonomer Betrieb 0,25–10 h, Energiebedarf von 10 kWh bis 1 MWh, typischer Ladestrom  $0,2-0,5 \cdot C_{10}$ , typischer Entladestrom  $0,25-0,5 \cdot C_{10}$ , pro Zyklus genutzte Kapazität 50–80 %, typische Zahl kompletter Zyklen pro Jahr 300–1000, Ladung aus Photovoltaik oder Windenergie
- Netzstabilisierung (power quality), autonomer Betrieb 2–600 s, Energiebedarf von 1 Wh bis 1 MWh, typischer Ladestrom  $100 \cdot C_{10}$ , typischer Entladestrom  $100 \cdot C_{10}$ , pro Zyklus genutzte Kapazität 50–80 %, typische Zahl kompletter Zyklen pro Jahr 3000–100 000

Neun ausgewählte Speichertechnologien erweisen sich als mehr oder weniger geeignet für diese Anwendungen:

- Blei-Säure-Batterie
- Superkondensator
- Druckluftspeicher

20 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung



**Abb. 1.15** Eignungsindex (in %; eine höhere Prozentzahl zeigt eine bessere Eignung an) für neun Systeme und vier Anwendungskategorien.

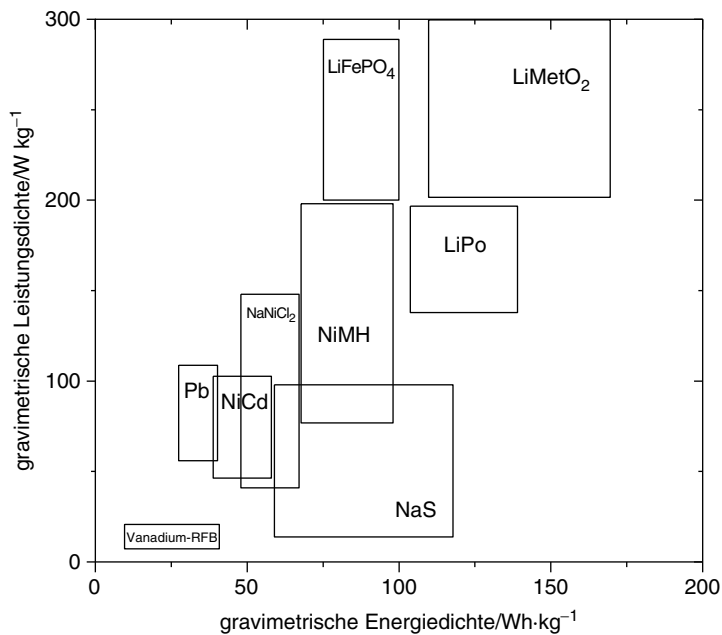
- Lithium-Ionen-Batterie
- Schwungrad
- Nickel-Cadmium-Akkumulator
- Redoxbatterie

Die relative Eignung für diese Anwendungen ist in Abb. 1.15 gezeigt.

Unter Bezug auf spezifische Anwendungen zeigt Abb. 1.16 eine genauere Darstellung für Netzanwendungen.

Abhängig vom technischen Fortschritt und von wirtschaftlichen Entwicklungen sind Verschiebungen und Veränderungen zu erwarten; dies kann auch geschehen, wenn externe Faktoren wie gesetzliche oder politische Bedingungen verändert werden.

Ein Kriterium von variabler Bedeutung ist der Preis, insbesondere der Preis je Kilowattstunde elektrischer Energie. Eine Kilowattstunde aus dem öffentlichen Netz kostet ca. 0,20 € (in Europa in 2010), während 1 kWh aus Alkali-Mangan-Zellen (Größe AA) ungefähr 60 € kosten (man braucht ca. 300 dieser Zellen). Mit Zellen der Größe AAA wird sich der Preis verdoppeln, da diese Zellen in etwa so viel wie Zellen der Größe AA bei einem viel kleineren Energieinhalt kosten. Bei der Produktion einer dieser Zellen wird das 40- bis 500-Fache der später verfügbaren, gespeicherten Energie aufgewendet. Daher sind, zumindest unter energetischen und ökonomischen Gesichtspunkten, Primärzellen (nicht wiederaufladbar) vor allem für ständige oder zumindest häufige Anwendungen mit hohem Strombedarf recht unattraktiv. Allerdings sind andere Überlegungen manchmal viel wichtiger: der Abstand zum nächsten Netzzugang (zur nächsten Steckdose) verbunden mit einer geringen Leistungsaufnahme eines Gerätes wie einer elektronischen Uhr oder eines Überwachungsgeräts. In diesem Fall ist möglicherweise sogar die Verwendung



