



Norbert Mertzsch

## Speicherung Erneuerbarer Energien – Versuch eines Überblicks

**Vortrag im Plenum am 13. Dezember 2013 zum Thema „Energiespeichertechnologien: Notwendigkeiten, Problemspektren, wissenschaftlich-technische Entwicklungen und Perspektiven“**

---

### Vorbemerkungen

Im Jahr 2012 betrug der Anteil an Erneuerbaren Energien am Bruttostromverbrauch der Bundesrepublik Deutschland 23 % (BDEW 2013). Dieser Anteil soll in den kommenden Jahren kontinuierlich ausgebaut werden und bis zum Jahr 2050 80 % erreichen. Es gibt jedoch auch Szenarien, die für 2050 für den Bruttostromverbrauch bereits 100 % Erneuerbare Energien voraussagen (vgl. Lehmann, Herforth, 2012).

In Deutschland werden vor allem Windkraft und Photovoltaik bei der Stromversorgung mit Erneuerbaren Energien eine Rolle spielen.

Um die Ziele beim Anteil Erneuerbarer Energien für die Stromproduktion zu erreichen, werden aufgrund der durchschnittlich geringen Auslastung von Photovoltaik und Windkraft große Überkapazitäten aufgebaut.

Vor allem die Erzeugung von Strom aus Windkraft und Photovoltaik ist, je nach Wetterlage, sowie Tageszeit und Jahreszeit, großen Schwankungen unterworfen. Dadurch ist die mittelfristige Vorhersagbarkeit und Planbarkeit der Stromproduktion aus diesen Quellen kaum gegeben, weshalb sich der Bedarf an Anlagen zum Ausgleich dieser Schwankungen im Stromnetz deutlich erhöhen wird.

Um einen stabilen Betrieb der Stromnetze zu gewährleisten, müssen sich jedoch Verbrauch und Erzeugung zu jeder Zeit ausgleichen. Bereits beim jetzigen Ausbaustand der Erneuerbaren Energien gestaltet sich das an wind- und/bzw. sonnenreichen Tagen problematisch, da in einem solchen Fall für die Grundlast vorgesehene Kraftwerke gedrosselt bzw. heruntergefahren werden müssen und, wenn das nicht ausreicht, Anlagen der Erneuerbaren Energien vom Netz genommen werden müssen. Dadurch müssen Kraftwerke außerhalb des idealen Betriebspunktes gefahren werden und somit Wirkungsgradverluste hinnehmen, bzw. es werden Kapazitäten der Erneuerbaren Energien nicht genutzt. Abhilfe soll seit 01.01.2012 die Direktvermarktung der Erneuerbaren Energien leisten (vgl. Wikipedia 2013a). Andererseits muss für den Fall, dass Sonnen- und Windenergie nicht für die Stromproduktion genutzt werden können, eine ausreichende Kraftwerkskapazität vorgehalten werden.

Zur Stabilisierung der Stromversorgung werden deshalb in Zukunft Speichertechnologien für Strom eine große Rolle spielen müssen.

Diese Speichertechnologien müssen jedoch nicht zwingend mit der Rückverstromung in Verbindung stehen wenn sich anderweitig sinnvolle Nutzungsmöglichkeiten für den Strom bzw. daraus erzeugter Produkte ergeben.

Auch der Speicherung von Wärme wird in Zukunft eine größere Bedeutung zukommen. Das hängt zum einen mit der Notwendigkeit der Flexibilisierung von Heizkraftwerken bzw. Kraftwärmekopplungsanlagen für den Strommarkt zusammen. Weitere Gründen sind die Nutzung der solaren Wärme – Anfall im Sommer, Nutzung im Winter – und die Notwendigkeit der Nutzung von Abwärmepotentialen industrieller Prozesse, die ebenfalls nicht immer mit dem Wärmebedarf zusammenfallen.

## Speichertechnologien für Energie

Da die Erneuerbaren Energien, insbesondere Elektroenergie aus Photovoltaik und Windenergie sowie Solarthermie, nicht bedarfsgerecht zur Verfügung stehen, ist die Schaffung von Speichermöglichkeiten für Strom und Wärme von entscheidender Bedeutung. Dafür werden die unterschiedlichsten Technologien entwickelt. Einen guten Überblick bieten die Studien „Speicher für die Energiewende“ (vgl. Fraunhofer Umsicht 2013) und „Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit“ (vgl. efzn 2013), die für nachfolgende Ausführungen herangezogen wurden.

### *Elektroenergie*

Für die Speicherung großer Mengen von Elektroenergie sind vorwiegend mechanische und elektrochemische bzw. chemische Speicher vorgesehen.

Zu den mechanischen Speichern von Elektroenergie zählen:

- Schwungräder,
- Druckluftspeicherkraftwerke,
- Pumpspeicherkraftwerke.

Schwungräder sind seit langer Zeit für die Bereitstellung gleichmäßiger und unterbrechungsfreier Drehbewegungen im Einsatz. Anwendungsbeispiele finden sich bei Dampfmaschinen und den ersten Motoren für gasförmige und flüssige Brennstoffe (vgl. Strößenreuther 1996).

Um überschüssige elektrische aber auch kinetische Energie (z.B. in Kraftfahrzeugen) als Rotationsenergie zu speichern, wird ein Schwungrad mit Hilfe eines Elektromotors bzw. direkt in Bewegung gesetzt. Bei Bedarf kann aus der Rotationsenergie über einen Generator wieder elektrische Energie erzeugt werden. Da sich bei Ein- und Ausspeicherung der Energie die Drehzahl des Schwungrads ändert, ist bei Einspeisung in das Stromnetz ein Frequenzumwandler nötig.

Die Erhöhung der Menge der im Schwungrad gespeicherten Energie ist vor allem durch eine Erhöhung der Drehzahl möglich (proportional zum Quadrat der Winkelgeschwindigkeit und nur proportional zum Massenträgheitsmoment). Deshalb werden heute für Schwungräder glasfaserverstärkte bzw. kohlefaserverstärkte Kunststoffe eingesetzt und nicht mehr Metalle. Bei bis zu 100.000 Umdrehungen pro Minute sind Energiedichten von ca. 100 Wh/kg möglich. Um die Ruheverluste möglichst gering zu halten, laufen Schwungräder heute im Vakuum. Trotzdem sind Ruheverluste von 20 % pro Stunde nicht zu unterschreiten. Deshalb sind Schwungradspeicher nur als Kurzzeitspeicher geeignet. Im mobilen Bereich ist der Einsatz zur Nutzung von Bremsenergie von Fahrzeugen vorgesehen (vgl. Günnel 2013).

Als weitere mechanische Speicher werden Druckluftspeicherkraftwerke betrieben, derzeit jedoch nicht als reine mechanische Speicher. Bei einem Überangebot von Strom wird Luft verdichtet und unter Druck in eine unterirdische Kaverne eingespeist. Die freiwerdende Kompressionswärme wird bisher nicht genutzt. Bei Bedarf an elektrischer Energie wird die Druckluft wieder ausgespeichert und zur Energieerzeugung mit Erdgas einer Gasturbine zugeführt um kinetische Energie zur Stromproduktion in einem Generator zu gewinnen. Die Abwärme wird genutzt um eine Vereisung der Turbine zu verhindern.

Bisher werden weltweit nur die Kraftwerke Huntorf in Deutschland und McIntosh in den USA betrieben. Weitere Projekte sind z.B. das Druckluftspeicherkraftwerk Staßfurt und Norton Energy Storage in Ohio (USA) (Wikipedia 2013b).

Als Wirkungsgrad werden für die Anlage Huntorf 42% und für die Anlage McIntosh 54% angegeben. Durch Nutzung der Kompressionswärme könnte ein maximaler Wirkungsgrad von 70 % erreicht werden. Dazu sind effektive Lösungen zur Zwischenspeicherung der Kompressionswärme zu entwickeln.

Die Druckluftspeicher werden üblicherweise in Salzstöcken eingerichtet. Dadurch sind die Standorte für diese Speicher begrenzt.

Der Beginn der Nutzung von Pumpspeicherkraftwerken liegt in den 1920er Jahren. Kennzeichen dieser Kraftwerksart sind ein Ober- und ein Unterbecken, die über Rohrleitung miteinander verbunden sind. Am Unterbecken befindet sich die Energieanlage, bestehend aus Pumpe bzw. getrennter Pumpe und Turbine und dem Motorgenerator. Bei Stromüberschuss wird mit diesem Wasser aus dem Unterbecken in das Oberbecken gepumpt. Bei Strommangel fließt es vom Ober- ins Unterbecken zurück und liefert die gewünschte Leistung.

Die Größe der Speicherkapazität ist grundsätzlich abhängig von der speicherbaren Wassermenge und dem nutzbaren Höhenunterschied zwischen dem Oberbecken und der Turbine. Bei reinen Pumpspeicherkraftwerken ist die Speicherkapazität meist so ausgelegt, dass die Generatoren zumindest 4 bis 8 Stunden unter Vollast Strom produzieren können.

In Deutschland existieren derzeit 33 Anlagen mit einer Leistung von 6,61 GW und einer Speicherkapazität von insgesamt 0,04 TWh. Der Wirkungsgrad für Pumpspeicherkraftwerke beträgt 70 bis 80 %. Für 2050 wird mit einer installierten Pumpenleistung von 8,6 GW gerechnet.

Seit einigen Jahren gibt es Überlegungen ehemalige Bergwerke als Pumpspeicherkraftwerke zu nutzen. Interessant sind dabei die möglichen großen Höhendifferenzen gegenüber oberirdischen Pumpspeicherkraftwerken. Ob sich solche Technologie wirtschaftlich darstellen lassen bleibt abzuwarten.

Als ein Pumpspeicherkraftwerk kann auch der Ringwallspeicher gelten (vgl. Popp 2012). Für einen solchen Ringwallspeicher sind ein Außendurchmesser von 11,4 km und eine Ringwallhöhe von 215 m vorgesehen. In Kombination mit ca. 2.000 großen Windenergieanlagen in der Region, Solarenergieanlagen im Oberbecken und auf Dächern des Versorgungsgebiets, soll ein Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk etwa 2 GW Durchschnittsleistung liefern. Wenn man bedenkt, dass die höchste Erhebung des Landes Brandenburg – der Hagelberg im Fläming – 201 m über NN misst, zeigt das die Dimensionen bei der Speicherung der Erneuerbaren Energien, sicher aber auch die Grenzen der Machbarkeit.

Zu den elektrochemischen bzw. chemischen Speichern von Elektroenergie zählen:

- Batteriespeicher in unterschiedlichen Ausführungen
- Stoffliche Energiespeicher – z.B. Power-to-Gas

Zur elektrochemischen bzw. chemischen Speicherung von Elektroenergie werden vorrangig zwei Wege beschritten. Zum einen ist das die Speicherung von Elektroenergie in Batterien (Akkumulatoren) und zum anderen die Umwandlung von elektrischer Energie in chemische Bindungsenergie von Gasen (Wasserstoff, Methan) bzw. von flüssigen Stoffen (Kohlenwasserstoffe).

Batteriespeicher, oder auch Akkumulatoren, sind elektrochemische Speichersysteme die über einen chemisch/elektrischen bzw. elektrisch/chemischen Wandler geladen bzw. entladen werden. Die chemische Energiespeicherung kann intern oder extern erfolgen.

Der am weitesten verbreitete Batteriespeicher ist auch über 150 Jahre nach der Erfindung durch Sinsteden (Wikipedia 2013c) der Bleiakkumulator.

Blei-Säure-Batterien besitzen eine spezifische Energie von etwa 30 Wh/kg, die spezifische Leistung liegt zwischen 10 und 100 W/kg. Die Zyklenlebensdauer beträgt typischerweise zwischen 300 und 1200 Zyklen und die kalendarische bis zu 15 Jahren je nach Art der Anwendung.

Technologische Weiterentwicklungen ermöglichen Verbesserungen in den Bereichen Ladeakzeptanz, Zyklenlebensdauer und Leistungsdichte. Damit sind Bleiakkumulatoren auch für den Einsatz zur kurzfristigen Leistungsbereitstellung interessant.

Aufgrund der geringen Materialkosten, der inhärenten Sicherheit und des gelösten Recyclings werden Bleiakkumulatoren trotz ihres relativ hohen Gewichts als eine geeignete Option für stationäre Anwendungen gesehen.

Als Hochtemperaturbatterien sind die Natrium-Nickelchlorid-Batterie und die Natrium-Schwefel-Batterie bekannt. Vorteil dieser Batterien ist, dass es nahezu keine Nebenreaktionen gibt und so der Wirkungsgrad entsprechend hoch und die elektrochemische Alterung entsprechend klein ist.

Problematisch ist, dass diese Batterien ständig bei einer Temperatur von etwa 290 bis 390°C gehalten werden müssen (vgl. insea 2013).

Im stationären Bereich eignen sich diese Batterien zur Reduzierung elektrischer Spitzenleistungen, zur unterbrechungsfreien Stromversorgung und zur Notstromversorgung.

Grundsätzlich bieten Hochtemperaturbatterien das Potenzial geringer Kosten und hoher Lebensdauer.

Unter dem Begriff Lithium-Ionen-Akkumulator werden derzeit die unterschiedlichsten Systeme entwickelt (vgl. Wikipedia 2013d). Dazu gehören unter anderem:

- der Lithium-Polymer-Akkumulator,
- der Lithium-Eisenphosphat-Akkumulator,
- der Lithium-Titanat-Akkumulator,
- der Lithium-Feststoff-Akkumulator,
- der Lithium-Luft-Akkumulator.

Für diese Akkumulatoren wird ein großes Entwicklungspotential erwartet. Weitere Systeme sind in der Erforschung. Bekannteste Einsatzgebiete sind derzeit Kommunikationsgeräte und die Elektromobilität.

Derzeit werden spezifische Energien im Bereich von 120 bis 180 Wh/kg erreicht. Für die Zukunft wird erwartet, dass die spezifischen Energien 250 bis 300 Wh/kg erreichen werden.

Redox-Flow-Batterien sind elektrochemische Speicher, bei denen als Stromspeicher zwei getrennte Elektrolyte dienen, in denen Metallsalze gelöst sind, die sich nicht ständig in der Zelle des Akkumulators befinden. Dadurch können Energiemenge und Leistung des Akkumulators unabhängig voneinander dimensioniert werden. Ein Laden der Redox-Flow-Batterien durch Austausch der Elektrolytflüssigkeit ist möglich was besonders für Einsatzmöglichkeiten im Bereich der Mobilität von Interesse sein dürfte.

Die galvanische Zelle der Redox-Flow-Batterie besteht aus zwei Halbzellen, die durch eine Membran getrennt sind. Die Elektroden bestehen meistens aus Graphit. Als Lösungsmittel für die Salze der Redoxpaare werden anorganische oder organische Säuren genutzt. Als Redoxpaare sind Verbindungen aus Vanadium, Brom sowie Titan, Eisen, Chrom, Cer, Zink und Schwefel verwendbar.

Durch die getrennte Lagerung der Elektrolyte ist die Neigung zur Selbstentladung sehr gering.

Redox-Flow-Batterien lassen sich im Leistungsbereich von einigen Kilowatt bis zu mehreren Megawatt dimensionieren. Die Energiedichte ist mit ca. 50 Wh/l allerdings relativ gering.

Problematisch dürfte auch die Verfügbarkeit der Rohstoffe, z.B. Vanadium, sein (vgl. Frauenhofer ISI 2009). Die Grundlagen für Redox-Flow-Zellen stammen aus der Mitte des 20. Jahrhunderts. Die Redox-Flow-Batterie auf Vanadiumbasis wurde 1986 patentiert (vgl. Wikipedia 2013e).

Metall-Luft-Batterien wird, auch wenn bisher kein funktionstüchtiger Akkumulator auf dieser Basis verfügbar ist, wegen der hohen zu erwartenden Energiedichten eine große Perspektive gegeben. Es wird erwartet, dass diese Akkumulatoren kompakt und preiswert sein werden. Als aussichtsreiche Variante wird die Zink-Luft-Batterie gesehen (vgl. Wikipedia 2013f).

Für die stoffliche Speicherung von Elektroenergie sind Verfahren zur Wasserstoffherzeugung und die Umwandlung in gasförmige bzw. flüssige Energieträger angedacht.

Im ersten Schritt wird überschüssige Solar- oder Windenergie durch Elektrolyse von Wasser in Wasserstoff überführt. Dafür werden drei Grundtechnologien weiterentwickelt. Diese sind:

- die alkalische Elektrolyse mit flüssigem basischen Elektrolyten,
- die saure Elektrolyse mit einem polymeren Festelektrolyten,
- die Hochtemperaturelektrolyse mit einem Festoxid als Elektrolyten.

Die beiden erstgenannten Varianten können bei Atmosphärendruck bzw. erhöhtem Druck ausgeführt werden. Der Elektrolysewirkungsgrad liegt bei 75 %.

Im Land Brandenburg stehen Pilotanlagen stehen z.B. in der Nähe von Prenzlau (vgl. Enertrag 2012) und in Falkenhagen bei Pritzwalk (vgl. E.ON 2012).

Der entstehende Wasserstoff kann direkt in das Erdgasnetz eingespeist und dort mit gespeichert werden. Nach geltendem DVGW-Regelwerk G 260 ist eine Einspeisung von maximal 5 Vol.-% Wasserstoff möglich. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass Erdgasanwendungen unterschiedliche Wasserstofftoleranzen zulassen (vgl. DVGW 2013). In diesen Untersuchungen sind bisher Anwendungen von Erdgas für die chemische Industrie (z.B. für Ammoniakanlagen) nicht berücksichtigt. Unter deren Berücksichtigung dürfte, wie verschiedentlich angedacht (vgl. powertogas 2013) eine weitere deutliche Anhebung des Wasserstoffgehaltes problematisch sein.

Eine andere Möglichkeit besteht im Aufbau einer Wasserstoffwirtschaft, bei der Wasserstoff direkt z.B. in Kavernen gespeichert wird und dann bei Bedarf dem Gas eines Gasmotors oder einer Gasturbine zugemischt, als Kraftstoff für Fahrzeuge oder zur direkten Nutzung in der chemischen Industrie bereitgestellt wird.

Ein weiterer Weg ist die Umsetzung von Wasserstoff mit Kohlenstoffdioxid zu gasförmigen bzw. flüssigen Produkten.

Im Falle der Erzeugung von Methan wurde dieser Weg unter dem Konzept „Erneuerbares Methan“ vorgestellt (vgl. Sterner et al. 2010). Die Reaktion ist als Sabatier-Prozess bekannt (vgl. Remy 1960, S. 512). Der Wirkungsgrad der Methanisierung soll bei maximal 80 % liegen. Das Methan kann problemlos dem Erdgas zugemischt werden und im Erdgasnetz bzw. seinen Speichern für die spätere Rückverstromung in GuD- bzw. Gasturbinen-Kraftwerken gespeichert werden. Natürlich ist auch eine stoffliche Nutzung bzw. der Einsatz für die Mobilität möglich.

Der Weg zu flüssigen Produkten läuft über die Fischer-Tropsch-Synthese. Damit lassen sich flüssige Kohlenwasserstoffe hoher Energiedichte erzeugen (vgl. Sunfire 2012). Für diese kann die für Erdölprodukte vorhandene Infrastruktur genutzt werden.

Wird dieser Weg konsequent verfolgt, lässt sich so eine vollständige Kohlenstoffdioxid-Kreislaufwirtschaft entwerfen (vgl. Möller 2011).

Da durch die schwankende Bereitstellung der Energie für die durchzuführenden Prozesse keine kontinuierliche Reaktionsführung möglich sein wird, sind entweder für Wasserstoff oder Kohlenstoffdioxid Zwischenspeicher vorzuhalten. Des Weiteren ist zu erwarten, dass die Anlagentechnik durch den diskontinuierlichen Betrieb stärkeren Belastungen ausgesetzt ist, was sich auf deren Lebensdauer negativ auswirken wird. Bei Anwendung dieser Technologien könnte auf die Schaffung einer zusätzlichen Wasserstoff-Infrastruktur verzichtet werden. Als Quelle für Kohlenstoffdioxid könnten zumindest in einer Übergangszeit kontinuierlich laufende Prozesse mit entsprechendem Kohlenstoffdioxidanfall genutzt werden (z.B. Rohei-

senerzeugung, Zementwerke). Hierzu wäre die Kohlenstoffdioxidabtrennung zu entwickeln. Bei Nutzung von Kohlenstoffdioxid aus Biogasanlagen, die Biogas in Erdgasqualität liefern, wäre dieses Problem bereits gelöst. Mit fortschreitender Umstellung der Wirtschaft müsste das Kohlenstoffdioxid aus der Luft gewonnen werden.

Die Umsetzung dieses Konzeptes wird nur unter Nutzung sehr großer Mengen an Erneuerbarer Energie realisierbar sein. Deshalb ist vor der Umsetzung zu klären, ob diese ausreichend zur Verfügung gestellt werden können.

Als weitere Stromspeicher sind supraleitende magnetische Energiespeicher bekannt, die Energie im Magnetfeld einer stromdurchflossenen Spule speichern. Sie besitzen hohe spezifische Leistungen bei geringer Energiedichte. Wegen derzeit hoher Kosten werden diese Speicher in der nächsten Zeit keine große Bedeutung gewinnen.

Weiterhin sind als Stromspeicher Kondensatoren zu betrachten. Während bei konventionellen Kondensatoren und bei elektrochemischen Doppelschichtkondensatoren vorwiegend elektrostatische Kräfte genutzt werden, erfolgt die Energiespeicherung bei Pseudo- bzw. Hybridkondensatoren mehr auf elektrochemischem Weg. Genutzt werden Kondensatoren vor allem für spezielle Anwendungsgebiete, wie z.B. bei Blitzlichtgeräten und in Fahrzeugen.

### Wärme

Für die Speicherung von Wärme werden

- Speicher in denen Wärme durch Temperaturerhöhung des Speichermediums gespeichert wird (sensible Speicher),
- Speicher in denen Wärme als Schmelzwärme gespeichert wird (latente Speicher),
- Speicher in denen Wärme durch Desorptionsprozesse bzw. chemische Reaktionen gespeichert wird (thermochemische Speicher).

unterschieden.

Die Energiedichte nimmt von den sensiblen über die latenten zu den thermochemischen Speichern zu. Der Entwicklungsstand ist bei den sensiblen Speichern derzeit am höchsten. Ein Überblick über die Wärmespeicherung wird von Peter Schossig und Thomas Haussmann gegeben (Schossig, Haussmann 2011).

Sensible Wärmespeicher verändern bei der Be- und Entladung ihre fühlbare Temperatur. Sie sind die am häufigsten eingesetzten Wärmespeicher. Bei der Beladung wird dem Speichermedium Wärme zugeführt und damit das Speichermedium auf ein höheres Temperaturniveau gebracht. Bei der Entladung wird der Prozess umgekehrt.

Die Kapazität des Speichers hängt von der Masse des Speichermediums und dessen Wärmekapazität ab.

Zwischen Speichermedium und Umgebung besteht eine Temperaturdifferenz. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit einer guten Isolierung des Speichers gegenüber der Umwelt und ein optimales Verhältnis von Oberfläche und Volumen.

Die Be- und Entladung von sensiblen Speichern kann direkt oder über Wärmetauscher erfolgen.

Als Speichermedien können eingesetzt werden:

- Wasser,
- Wärmeträgeröl,
- Salzschnmelze,
- Kies, Sand (auch mit Wasseranteilen),
- Granit,
- Beton,
- Ziegelstein,
- Eisen.

Die am häufigsten eingesetzten sensiblen Speicher sind Warmwasserspeicher im Temperaturbereich bis 100 °C. Als Beispiel für einen ausgeführten Warmwasserspeicher sei hier der Speicher der Stadtwerke Flensburg für 29.300 m<sup>3</sup> heißes Wasser – ein ehemaliger Öltank, der mit einer Wärmeisolierung versehen wurde - angeführt (vgl. Stadtwerke Flensburg 2013).

Es gibt aber auch Druckspeicher für Wasser mit Temperaturen über 100 °C. Als bekanntes Beispiel seien hier die feuerlosen Industrielokomotiven früherer Zeiten genannt (vgl. Wikipedia 2013g). Hier befindet sich Wasser oberhalb der Siedetemperatur im Speicher. Wird Dampf entnommen, siedet Wasser nach, so dass über mehrere Stunden die Versorgung mit Dampf gewährleistet ist.

Für Kies-Wasser-Wärmespeicher werden Gruben ausgehoben, die mit wasserdichter Kunststoffolie ausgekleidet werden. Diese werden mit einem Kies-Wasser-Gemisch gefüllt und nach oben ebenfalls mit Kunststoff abgedichtet. Der Wärmeaustausch kann direkt durch einen Wasseraustausch erfolgen oder indirekt durch eingebaute Rohrschlangen. Der Aufbau solcher Speicher ist günstiger als der Bau von Stahl- oder Betonbehältern. Andererseits ist die Wärmekapazität geringer.

Für höhere Temperaturen gibt es Wärmespeicher, die als Speichermedium Wärmeträgeröle oder Salzschnmelzen einsetzen.

Feststoffspeicher, bei denen sich der Feststoff in einem abgeschlossenen Volumen befindet, werden vorzugsweise für Hochtemperaturanwendungen z.B. in der chemischen Industrie eingesetzt (Vauck, Müller 1978).

Als weiterer sensibler Speicher ist der Erdsondenwärmespeicher zu nennen. Über Sonden, mit einer Tiefe bis maximal 100 m wird Wärme im Erdreich bzw. in Gesteinsschichten gespeichert. Ein- und Ausspeicherung erfolgt über die gleichen Sonden. Dabei ist zu Beachten, dass die Grundwasserströmung im Speichergebiet gering ist, um möglichst geringe Speicherverluste zu haben.

Bei Aquiferwärmespeichern erfolgt die Wärmespeicherung in hydraulisch abgeschlossenen Grundwasserschichten, die mit zwei Bohrungen versehen werden. Während über eine Bohrung Grundwasser entnommen wird, wird dies nach Erwärmung über eine zweite Bohrung wieder in den Aquifer eingespeist. Der Abstand der Bohrungen beträgt 50 bis 300 m, so dass es zu keinen direkten Wechselwirkungen kommen kann. Bei der Errichtung solcher Speicher sind aus hydrologischer, hydrochemischer und mikrobiologischer Sicht hohe Anforderungen zu erfüllen. Die einzuspeichernde Wärmemenge hängt stark von den geologischen Gegebenheiten ab. Aquiferspeicher sind z.B. in Neubrandenburg und unter dem Gebäude des Deutschen Bundestages in Berlin (vgl. Neubrandenburger Stadtwerke 2013, Deutscher Bundestag 2013) ausgeführt.

Bei Latentwärmespeichern wird die Wärmemenge, die bei einem Phasenwechsel des Speichermaterials frei wird genutzt. Zum Einspeichern von Wärme wird diese über einen Wärmeträger einem Phasenwechselmaterial (PCM – phase change materials) mit einer Temperatur über dessen Phasenwechseltemperatur zugeführt. Dabei ändert dieses ohne eine Temperaturänderung den Aggregatzustand z.B. von Fest nach Flüssig. Bei Wärmeentnahme kehrt sich dieser Vorgang um.

Bei Latentwärmespeichern kann Wärmeenergie verlustarm und über viele Zyklen gespeichert werden.

Als Materialklassen für Latentwärmespeicher sind Wasser/Eis, Paraffine, Salzhydrate und deren Mischungen, Zuckeralkohole sowie Salze und deren eutektische Mischungen zu nennen. Ein Ausführungsbeispiel für einen Latentwärmespeicher für den individuellen Wohnbereich basiert auf Natriumacetat-Trihydrat (vgl. Golbs et. al. 2011). Latentwärmespeicher werden auch als mobile Speicher eingesetzt um Abwärme zum Beispiel aus Biogasanlagen für Heizzwecke zu nutzen (vgl. LaTherm Energie AG 2013).

Für die thermochemische Speicherung von Wärme werden reversible chemische Prozesse genutzt. Dabei wird Wärme durch das Abfließen endothermer Reaktionen gespeichert. Die Wärmeabgabe erfolgt dann durch die exotherme Rückreaktion.

Eine wichtige Gruppe von thermochemischen Speichern sind die Sorptionspeicher. Als Speichermedien werden hygroskopische Stoffe mit großer innerer Oberfläche, wie Zeolithe und Silicagel genutzt. Die energetische Beladung des Speichers erfolgt durch Trocknung (Desorption von Wasser) des Speichermaterials bei Wärmezufuhr. Bei Feuchtezufuhr wird durch Sorptionsprozesse Wärme frei, die dann genutzt werden kann.

Die andere Methode der thermochemischen Speicherung ist die Nutzung reversibler Reaktionen. Als Beispiele seien genannt:

- Umsetzung von Calciumoxid mit Wasser zu Calciumhydroxid  
Wärmefreisetzung Regenerieren des Speichers – Rückreaktion unter Wärmezufuhr
- Bildung bzw. Zersetzung von Calciumcarbonaten
- Reduktion von Metalloxiden.

Diese Speicher sind besonders für Hochtemperaturanwendungen geeignet. Schwerpunkt der Entwicklung liegt derzeit beim System Calciumoxid/Calciumhydroxid (vgl. Laing, Wörner 2013). Ein anderes interessantes System könnte das System Natriumhydroxid/Natronlauge sein. Es wurde 1883 in der Honigmannschen Natronlok verwirklicht, kam danach aber in Vergessenheit (vgl. Mähr 2005).

## Bedarf an Speichern und Einsatzgebiete der Speicher

### *Elektroenergie*

Die Frage nach dem Bedarf für Stromspeicher - Kurzzeit- und Langzeitspeicher - und ab wann diese in welchen Größenordnungen zur Verfügung stehen müssen ist umstritten.

Dazu sei kurz auf die derzeitige Definition der unterschiedlichen Speicher eingegangen (vgl. BMWi 2013). Danach sind

- Kurzzeitspeicher – Speicher, die im Laufe des Tages mehrfach elektrische Energie aufnehmen und abgeben (können). Sie haben ein geringes Speichervolumen und einen hohen Zykluswirkungsgrad.
- Langzeitspeicher – Speicher, die über Tage und Wochen elektrische Energie abgeben können, wenn Windenergie und Photovoltaik nicht zur Verfügung stehen.

Nach der Studie von efzn wird bei einem Anteil der Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien von 80 % zusätzlich zu den heutigen Speicherkapazitäten ein Bedarf an Kurzzeitspeichern von etwa 14 GW bzw. 70 GWh (5 Stunden) und an Langzeitspeichern von etwa 18 GW bzw. 7,5 TWh (17 Tage) benötigt. Bei diesem Szenario wird eine Abregelung von 0,4 TWh an Einspeisung von Erneuerbarer Energie pro Jahr angenommen.

Die Kurzzeitspeicher sollen im Stromnetz den Bedarf an Regelenergie abdecken, der für eine stabile Fahrweise des Stromnetzes notwendig ist. Zu den Regelenergien zählen:

- Primärregelenergie (Sekundenreserve)
- Sekundärregelenergie
- Tertiärregelenergie (Minutenreserve)

Die Primärregelenergie hat die Aufgabe Ungleichgewichte zwischen physikalischem Leistungsangebot und –nachfrage auszugleichen. Ziel ist Wiederherstellung einer stabilen Netzfrequenz. Die Primärregelenergie muss innerhalb von 5 Sekunden zur Hälfte und innerhalb von 30 Sekunden komplett bereitgestellt werden. Diese Energie muss 15 Minuten bereitgestellt werden können. Danach müssen die an der Primärregelenergie teilnehmenden Anlagen für weitere Eingriffe bereitstehen. Dieses ist für Speicher nur über Poolbildung möglich. Bisher wurde diese Aufgabe problemlos von laufenden Kraftwerken mit übernommen. Im Zuge der Energiewende werden dazu auch Speicher herangezogen werden. Geeignet für diese Auf-



gabe dürften vor allem Schwungräder, Kondensatoren, magnetische Speicher und Batteriespeicher sein. Als Beispiel dafür kann das vom BMU geförderte Batteriekraftwerk der Wemag AG zur Bereitstellung von Primärregelenergie auf Basis von Lithiumakkumulatoren angeführt werden (vgl. BMU 2013).

Die Sekundärregelenergie wird wie die Primärregelenergie automatisch gestartet. Sie soll nach 15 Minuten die Primärregelenergie ersetzen. Ziel ist die Herstellung des Gleichgewichts zwischen Stromangebot und -nachfrage. Die gesamte Sekundärregelleistung muss innerhalb von 5 Minuten erbracht werden können und über 60 Minuten gehalten werden. Als Anlagen, die die Sekundärreserve sicherstellen, können Batteriespeicher, Pumpspeicherkraftwerke und GuD- bzw. Gasturbinenkraftwerke eingesetzt werden. Problematisch ist allerdings, dass die letzten drei Kraftwerksarten beim Handel an der Strombörse aufgrund ihrer Kostenstruktur immer weniger nachgefragt werden und damit die Anlagenbetreiber über deren Abschaltung nachdenken (vgl. DNN-Online 2012, Mayer et.al. 2013). Da diese Anlagen aber für das Gelingen der Energiewende unabdingbar sind, muss an dieser Stelle Marktversagen festgestellt werden. Damit ist die Politik gefragt.

Als nächste Stufe bei Stabilisierung der Stromnetze wird die Tertiärregelenergie (Minutenreserve) aktiviert. Diese wird manuell aktiviert und muss innerhalb von 15 Minuten vollständig erbracht werden können. Zum Einsatz kommen dafür bisher konventionelle Kraftwerke. Diese Aufgabe könnten auch Blockheizkraftwerke übernehmen, die mit Biomethan betrieben werden, welches im Erdgasnetz zwischengespeichert wird.

Um ein Überangebot an Strom abfangen zu können wird auch negative Regelenergie eingesetzt. Als Beispiel dafür kann die Technologie „Power-to-Heat“ angeführt werden. Dabei werden bei einem Überangebot von Strom im Netz Solaranlagen bzw. Windkraftwerke nicht vom Netz genommen, sondern der Strom in Wärme überführt, wobei sich der Einsatz anderer Energieträger für die Wärmeerzeugung verringert. Diese Technologie stößt vielfach auf Kritik, da hochwertige Energie in Niedertemperaturwärme mit sehr geringem Exergiegehalt umgewandelt wird. Da bisher keine Stromspeicher in Größenordnungen zur Verfügung stehen, macht die Technologie aus ökonomischer Sicht aber durchaus Sinn (vgl. Groscurth, Bode 2013). Dabei gibt es die Optionen des Einsatzes einer elektrischen Wärmepumpe, die auch Umgebungswärme nutzen kann, oder der Einsatz eines gewöhnlicher Heizstabes bzw. eines Elektrodenkessels.

Für die Langzeitspeicherung von elektrischem Strom wird derzeit nur die chemische Speicherung als Wasserstoff bzw. Methan gesehen. Das bestehende Erdgasnetz mit seinen Gas speichern wird dafür als ausreichend angesehen. Dabei ist zu beachten, dass das mögliche Speicherpotentials im Untergrund erst im Verbundprojekt ANGUS+ erforscht wird (vgl. ANGUS+ 2013) Derzeit ist die Wirtschaftlichkeit der Technologie „Power-to-Gas“ nicht gegeben (vgl. powertogas 2012). Neben einer Rückverstromung des Gases ist auch der Einsatz im Verkehrsbereich möglich.

Wegen der problematischen Wirtschaftlichkeit von „Power-to-Gas“ wird von verschiedenen Autoren (vgl. Groscurth, Bode 2013, Kleimaier 2013) für die nächsten Jahrzehnte, d.h. bis zu einer Stromerzeugung mit Erneuerbaren Energien von 80 %, ökonomisch und ökologisch der Technologie „Power-to-Heat“ der Vorzug gegeben.

Weiterhin wird die Möglichkeit der Speicherung von Elektroenergie in Autobatterien diskutiert. Die Machbarkeit wird derzeit in Forschungsprojekten untersucht (vgl. CEBra 2012).

Bei Betrachtungen zur notwendigen Speichergröße für Strom ist vor einem möglichen späteren Übergang zu einer vollständigen Versorgung mit Strom aus Erneuerbaren Energien auch die Möglichkeit der Versorgung mit Elektroenergie bei einem „Jahr ohne Sommer“ durch Vulkanaktivitäten zu diskutieren (vgl. Mertzsch 2011, Krassmann 2011).

### Wärmeenergie

Die Frage nach dem Bedarf für Speicher – Kurzzeit- und Langzeitspeicher – ist deutlich komplizierter zu beantworten, da die Wärmeversorgung deutlich individueller erfolgt als die Stromversorgung.

Kurzzeitwärmespeicher werden üblicherweise nur eingesetzt um die Fahrweise der Wärmeversorgungsanlage zu optimieren und Verbrauchsspitzen auszugleichen. Dazu sind besonders sensible Speicher - meist Wasserspeicher - geeignet, wobei Wärme dort bei Temperaturen bis dicht unter 100 °C bzw. in Druckspeichern bevorratet wird.

Alle anderen Wärmespeicher können auch als Langzeitspeicher genutzt werden. Das ist insbesondere bei Nutzung von Solarthermie zur Wärmeversorgung von Bedeutung, da hier Dargebot und Bedarf über Monate auseinanderklaffen.

Chemische Hochtemperaturspeicher könnten hingegen vor allem in der Industrie zur Abwärmenutzung beitragen.

### Fazit

Als Fazit bleibt, dass auf dem Gebiet der Speicherung der Erneuerbaren Energien noch sehr viele Probleme zu lösen sind. Ob dabei die heute angedachten technischen Lösungen Bestand haben werden oder ob es zu völlig anderen Lösungen kommen muss, bleibt offen. Die technischen Herausforderungen werden auf jeden Fall größer sein als vielfach dargestellt (vgl. Lehmann/Herforth 2012). Neben den technischen Herausforderungen stehen große soziale Probleme. Denn der Bau und der Betrieb von Speichern für Erneuerbaren Energien ist mit hohen Kosten verbunden, die der Bürger zu tragen hat.

Dass die Belastung der Bürger z.B. bei den Heizkosten Grenzen gesetzt werden müssen wurde in einer Studie des Leipziger Institut für Energie GmbH im Auftrag des Ministeriums für Landwirtschaft und Umwelt des Landes Sachsen-Anhalt deutlich, in der die wirtschaftlichen, klimaschutzrelevanten und sozialen Auswirkungen einer Übertragung der Verpflichtungen aus dem EEWärmeG auf den Bestand bereits errichteter Gebäude in Sachsen-Anhalt gemacht werden (vgl. IE Leipzig 2013). So stellt die Studie fest, dass Beamte, Angestellte, Selbstständige und Arbeiter im Allgemeinen die zusätzlichen Vollkosten des EEWärmeG tragen könnten, wobei sich jedoch deren monatliche Sparquote zum Teil deutlich verringern. Arbeitslose und Nicht-Erwerbstätige (u.a. Rentner) könnten hingegen nur durch die Einschränkung ihrer Konsumausgaben die zusätzlichen Vollkosten finanzieren. Deshalb kam man in diese Studie zu der Feststellung die Verpflichtungen aus dem EEWärmeG nicht auf den Bestand bereits errichteter Gebäude zu übertragen.

### Literatur

ANGUS+ (2013): URL: <http://forschung-energiespeicher.info/aktuelles/aktuelles-einzelansicht/aktuelles-detailansicht/203/aktuelles-uebersicht/2/aktuelles-aktion/show/aktuelles-controller/Act/>

BDEW (2013): URL: <http://www.bdew.de/internet.nsf/id/97KC8N-stromerzeugung-aus-erneuerbaren-energien-de?open&ccm=500010045>

BMU (2013): URL: [http://www.bmu.de/bmu/presse-reden/pressemitteilungen/pm/artikel/bundesumweltministerium-foerdert-batteriekraftwerk/?tx\\_ttnews\[backPid\]=112](http://www.bmu.de/bmu/presse-reden/pressemitteilungen/pm/artikel/bundesumweltministerium-foerdert-batteriekraftwerk/?tx_ttnews[backPid]=112)

BMWi (2013): URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/E/energiewende-06,property=pdf,bereich=bmwi,sprache=de,rwb=true.pdf>

CEBra (2012): CE Bra – Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Centrum für Energietechnologie Brandenburg: e-SolCar. – URL: <http://www.tu-cottbus.de/einrichtungen/de/cebra/forschung/e-solcar.html>

- Deutscher Bundestag (2013): URL:  
<http://www.bundestag.de/kulturundgeschichte/architektur/energie/>
- DNN-Online (2012): URL: <http://www.dnn-online.de/radebeul/web/regional/wirtschaft/detail/-/specific/Oekostrom-macht-Pumpspeicherwerk-Niederwartha-zu-teuer-1685252560>
- DVGW 2013: Müller-Syring, Gert; Henel, Marco; Köppel, Wolfgang; Mlaker, Herwig; Sterner, Michael; Höcher, Thomas: Studie Entwicklung von modularen Konzepten zur Erzeugung, Speicherung und Einspeisung von Wasserstoff und Methan ins Erdgasnetz. Hrsg.: DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V. – URL: [http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g1\\_07\\_10.pdf](http://www.dvgw-innovation.de/fileadmin/dvgw/angebote/forschung/innovation/pdf/g1_07_10.pdf)
- E.ON 2012: E.ON baut Power to Gas-Pilotanlage in Falkenhagen; 21.08.2012 – URL: <http://www.eon.com/de/presse/news/pressemitteilungen/2012/8/21/e-on-baut-power-to-gas-pilotanlage-in-falkenhagen.html>
- efzn 2013: Studie Eignung von Speichertechnologien zum Erhalt der Systemsicherheit, FA 43/12, Abschlussbericht: Energie-Forschungszentrum Niedersachsen, Goslar 08.März 2013 – URL: <http://www.bmwi.de/BMWi/Redaktion/PDF/Publikationen/Studien/eignung-von-speichertechnologien-zum-erhalt-der-systemsicherheit,property=pdf,bereich=bmwi2012,sprache=de,rwb=true.pdf>
- Enertrag (2012): Das Hybridkraftwerk. – URL: <https://www.enertrag.com/projektentwicklung/hybridkraftwerk.html>
- Fraunhofer ISI (2009): Angerer, G.; Marscheider-Weidemann, F.; Lüllmann, A.; Erdmann, L.; Scharp, M.; Handke, V.; Marwede, M.: Rohstoffe für Zukunftstechnologien. Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI. Karlsruhe. – URL: <http://publica.fraunhofer.de/eprints/urn:nbn:de:0011-n-910079.pdf>
- Fraunhofer Umsicht 2013a: Rundel, Paul; Meyer, Benedikt; Meiller, Martin; Meyer, Inge; Daschner, Robert; Jakuttis; Franke, Matthias; Binder, Samir; Hornung, Andreas (2013): Speicher für die Energiewende. Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Institutsteil Sulzbach-Rosenberg.
- Golbs et. al. (2011): Golbs, A.; Weber, S.; Werner, P.: Innovative Speichertechnologie als Grundlage einer Neugestaltung der Energieversorgung im individuellen Wohnbereich. In: LIFIS ONLINE (31.05.11). – URL: [www.leibniz-institut.de/archiv/golbs\\_31\\_05\\_11](http://www.leibniz-institut.de/archiv/golbs_31_05_11)
- Groscurth, Bode (2013): Groscurth, Helmuth-M.; Bode, Sven. Arrhenius Institut für Energie- und Klimapolitik Hamburg: Discussion Paper Nr. 9 “Power-t-heat” oder “Power-to-gas”? – URL: [http://www.arrhenius.de/uploads/media/arrhenius\\_DP\\_9\\_-\\_Power-to-heat.pdf](http://www.arrhenius.de/uploads/media/arrhenius_DP_9_-_Power-to-heat.pdf) - Stand 02.07.2013
- Günnel 2013: Günnel, Thomas: Volvo testet erfolgreich Schwungradspeicher: AUTOMOBIL INDUSTRIE 29.04.2013- URL: <http://www.automobil-industrie.vogel.de/antrieb/articles/403374/>
- IE Leipzig (2013): Auswirkungen einer Übertragung des EEWärmeG auf den Bestand. Leipziger Institut für Energie GmbH. – URL: [http://www.energie-experten.org/uploads/media/Auswirkungen\\_des\\_EEW%C3%A4rmeG\\_in\\_Sachsen-Anhalt.pdf](http://www.energie-experten.org/uploads/media/Auswirkungen_des_EEW%C3%A4rmeG_in_Sachsen-Anhalt.pdf)
- insea 2013: URL: [http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy\\_storage\\_systems\\_technology\\_high\\_temperature\\_batteries/](http://www.isea.rwth-aachen.de/de/energy_storage_systems_technology_high_temperature_batteries/)

- Kleimaier (2013): Kleimaier, Martin: Strom nutzen statt speichern. - URL: <http://www.energy20.net/pi/index.php?StoryID=317&articleID=223588>
- Krassmann (2011): Krassmann, Thomas. Vulkanemissionen – unterschätzte Gefahr für die deutsche Energieversorgung. URL: [www.mineral-exploration.de/mepub/vulkanemissionen.pdf](http://www.mineral-exploration.de/mepub/vulkanemissionen.pdf)
- Laing, Wörner (2013): Laing,Doerte; Wörner, Antje: Wärme speichern mit Salz und Kalk – Faszination der Hochtemperatur-Speicherung. Vortrag Berliner Energietage 2013 am 16.05.2013 – URL: [http://www.berliner-energieta-ge.de/fileadmin/user\\_upload/2013/Tagungsmaterial/BET2013\\_105\\_BMWi\\_05\\_Laing\\_Woerner\\_Hochtemperaturspeicherung.pdf](http://www.berliner-energieta-ge.de/fileadmin/user_upload/2013/Tagungsmaterial/BET2013_105_BMWi_05_Laing_Woerner_Hochtemperaturspeicherung.pdf)
- LaTherm Energie AG (2013): URL: <http://latherm.de/index.php?id=home&L=1%27>
- Lehmann, H.; Herforth, Chr. (2012): 2050: In Deutschland Strom zu 100 % aus erneuerbaren Energien. In: LIFIS ONLINE (11.01.12). – URL: [www.leibniz-institut.de/archiv/lehmann\\_11\\_01\\_12](http://www.leibniz-institut.de/archiv/lehmann_11_01_12)
- Mähr (2005): Mähr, Christian. Vergessene Erfindungen Warum fährt die Natronlok nicht mehr?. Verlagsgruppe Weltbild GmbH 2005, S. 26-46
- Mayer et.al. (2013): Mayer,Johannes N.; Kreifels, Niklas; Burger, Bruno: Kohleverstromung zu Zeiten niedriger Börsenstrompreise. Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme – URL: <http://www.ise.fraunhofer.de/de/downloads/pdf-files/aktuelles/kohleverstromung-zu-zeiten-niedriger-boersenstrompreise.pdf>
- Mertzsch, N. (2011): Ambivalenzen erneuerbarer Energien. In: Banse, G.; Reher, E.-O. (Hg.): Ambivalenzen von Technologien – Chancen, Gefahren, Missbrauch. Berlin, S. 143-152 (Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät, Bd. 112)
- Möller, D. (2011): Das SONNE-Konzept: Die Kohlendioxid-Wirtschaft. In: LIFIS ONLINE (15.08.11). – URL: [www.leibniz-institut.de/archiv/moeller\\_15\\_08\\_11](http://www.leibniz-institut.de/archiv/moeller_15_08_11)
- Neubrandenburger Stadtwerke (2013): Wärmespeicherung im Aquifer. – URL: <http://www.neu-sw.de/images/downloads/fernwaerme/20130508-waermespeicherung-im-aquifer.pdf>
- Popp, M. (2012): Ringwallspeicher-Hybridkraftwerk. – URL: <http://www.poppware.de/Ringwallspeicher/index.htm>
- powertogas (2012): Thesenpapier: Wirtschaftlichkeitsaspekte im Hinblick auf die Nutzung der Systemlösung Power to Gas. \_ URL: [http://www.powertogas.info/fileadmin/user\\_upload/downloads/Positionen\\_Thesen/120607\\_Thesenpapier\\_Wirtschaftlichkeit.pdf](http://www.powertogas.info/fileadmin/user_upload/downloads/Positionen_Thesen/120607_Thesenpapier_Wirtschaftlichkeit.pdf)
- powertogas (2013): URL: <http://www.powertogas.info/power-to-gas/gas-speichern/wasserstoff-im-erdgasnetz.html>
- Remy (1960): Lehrbuch der Anorganischen Chemie. Remy, H. (Hg.). Leipzig, Bd. 1, S. 512
- Schossig, Haussmann (2011): Schossig, Peter; Haussmann, Thomas: Wärme und Kältespeicherung – Stand der Technik und Ausblicke. In: LIFIS ONLINE [11.04.11]. – URL: [www.leibniz-institut.de/archiv/schossig\\_11\\_04\\_11](http://www.leibniz-institut.de/archiv/schossig_11_04_11)
- Stadtwerke Flensburg (2013): Stadtwerke Flensburg GmbH: Kraft-Wärme-Kopplung. – URL: <http://www.stadtwerke-flensburg.de/home/unternehmen/umwelt-und-technik/technik/kraft-waerme-kopplung.html>

Sterner, M.; Saint-Drenan, Y.-M.; Gerhardt, N.; Specht, M.; Stürmer, B.; Zuberbühler, U. (2010): Erneuerbares Methan. Ein innovatives Konzept zur Speicherung und Integration Erneuerbarer Energien sowie zur regenerativen Vollversorgung. In: LIFIS ONLINE [09.07.2010]. – URL: [http://www.leibniz-institut.de/archiv/sterner\\_09\\_07\\_10.pdf](http://www.leibniz-institut.de/archiv/sterner_09_07_10.pdf)

Strößenreuther (1996): Strößenreuther, Florian: Machbarkeitsstudie und Konzept einer stationären Schwungradanlage zur dezentralen, verbraucherorientierten Energiespeicherung. Diplomarbeit Fakultät für Maschinenwesen Institut für Dampf- und Gasturbinen der RWTH Aachen. – URL: [http://www.familie-stroessenreuther.de/daten/Diplomarbeit\\_Schwungradspeicher\\_FStroess\\_1996.pdf](http://www.familie-stroessenreuther.de/daten/Diplomarbeit_Schwungradspeicher_FStroess_1996.pdf)

Sunfire (2012): – URL: <http://www.sunfire.de/>

Vauck, Müller (1978): Vauck, Wilhelm R. A.; Müller, Herrmann A.: Grundoperationen chemischer Verfahrenstechnik. VEB DEUTSCHER VERLAG FÜR GRUNDSTOFFINDUSTRIE LEIPZIG 1978, S. 427

Wikipedia (2013a): URL: [https://de.wikipedia.org/wiki/Direktvermarktung\\_erneuerbarer\\_Energien](https://de.wikipedia.org/wiki/Direktvermarktung_erneuerbarer_Energien)

Wikipedia (2013b): URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Druckluftspeicherkraftwerk>

Wikipedia (2013c): URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator>

Wikipedia (2013d): URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Lithium-Ionen-Akkumulator>

Wikipedia (2013e): URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Redox-Flow-Zelle>

Wikipedia (2013f): URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Zink-Luft-Batterie>

Wikipedia (2013g): URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Dampfspeicherlokomotive>

Adresse des Verfassers: [mertzsch@t-online.de](mailto:mertzsch@t-online.de)