**Abb. 1.16** Gravimetrische Leistungs- und Energiedichten potentieller elektrochemischer Speicher- und Wandlerysteme für Netzanwendungen.

wiederaufladbarer Zellen trotz ihrer günstigeren ökonomischen und ökologischen Bilanz wegen ihrer hohen Anfangskosten (Akkumulator und Ladegerät), höherer Selbstentladung eines wiederaufladbaren Systems und Kosten für häufigeren Austausch/häufigeres Aufladen unwirtschaftlich.

Schließlich kann eine realistische Bewertung von Effizienz und damit verknüpft der CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Einordnung von Optionen helfen. Der mitunter grenzenlose Enthusiasmus beim weitverbreiteten Einsatz elektrischer Fahrzeuge paßt nicht immer zur Realität. Auf den ersten Blick ist eine Qualmwolken ausstoßende Diesellokomotive eine schlechte Alternative zu einer elektrischen Lokomotive, die aus einer Oberleitung mit elektrischer Energie versorgt wird. Betrachtet man die Gesamtenergieeffizienz und vergleicht den Brennstoffverbrauch für den Transport einer Ladung mit einer Diesel- und mit einer Elektrolok, die mit elektrischer Energie aus einem thermischen Kraftwerk versorgt wird, die mit Leitungsverlusten die Lokomotive erreicht, wird die Elektrolok plötzlich zu einer schlechteren Option. Die lokale Luftverschmutzung mag bei der Diesellok größer sein, aber die Gesamtenergieeffizienz ist besser. Zudem sind die Investitionskosten wesentlich höher. Sowohl Effizienzen wie auch Emissionen können in einer detaillierten Quelle-zu-Rad-Analyse (well-to-wheel analysis) ermittelt werden; dabei zeigt sich allerdings auch, daß die Argumente komplizierter sind als zunächst vordergründig angenommen. Im Fall der Elektrolok sind diese Umwandlungsschritte sowohl hinsichtlich Effizienz wie auch Emission zu berücksichtigen: Kohle/Gas → Dampfturbine → Generator → Transformator → Oberleitung → Transformator → Elektromotor → Rad. Die

22 | 1 Prozesse und Anwendungen der Energiewandlung und -speicherung

Gesamtenergieeffizienz ergibt sich als das mathematische Produkt der Effizienzen der Einzelschritte. Für die Diesellok ist die Kette kürzer: Dieseldieselkraftstoff → Dieselmotor → Rad. Häufig ist höhere Gesamtenergieeffizienz mit kleinerem Treibstoffverbrauch und damit kleinerer Kohlendioxidemission verbunden. Natürlich ändert sich die Bilanz, wenn elektrische Energie aus erneuerbaren Quellen eingesetzt wird. Schließlich verdienen auch Details wie die berichteten Energieverluste von 10–30 % entlang des Ladekabels beim Aufladen eines elektrischen Fahrzeugs Aufmerksamkeit.

## Weiterführende Literatur

- Dell, R.M. und Rand, D.A.J. (2001). *Understanding Batteries*. Cambridge: Royal Society of Chemistry.
- Eichel, R.A. (Hrsg.) (2019). *Electrochemical Energy Storage*. Cham: Springer.
- Glaize, C. und Geniès, S. (2013). *Lithium Batteries*. Hoboken: Wiley.
- Holze, R. (2019). *Elektrische Energie – Speichern und Wandeln*, Springer essentials. Springer: Heidelberg.
- Huggins, R.A. (2010). *Energy Storage*. New York: Springer.
- Kurzweil, P. und Dietlmeier, O.K. (2015). *Elektrochemische Speicher*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Letcher, T.M. (Hrsg.) (2013). *Future Energy*. Amsterdam: Elsevier Science.
- Moseley, P.T. und Garche, J. (Hrsg.) (2015). *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. Amsterdam: Elsevier.
- Shen, P.K., Wang, C.-Y., Wang, S.P. et al. (Hrsg.) (2016). *Electrochemical Energy*. Boca Raton: Taylor & Francis Group.
- Sternner, M. und Stadler, I. (Hrsg.) (2014). *Energiespeicher – Bedarf, Technologien, Integration*. 2. Aufl. Berlin: Springer Vieweg.
- Watter, H. (2022). *Regenerative Energiesysteme*, 6. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg.