

AVES Pfannenstil

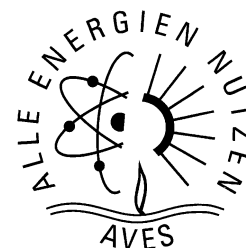
Aktion für vernünftige Energiepolitik Schweiz (AVES)

Regionalgruppe Pfannenstil

c/o Dr. Hans R. Moning AG, Gotthardstrasse 10, 8800 Thalwil

Postkonto 80-10120-3

www.aves-zh.ch



BULLETIN Nr. 68

April 2013

Liebe Leserin, lieber Leser

Mit der Energiewende wird der Anteil unregelmässig anfallender Wind- und Sonnenenergie an der Elektrizitätsversorgung zunehmen. Der Stromkonsument in einer modernen Industriegesellschaft erwartet, dass Strom jederzeit ausreichend verfügbar ist – zu jeder Tages- und Nachtzeit und unter allen meteorologischen Bedingungen. Die permanente Anpassung der Stromproduktion an den Bedarf war schon immer eine anspruchsvolle Planungsaufgabe. Wenn ein grosser Anteil der Produktion jedoch nicht mehr planbar ist, wird diese Aufgabe zum Problem. Ideal wäre, wenn man die mit Sonnen- und Windenergie zeitweise produzierte Überschusselektrizität leicht in grossem Umfang speichern könnte, um bei Bedarf unverzüglich darauf zugreifen zu können. Dieser Vorgang sollte zudem möglichst verlustarm und wirtschaftlich sein. Leider ist das Speichern von elektrischer Energie im grossen Massstab eine äusserst anspruchsvolle Herausforderung. Mit welchen Ansätzen diese Aufgabe bereits angegangen wurde und in welche Richtung die neueren Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen weisen, zeigt Arthur Ruh im vorliegenden Bulletin in fundierter und umfassender Art und Weise auf.

Für die nach heutigem Erkenntnisstand wohl vorteilhafteste Option zur Speicherung elektrischer Energie in grossem Ausmass ist unser Land ausgezeichnet positioniert – die gebirgige Topographie der Schweiz bietet ideale Voraussetzungen für Pumpspeicherkraftwerke.

Einmal mehr müssen wir feststellen, dass es keine einfachen Patentlösungen für eine sichere und wirtschaftliche Energieversorgung nach der Energiewende gibt. Energiepolitische Weichenstellungen sind schneller beschlossen als realisiert. In diesem Sinne wünschen wir Ihnen eine anregende Lektüre.

AVES Regionalgruppe Pfannenstil

Hans R. Moning

Inhalt

Energiespeicherung

Seite 2

Energiespeicherung

Dr. Arthur Ruh, dipl. Physiker ETH

Die Notwendigkeit der Speicherung elektrischer Energie

In einem Stromnetz muss zu jedem Zeitpunkt die momentane Stromproduktion gleich dem momentanen Strombedarf sein. In Bulletin Nr. 65 wurde das Prinzip der Netzregelung kurz erklärt. Für die Sicherstellung der Stromversorgung bei schnellen und grossen Lastschwankungen sind vor allem Speicherkraftwerke geeignet, da deren Leistung sehr schnell hochgefahren werden kann. Pumpspeicherkraftwerke bieten bei Leistungsüberschüssen im Netz zusätzlich die Möglichkeit, Wasser in das Oberbecken zu pumpen und so die überschüssige Energie zu speichern. Schon in einem Stromnetz, das hauptsächlich durch Wasser- und Kernkraftwerke versorgt wird, ist die Netzregelung eine anspruchsvolle Aufgabe. Wenn nun der Anteil der Photovoltaikanlagen und Windkraftwerke an der Stromversorgung immer grösser wird, müssen nicht nur die durch die Verbraucher verursachten Lastschwankungen aufgefangen werden, sondern auch das stark fluktuierende Leistungsangebot der PV- und Windkraftwerke ausgeglichen werden. Während bei den konventionellen Kraftwerken ein Ausgleichbedarf für die Lastschwankungen während nur relativ kurzen Zeiten besteht, erfordern PV- und Windkraftwerke unter Umständen einen Ausgleich der Produktionsschwankungen während Tagen oder gar Wochen.

Wie stark die Produktion elektrischer Energie durch PV- oder Windanlagen schwanken kann, zeigt sich am Beispiel der totalen PV-Leistung in Deutschland. Am 1. Januar 2011 lieferten alle PV-Anlagen Deutschlands mit einer totalen installierten Nennleistung von 17.3 GW¹ eine elektrische Energie von 3 GWh². Alle Anlagen zusammen mit einer Nennleistung, die der Leistung von 17 Kernkraftwerken entspricht, lieferten also an diesem Tag in 24 Stunden gerade so viel Energie, wie ein einziges KKW in 3 Stunden liefern würde. An einem der ertragreichsten Tage, am 25. Mai 2012, produzierten die inzwischen auf eine Nennleistung von 27 GW angewachsenen PV-Anlagen eine elektrische Energie von 179 GWh. Dagegen hätten 27 KKW mit der entsprechenden installierten Leistung in einem Tag 648 GWh geliefert. Das Beispiel zeigt, dass trotz der Mittelung der lokal unterschiedlichen Einstrahlung über ganz Deutschland die gesamte PV-Energieproduktion sehr stark schwanken kann. Ferner zeigt sich, wie irreführend die Angabe der Nennleistung von PV-Anlagen sein kann.

Je grösser also der Anteil an erneuerbaren Energien bei der Stromproduktion wird, umso wichtiger ist die Speicherung elektrischer Energie.

Verschiedene Arten der Speicherung elektrischer Energie

Das Prinzip, mechanische Energie zu speichern, ist seit erstaunlich langer Zeit bekannt. Bereits gegen Ende der Altsteinzeit, etwa um 12'000 v. Chr., wurden Bogen als Jagdwaffe verwendet. Die beim Spannen des Bogens geleistete Arbeit ist als potentielle Energie in der Deformation des elastischen Stabes gespeichert. Diese wird beim Schuss (zum Teil) in kinetische Energie des Pfeils umgewandelt.

Spätestens seit 1'100 v. Chr. wurden Töpferscheiben verwendet, die so massiv waren, dass sie als Schwungräder wirkten. Ein Schwungrad dient zum Speichern kinetischer Energie.

Die potentielle Energie der Lage im Schwerfeld der Erde wurde bei den ersten Räderuhren (um etwa 1300) ausgenützt. Diese Uhren waren Gewichtsuhren. Bei solchen Uhren wird ein an

¹ Installierte Nennleistung am 1 Januar 2011.

² Zu den Einheiten siehe z.B. Anhang in Bulletin Nr. 65.

einem Seil oder einer Kette hängendes Gewichtsstück hochgezogen. Die dabei geleistete Arbeit wird als potentielle Energie gespeichert, und beim Herabsinken des Gewichtsstücks treibt dieses das Räderwerk der Uhr an. Um etwa 1450 wurde der Federantrieb erfunden. Bei einer Federuhr wird die beim Aufziehen geleistete Arbeit in der potentiellen Energie der gespannten Spiralfeder gespeichert.

Zur Speicherung elektrischer Energie kam es erst im 18. Jahrhundert, als die Phänomene der Elektrizität systematisch erforscht wurden. 1745 wurde der erste Kondensator, die „Leidener Flasche“, angefertigt, und 1859 wurde der Akkumulator erfunden.

Die Speicherung elektrischer Energie wird oft als *Stromspeicherung* bezeichnet, obwohl Strom streng genommen nicht gespeichert werden kann. Elektrische Energie kann nur in relativ kleinen Mengen direkt gespeichert werden, einerseits in Kondensatoren und andererseits in (supraleitenden) Spulen. Wenn elektrische Energie in grösseren Mengen gespeichert werden soll, muss sie in andere Energieformen umgewandelt werden. Bei der Ausnutzung der gespeicherten Energie muss diese dann wieder in elektrische Energie zurückverwandelt werden.

Im Folgenden werden nur elektrische Energiespeicher betrachtet, d.h. Speichersysteme, bei denen entweder elektrische Energie direkt gespeichert oder in eine andere Energieform umgewandelt, in dieser gespeichert und dann zurück in elektrische Energie umgeformt wird.

Elektrische Energie	Mechanische Energie		Chemische Energie	Thermische Energie
	Potentielle Energie	Kinetische Energie		
Kondensatoren	Pumpspeicherwerke	Schwungräder	Akkumulatoren	Wärmespeicher
Supraleitende Spulen	Hubspeicher		Redox-Flow-Batterien	
	Druckluftspeicher		Wasserstoff	
	Flüssiger Stickstoff		Methan	

Elektrische Energiespeicher

Elektrische Energiespeicher sind nicht nur für die Regelung und Stabilisierung elektrischer Stromnetze von grosser Bedeutung, sondern spielen auch für mobile elektrische Geräte und für Elektrofahrzeuge eine wesentliche Rolle.

1. Elektrische Energie

1.1 Kondensatoren

Kondensatoren können nur relativ wenig Energie speichern, aber sie können diese in sehr kurzer Zeit aufnehmen und abgeben. Als Energiespeicher werden sie daher vor allem dort eingesetzt, wo während kurzer Zeit sehr hohe Leistungen abgegeben werden müssen, so z.B. in Blitzlichtgeräten, in Hochspannungs-Kondensatorzündungen von Verbrennungsmotoren, in elektrischen Zündern (exploding bridgewire detonator) und in Stossspannungsgeneratoren. Als Energiespeicher dienen auch die Glättungskondensatoren in Gleichspannungsnetzteilen und die Stützkondensatoren in elektronischen Schaltungen.

Die ab den 1970er Jahren auf den Markt gekommenen und seither ständig verbesserten Superkondensatoren (supercaps) oder Doppelschichtkondensatoren haben eine bis zu 10'000 mal grössere Energiedichte als die gewöhnlichen Elektrolytkondensatoren. Ihr Speichervermögen ist jedoch immer noch zehnmal kleiner als das eines Akkumulators von gleichem Gewicht. Es

gibt Typen von Superkondensatoren mit Kapazitätswerten bis zu 12'000 Farad³ und einer Betriebsspannung von 1.2 Volt. Andere Typen erreichen Werte von 6'500 F und 2.7 V. Ein solcher Kondensator kann immerhin eine Leistung von 2 kW während über 10 Sekunden abgeben. Dank dieser relativ grossen Speicherkapazität können Superkondensatoren in der industriellen Leistungselektronik eingesetzt werden. Sie werden bereits für unterbrechungsfreie Stromversorgungen, für elektrische Stellantriebe, für den Antrieb kleiner Elektrofahrzeuge wie Gabelstapler und zur Rekuperation der Bremsenergie von Fahrzeugen verwendet. Die Technik der Superkondensatoren ist in schneller Entwicklung begriffen, und ständig zeigen sich neue Anwendungsbereiche.

Gegenüber Akkumulatoren haben Superkondensatoren eine Reihe von Vorteilen: Höhere Leistungsdichte, höhere Spitzenströme, geringere Erwärmung, höhere Lebensdauer, höhere Ladungs-/Entladungszahlen, besserer Wirkungsgrad und grösserer Temperaturbereich. Eine vollständige Entladung des Kondensators ist unkritisch. Kondensatoren sind zudem wartungsfrei und enthalten keine Schwermetalle.

Sie haben jedoch im Vergleich zu den Akkumulatoren folgende Nachteile:

Geringere Energiedichte, wesentlich höherer Preis. Während der Entladung nimmt die Spannung linear ab (während sie beim Akkumulator nahezu konstant bleibt). Dies erfordert eine aufwendige Elektronik zur Aufrechterhaltung der Spannung am Verbraucher während des Entladevorgangs.

1.2 Supraleitende Spulen

Während in einem Kondensator die Energie im elektrischen Feld zwischen den beiden Elektroden gespeichert wird, ist bei einer Spule die Energie im Magnetfeld gespeichert. Weil in einer normalleitenden Spule die gespeicherte Energie in kürzester Zeit durch die Verluste im ohmschen Widerstand der Spule aufgezehrt würde, muss die Spule supraleitend sein. Da dies aber eine ständige energieintensive Kühlung erfordert, wird der an sich hohe Wirkungsgrad eines supraleitenden magnetischen Energiespeichers (SMES) dadurch stark reduziert. SMES haben den Vorteil, dass die gespeicherte Energie praktisch verzögerungsfrei verfügbar ist. Wegen der relativ hohen Kosten wurden sie jedoch bisher nicht breit eingesetzt.

2. Mechanische Energie

2.1 Pumpspeicherkraftwerke

Pumpspeicherkraftwerke, oder kurz Pumpspeicherwerke, sind die ältesten und immer noch wichtigsten Speicher elektrischer Energie. Wenn die Flusskraftwerke und die Kernkraftwerke mehr Strom produzieren, als aktuell gebraucht wird, wird mit Hilfe des überschüssigen Stroms Wasser von einem tiefer gelegenen Wasserbecken (Unterbecken) in ein höher gelegenes Wasserbecken (Oberbecken) gepumpt. In den Spitzenzeiten des Stromverbrauchs wird dann (genau gleich wie bei einem gewöhnlichen Speicherkraftwerk) das Wasser vom Oberbecken über eine Druckleitung auf eine Turbine geleitet, die einen Generator antreibt. In der Regel ist der Generator ein Motorgenerator, d.h. die gleiche Maschine arbeitet während der Stromproduktion als Generator und im Pumpbetrieb als Motor. Manche Kraftwerke arbeiten mit Pumpturbinen, d.h. die gleiche Maschine arbeitet sowohl als Pumpe als auch als Turbine.

Pumpspeicherkraftwerke können wie Speicherkraftwerke sehr schnell auf Schwankungen im Strombedarf reagieren. Sie können wie Speicherkraftwerke Lastspitzen abdecken, aber sie können zudem ein Stromüberangebot (z.B. bei starkem Wind oder intensiver Sonneneinstrahlung während geringem Stromverbrauch) nutzbringend verwerten, wenn sonst die betreffenden Anlagen heruntergeregelt werden müssten.

Im Gegensatz zu Kondensatoren, Spulen und Schwungrädern, die elektrische Energie nur während Sekunden bis Minuten abgeben können, sind Pumpspeicherwerke als Langzeitspeicher

³ Farad (F) ist die Einheit für die Kapazität eines Kondensators. $1 \text{ F} = 1 \text{ As} / \text{V}$. Das bedeutet: Ein Kondensator, der in 1 Sekunde durch einen Strom von 1 Ampere auf eine Spannung von 1 Volt aufgeladen wird, hat eine Kapazität von 1 Farad.

geeignet. Sie können nicht nur grosse Leistungen während Stunden oder Tagen liefern, sondern sie können auch die zugeführte Energie während Monaten praktisch verlustfrei speichern, da es im Gegensatz zu Kondensatoren und Akkumulatoren keine Selbstentladungsvorgänge gibt.

Natürlich wird bei jedem Pumpspeicherwerk mehr Energie für das Hochpumpen des Wassers benötigt, als beim Herunterströmen durch die Turbine zurückgewonnen werden kann. Einerseits entstehen Verluste beim Strömen des Wassers durch die Druckleitung und andererseits haben auch Pumpe und Turbine (oder Pumpturbine) sowie Motor und Generator (oder Motor-generator) kleine Verluste. Hinzu kommen die Verluste im Hochspannungstransformator und der (relativ kleine) Eigenenergiebedarf des Pumpspeicherwerks. Der Gesamtwirkungsgrad eines Pumpspeicherkraftwerks liegt zwischen 75 und 80 %.

Im Ausbauprojekt Linthal 2015 der Kraftwerke Linth-Limmern wird ein neues Pumpspeicherkraftwerk gebaut, das den Muttsee als Oberbecken und den Limmernsee als Unterbecken verwendet. Das Speichervolumen des Muttsees wird durch eine neue Staumauer von 9 Millionen auf 25 Millionen Kubikmeter vergrössert und das Stauziel wird von 2446 auf 2474 m ü.M. erhöht. Das Absenkziel ist 2417 m ü.M. Das Stauziel des Limmernsees ist 1857 m ü.M. und sein Absenkziel ist 1750 m ü.M. Die nutzbare Höhendifferenz schwankt somit zwischen 560 und 724 m. Vier Pumpturbinen mit je 250 MW Leistung liefern eine totale Leistung von 1'000 MW. Wird mit einer mittleren Höhendifferenz von 640 m gerechnet und angenommen, dass der Muttsee zu zwei Dritteln entleert würde, könnte das neue Pumpspeicherwerk während rund 26 Stunden eine Leistung von 1 GW liefern.

Ringwallspeicherkraftwerke. Da die Zahl der Orte, die topographisch für Pumpspeicherkraftwerke geeignet sind, beschränkt ist, entwarf der Ingenieur Matthias Popp in seiner Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig das Projekt eines Ringwallspeicherkraftwerks. Ein ringförmiger Wall von 215 m Höhe und 6 km Durchmesser bildet das Oberbecken, das von einem See von 11 km Durchmesser umgeben ist, der das Unterbecken bildet. Mit dem Strom von Windkraftanlagen und von einer auf dem Wasser des Oberbeckens schwimmenden Photovoltaikanlage, die stets nach der Sonne ausgerichtet wird, wird Wasser vom Unterbecken in das Oberbecken gepumpt. Bei Windstille und starker Bewölkung würde die ganze Anlage während nahezu 14 Tagen eine elektrische Leistung von 2 GW liefern können. Es wird behauptet, dass damit z.B. in Norddeutschland zwei Kernkraftwerke ersetzt werden könnten.

Das (abgesehen vom grossen Landbedarf) auf den ersten Blick vielleicht bestechende Projekt wird von Fachleuten scharf kritisiert. Ein Erddamm, der nur mit dem Aushubmaterial des Unterbeckens aufgeschüttet würde, könnte dem Druck einer 200 m hohen Wassersäule nicht standhalten, und da der Boden nicht aus Fels besteht, hätte er nicht genug Standfestigkeit und wäre nicht genügend dicht. Bei Flussdeichen kann beobachtet werden, dass durch den im Grundwasser erhöhten Druck in der Umgebung des Flusdamms Wasser aus dem Boden tritt, sobald das Wasser im Fluss nur wenige Meter über dem Niveau der umliegenden Landfläche liegt. Die von Herrn Popp zum Vergleich herangezogene Technik des Braunkohle-Tagbaus wäre für den Bau eines dichten Erddamms bei weitem nicht hinreichend. Zudem würde das ganze Bauvorhaben beträchtliche Zeit⁴ in Anspruch nehmen. Ferner wird das Problem der Wiederaufladung des Speichers nicht berücksichtigt (siehe Seite 7).

2.2 Hubspeicherkraftwerke

Statt dass potentielle Energie gespeichert wird, indem Wasser auf ein höheres Niveau gepumpt wird, könnte grundsätzlich auch ein Festkörper hochgehoben werden. Zum Beispiel könnte in einem stillgelegten Bergwerksschacht ein Gewicht abgesenkt und wieder hochgezogen werden. Die Energiebeträge, die auf diese Weise gespeichert werden können, sind aber recht be-

⁴ Die Gewichtsstaumauer Grande Dixence hat eine Höhe von 285 m und eine Kronenlänge von 695 m. Die Bauzeit betrug 14 Jahre. Der Ringwall hat eine Höhe von 215 m und einen Umfang von 19 km. Da das Bauvolumen einer Gewichtsstaumauer proportional zur Länge und proportional zum Quadrat der Höhe ist, hat der Ringwall das 15fache Bauvolumen des Grande-Dixence-Staudamms.

scheiden. Würde z.B. eine Masse von 10 Tonnen in einem Schacht 1000 m tief abgesenkt, so könnten bei einem Wirkungsgrad von 90 % gerade mal 24.5 kWh gewonnen werden. Da die Hubhöhe nicht beliebig vergrößert werden kann, müsste die bewegte Masse entsprechend vergrößert werden, wenn grössere Energiebeträge gespeichert werden sollten. Es ist jedoch technisch viel schwieriger, eine sehr grosse Masse über eine kleine Hubhöhe zu bewegen, als eine kleine Masse über eine grosse Hubhöhe. Das oben genannte Beispiel erfordert eine Technik, die sich bei Aufzügen und Standseilbahnen längst bewährt hat. Wenn jedoch die gleiche Energie gespeichert werden sollte, indem eine Masse von 10'000 t nur 1 m gehoben und gesenkt würde, wäre ein Getriebe mit einem hohen Übersetzungsverhältnis erforderlich. Besser geeignet wäre in diesem Fall eine hydraulische Hubeinrichtung.

Es existieren eine ganze Anzahl von Vorschlägen für Hubspeicherkraftwerke. Prof. Dr. Eduard Heindl hat eine Idee, die jene von Dr. Matthias Popp an Abenteuerlichkeit noch weit übertrifft. Er will die Energie in einem massiven Felszylinder von 1 km Durchmesser und 1 km Höhe speichern, der durch Wasserdruck bis zu 500 m aus dem Boden gehoben wird. Der Granitzylinder soll mit Hilfe von Seilsägen aus dem umliegenden Gestein herausgeschnitten werden. Dazu sollen zwei Ringtunnels gebohrt werden, einer am unteren Ende des Zylinders und einer in halber Höhe. Es wird beschrieben, wie die Schachtwand beim ersten Hochfahren des Zylinders mit Metall verkleidet werden könne. Gewisse Zweifel, ob das Ganze in der Praxis durchführbar ist, lassen sich nur schwer unterdrücken. Erstaunlicherweise hätten laut Herrn Heindl die Grünen nichts dagegen einzuwenden, wenn in der Landschaft ein künstlicher Berg (mit glatten senkrechten Felswänden!) 500 m hoch- und runtergefahren wird.

2.3 Druckluftspeicher

Energie kann auch gespeichert werden, indem Luft – oder allgemeiner ein Gas – komprimiert wird. Luftgewehre oder Luftpistolen, die CO₂-Patronen verwenden, sind Beispiele für die Anwendung von Druckgasspeichern⁵. Mit komprimiertem Gas kann ein Kolbenmotor oder ein Lammellenmotor angetrieben werden. Früher wurden im Kohlebergbau und beim Tunnelbau Druckluftlokomotiven eingesetzt, und heute sind druckluftbetriebene Werkzeuge weit verbreitet. Druckluftautos, die immer wieder mal als grosse Neuerung angepriesen werden, haben sich in der Praxis nicht bewährt. Eine Studie der University of California, Berkeley, verglich Benzinautos, batterieelektrische Autos und Druckluftautos. Bezüglich Treibhausgasemission, Treibstoffkosten und Tankvolumen schnitt das Druckluftauto deutlich am schlechtesten ab. Bei gleichem Energiespeichervermögen ist der Drucktank schwerer als ein Bleiakkumulator. Das Druckluftauto hat einen geringeren Primärenergieverbrauch als das Benzinauto, aber nur wenn der Kompressor mit erneuerbarer Energie betrieben wird.

Bei einem Druckluftspeicherkraftwerk wird die Luft durch elektrisch angetriebene Kompressoren auf einen Druck von etwa 70 bar verdichtet und in unterirdischen Kavernen gespeichert. Bei der Entladung der gespeicherten Energie wird die verdichtete Luft auf eine Turbine geleitet, die den Generator antreibt.

Beim Laden des Speichers erwärmt sich die Luft infolge der Kompression stark. Würde der Kompressor nicht gekühlt, würde heisse Luft in die Kaverne geleitet. Dort würde sie sich abkühlen, und damit würde der Druck wieder sinken. Bei der Entladung des Speichers würde sich die Luft infolge der Expansion stark abkühlen. Um eine Vereisung der Turbine zu vermeiden, muss daher die Luft bei der Expansion erwärmt werden.

Die zwei zurzeit existierenden Druckluftspeicherkraftwerke in Huntorf (Niedersachsen) und in McIntosh (Alabama, USA) sind daher keine reinen Druckluftspeicherkraftwerke, sondern kombinierte Druckluftspeicher- und Gasturbinen-Kraftwerke.

Die Anlage in Huntorf wurde 1978 in Betrieb genommen. In einer Tiefe von etwa 650 bis 800 m wird im Salzgestein in zwei Kavernen mit einem Gesamtvolumen von rund 310'000 m³ die komprimierte Luft bei einem maximalen Druck von 72 bar gespeichert. Die Kompressoren ha-

⁵ Gewehre, die vor dem Schuss erst gespannt werden müssen, werden zwar meist auch als „Luftgewehre“ bezeichnet, obwohl sie eigentlich Federdruckwaffen sind.

ben eine totale Leistung von 60 MW, und das Aufladen dauert 8 Stunden. Wenn das Kraftwerk Energie liefern soll, wird die komprimierte Luft einer mit Erdgas befeuerten Turbine zugeführt. Die komprimierte Luft liefert die sonst vom Verdichter der Gasturbine zu leistende Arbeit. Das Kraftwerk kann während 2 Stunden eine Leistung von 321 MW abgeben. Der Wirkungsgrad beträgt 42 % (für 1 kWh produzierten Strom müssen 0.8 kWh elektrische Energie und 1.6 kWh Gas aufgewendet werden).

Das Kraftwerk in McIntosh hat einen Rekuperator, d.h. die der Gasturbine zugeführte Luft wird mit Hilfe der heissen Abgase der Turbine vorgewärmt. Dadurch wird der Wirkungsgrad auf 54 % erhöht (für 1 kWh produzierten Strom müssen 0.69 kWh elektrische Energie und 1.17 kWh Gas aufgewendet werden). Das Kraftwerk kann während 26 Stunden 110 MW liefern.

In Strassfurt (Sachsen-Anhalt) ist ein Druckluftspeicherkraftwerk geplant, das adiabatisch arbeiten soll (ADELE: Adiabater Druckluftspeicher für die Elektrizitätsversorgung). Der Kompressor wird nicht gekühlt, und das heisse Gas gibt die Wärme an einen Wärmespeicher ab. Beim Entladen des Druckluftspeichers wird die Wärme vom Wärmespeicher wieder an die Druckluft abgegeben, so dass keine Feuerung mit Erdgas benötigt wird. Es wird ein Wirkungsgrad von bis zu 70 % erwartet.

Während der Druckluft-Entnahme sinkt der Druck im Speicher, und unterhalb eines bestimmten Minimaldrucks lässt sich das Kraftwerk nicht mehr betreiben. Isobare Druckspeicher vermeiden diesen Nachteil, indem die Kaverne mit Wasser gefüllt und mit einem oberirdischen Speicherbecken verbunden wird. Beim Laden des Speichers verdrängt die Druckluft das Wasser (oder die Salzsole) aus der Kaverne in das Speicherbecken. Der Druck in der Kaverne ist gegeben durch die Höhe der Flüssigkeitssäule und bleibt daher unabhängig vom Füllzustand des Speichers nahezu konstant. Die durch die geringen Niveauänderungen im Speicherbecken verursachten Druckänderungen sind minimal.

Das Laden von Langzeitspeichern

Pumpspeicherkraftwerke (und Ringwallspeicherkraftwerke oder Hubspeicherkraftwerke – so es denn solche jemals geben wird) sind als Langzeitspeicher geeignet. Ein Pumpspeicherkraftwerk mit einem genügend grossen Speicherbecken könnte während länger anhaltenden Inversionswetterlagen (Nebel und praktisch Windstille) die Energie liefern, die sonst von Solar- und Windkraftwerken produziert wird. Wenn berechnet wird, wie lange ein Pumpspeicherkraftwerk eine Lücke in der Produktion der Solar- und Windkraftwerke überbrücken könnte, wird häufig das Problem der Wiederaufladung des Speichers übersehen. Dieses soll hier an einem Beispiel veranschaulicht werden. Ein elektrisches Energieversorgungsnetz sei so ausgelegt, dass Solar- und Windkraftwerke eine mittlere Leistung von 1 GW liefern⁶. Wenn nun ein Pumpspeicherkraftwerk eine Inversionslage von 15 Tagen Dauer überbrücken soll, muss es eine Energie von 360 GWh speichern können. Es kann jedoch nicht ausgeschlossen werden, dass nicht nach wenigen Tagen sich wieder eine Inversionslage einstellt. Deshalb sollte der Speicher in diesen wenigen Tagen wieder aufgefüllt werden können.

Wenn verlangt wird, dass der Speicher in 5 Tagen wieder gefüllt ist, müssen die Solar- und Windkraftwerke mindestens eine mittlere Leistung von $1 + 15/5$ GW, also 4 GW, liefern. Wenn der Speicher schon nach 3 Tagen wieder gefüllt sein sollte, müsste die mittlere Leistung der Solar- und Windkraftwerke sogar 6 GW betragen. Solar- und Windkraftwerke können nur dann eine sichere Energieversorgung gewährleisten, wenn eine sehr grosse Speicherkapazität zur Verfügung steht und die Kraftwerke zudem eine beträchtliche Überkapazität an Leistung erbringen.

⁶ Die kurzzeitigen Leistungsschwankungen werden mit Hilfe von kleinen Pumpspeicherkraftwerken ausgeglichen.

2.4 Flüssiger Stickstoff

In einer Studie, deren Fachbericht im Frühjahr 2013 erscheinen soll, wird die Energiespeicherung mit Hilfe von flüssiger Luft untersucht. Während Schwachlastzeiten wird mit überschüssigem Strom von Wind- oder Solarkraftwerken Luft verflüssigt. Da flüssige Luft wegen ihres Sauerstoffgehaltes zusammen mit brennbaren Stoffen ein explosives Gemisch bilden kann, wird aus Sicherheitsgründen der Sauerstoff abgetrennt und nur der flüssige Stickstoff gespeichert. Dieser kann während Lastspitzen wieder verdampft werden und durch die Expansion im gasförmigen Zustand über eine Gasturbine und einen Generator zusätzlichen Strom liefern. Der Wirkungsgrad des ganzen Prozesses liegt unter 50 %. Es wird aber erwartet, dass der Wirkungsgrad auf 70 % gesteigert werden kann, wenn die Abwärme eines konventionellen Wärmekraftwerks oder eines Industriebetriebes genutzt wird, um den Stickstoff zu verdampfen und bei der Expansion aufzuheizen. Da der flüssige Stickstoff eine Temperatur von -196 °C hat und daher in gut isolierten Kryobehältern gespeichert werden muss, kommen Speicher mit einem Volumen von $500'000\text{ m}^3$ wohl kaum in Frage. Deshalb und wegen der unvermeidlichen Verdampfungsverluste ist diese Speicherart nicht für Langzeitspeicherung von grossen Energiebeiträgen geeignet.

2.5 Schwungradspeicher

Die Schwunmassen aller Turbinen und Generatoren in einem elektrischen Versorgungsnetz wirken als Energiespeicher und sind wesentlich für die Frequenzstabilität (Primärregelung, siehe Bulletin Nr. 65).

Schwankungen der Last oder der Produktion (von Photovoltaikanlagen oder Windkraftwerken) im Sekundenbereich können mit Schwungrädern, die mit einem Motorgenerator gekoppelt sind, ausgeglichen werden. Da Schwungräder innerhalb von Millisekunden die volle Leistung abgeben können, werden sie zur Kompensation von Netzspannungsschwankungen und in unterbrechungsfreien Stromversorgungsanlagen anstelle von Akkumulatoren eingesetzt. In manchen Notstromaggregaten stellt ein ständig in Drehung gehaltenes Schwungrad die Energie zur Verfügung, um bei einem Stromausfall den Notstromdieselmotor zu starten. Das Schwungrad liefert zudem über seinen Motorgenerator die elektrische Energie, bis der Notstromdiesel seine volle Leistung abgeben kann. Da die meisten Stromausfälle nur wenige Sekunden dauern, gibt es auch Notstromaggregate, die allein mit Schwungrädern arbeiten.

Auch wenn Schwungräder im Vakuum und auf Magnetlagern laufen, verlieren sie durch unvermeidliche Reibungsverluste ständig Energie. Sie sind daher nicht dafür geeignet, Energie über längere Zeiten, d.h. über Tage oder sogar Wochen, zu speichern.

Schwungradspeicher können hohe Lastspitzen decken, die sonst das Stromnetz zusammenbrechen liessen. Im Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching wird ein Stahlschwungrad mit einem Durchmesser von 3 m und einer Masse von 223 t in 20 Minuten auf eine Drehzahl von 1650 Umdrehungen pro Minute hochgefahren. Danach kann das Schwungrad beim Abbremsen auf 1275 Umdrehungen pro Minute während 10 Sekunden eine Leistung von 150 MW für den Magneten eines Fusionsexperiments abgeben.

Schwungräder werden auch in Fahrzeugen verwendet, einerseits als Energiespeicher und andererseits zur Rückgewinnung der beim Bremsen freiwerdenden kinetischen Energie. Bereits von 1953 bis 1960 wurden bei Yverdon zwei Gyrobusse auf einer 6 km langen Strecke eingesetzt. Weitere solche Fahrzeuge verkehrten in Léopoldville und in Gent. An den Endstationen und an einigen Zwischenhaltestellen wurde über einen dreiarmigen Stromabnehmer der Motorgenerator mit dem Stromnetz verbunden und das 1,5 Tonnen schwere Schwungrad auf 3000 Umdrehungen pro Minute beschleunigt. Während der Fahrt lieferte der Motorgenerator den Strom für den Fahrmotor. Um den Reibungswiderstand zu reduzieren, waren Schwungrad und Motorgenerator in einem luftdichten Gehäuse eingeschlossen, das mit 0,3 bar Wasserstoff gefüllt war. Da das Schwungrad eine Umfangsgeschwindigkeit von 900 km/h hatte, musste das Gehäuse aus Sicherheitsgründen entsprechend widerstandsfähig sein.

Ein Gyrobus hatte die Vorteile, dass er wesentlich leiser war als ein Diesibus, keine Abgase produzierte und keine Oberleitung benötigte. Nachteilig war dagegen, dass er rund 3 Tonnen schwerer war als ein Diesibus mit gleicher Platzzahl und dass das Aufladen an den Haltestellen 2 bis 5 Minuten dauerte. Zudem verursachte das Schwungrad ein eigenartiges Fahrverhalten. Wenn eine Strasse mit veränderlicher Steigung durchfahren wurde, bewirkten die Kreiselkräfte ein Kippdrehmoment auf das Fahrzeug.

Moderne Schwungräder, die aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK, Carbonfaserverstärkter Kunststoff) bestehen, sind bedeutend leichter. Während Stahl-Schwungräder typischerweise Drehzahlen von 3'000 pro Minute haben, erreichen CFK-Schwungräder Drehzahlen von bis über 80'000 pro Minute. Mit CFK-Schwungrädern lassen sich rund zehnmal höhere Energiedichten erreichen als mit Stahl-Schwungrädern, nämlich bis zu 130 Wh/kg. Die Energiedichten von kommerziellen Schwungrädern sind allerdings deutlich kleiner. Die Schwungräder aus faserverstärkten Kunststoffen bestehen in der Regel aus mehreren konzentrischen Ringen. Durch die Zugfestigkeit des Materials wird nicht etwa die maximal zulässige Drehzahl, sondern die maximal zulässige Umfangsgeschwindigkeit bestimmt. Diese beträgt rund 1'000 m/s.

Mit den modernen Materialien gewinnen Schwungräder auch beim Einsatz in Fahrzeugen wieder an Bedeutung. Sie werden insbesondere beim Bremsen in Fahrzeugen mit Hybridantrieb zur Wiedergewinnung der kinetischen Energie eingesetzt.

In Netzen von Nahverkehrsmitteln treten durch das häufige Bremsen und Wiederauffahren der Fahrzeuge starke Leistungsschwankungen auf. Wenn die Fahrzeuge dafür eingerichtet sind, beim Bremsen Energie in das Netz zurückzuspeisen, kann diese je nach Verlauf und Belegung der Strecke nur zu 40 bis 60 % genutzt werden. Es ist daher sinnvoll, die Unterwerke der Strecken mit Energiespeichern auszurüsten. Dadurch können die Lastspitzen um 30 % und der Energieverbrauch um 20 bis 30 % reduziert werden. Bereits 1978 wurde für eine Gefällstrecke der Stuttgarter S-Bahn eine Schwungradspeicheranlage entworfen, die dann aber nie realisiert wurde. Auch ein Projekt für die U-Bahn in New York scheiterte schliesslich, obwohl 2002 Versuche erfolgreich verlaufen waren. Die Stadtbahn von Hannover hat dagegen mit Erfolg in zwei Unterwerken Schwungradspeicher installiert. Die Rotoren der Speicher haben eine Masse von 2'900 kg und können 4,6 kWh speichern, wenn ihre Drehzahl zwischen 1'800 und 3'300 U/min variiert wird. Im Jahr 2006 wurde an einer Strassenbahnstrecke in Zwickau ein Schwungradspeicher in Betrieb genommen. Der Rotor läuft mit 15'000 bis 25'000 Umdrehungen pro Minute und kann 4 kWh speichern. Die maximale Leistungsabgabe ist 1 MW.

Seit Januar 2011 ist in Stephentown, New York, eine Anlage mit 200 Schwungrädern in Betrieb, die zur Frequenzregelung des Stromnetzes dient. Die einzelnen Schwungräder rotieren in evakuierten Gehäusen mit bis zu 16'000 Umdrehungen pro Minuten und können je 25 kWh speichern. Die ganze Anlage speichert total 5 MWh und kann während 15 Minuten eine Leistung von 20 MW abgeben.

Offenbar sind jedoch Schwungräder nicht geeignet, um in einem elektrischen Energieversorgungsnetz namhafte Energiebeträge von der Grössenordnung 100 GWh zu speichern.

3. Chemische Energie

Elektrochemische Speicher			
Mit internem Speicher (Akkumulatoren)		Mit externem Speicher	
Niedertemperatur-Batterien	Hochtemperatur-Batterien	Redox-Flow-Batterien	Brennstoffe
Blei-Säure-Batterien	NaNiCl		Wasserstoff
NiCd und NiMH	NaS		Methan
Li-Ion			
Metall-Luft-Batterien			

3.1 Akkumulatoren

Akkumulatoren bestehen aus zwei Elektroden aus Metall oder Metalloxid, die in eine Elektrolytlösung eingetaucht sind. Die Zahl der möglichen Kombinationen von Elektrodenmaterialien und Elektrolyten ist sehr gross. Im praktischen Einsatz haben sich jedoch nur einige wenige Systeme bewährt.

Bleibatterien

Die Blei-Säure-Akkumulatoren sind am weitesten verbreitet. Sie dienen als Starterbatterien in Motorfahrzeugen mit Verbrennungsmotoren, als Energiequelle für Elektrofahrzeuge, für Notstromversorgungen und zur lokalen Stabilisierung von Frequenz und Spannung. In Westberlin war von 1988 bis zur Wiedervereinigung eine Anlage mit einer Leistung von 17 MW und einer Speicherkapazität von 14 MWh in Betrieb zur Stabilisierung des Westberliner Stromnetzes, das damals im Inselbetrieb arbeitete. Die Southern California Edison Company betrieb von 1988 bis 1997 in Chino, CA, eine Anlage mit einer Leistung von 10 MW und einer Kapazität von 40 MWh. Die Spitzenleistung der grossen Batterieanlagen ist nicht etwa durch die Akkumulatoren begrenzt, sondern durch die installierte Leistungselektronik. Bleibatterien können kurzzeitig sehr hohe Leistungen liefern. Aus diesem Grund sind jedoch Kurzschlüsse sehr gefährlich und können leicht zu Bränden führen, da extrem hohe Ströme auftreten können.

Bleiakkumulatoren werden auch zum Ausgleich der Fluktuationen der Stromproduktion von Photovoltaik- und Windkraft-Anlagen eingesetzt.

Im Ersten und im Zweiten Weltkrieg wurden U-Boote im getauchten Zustand in der Regel durch Elektromotoren angetrieben, die durch riesige Bleiakkumulator-Anlagen gespeist wurden.

Bleibatterien haben Elektroden aus Blei-Antimon-, Blei-Selen-Antimon- oder Blei-Calcium-Zinn-Legierungen und verwenden als Elektrolyt Schwefelsäure mit einer Konzentration von 36 %. Ihre Energiedichte beträgt 30 bis 40 Wh/kg. Die höchsten Energiedichten werden nur auf Kosten der Lebensdauer erreicht, indem sehr dünne Bleigitter verwendet werden. Der Wirkungsgrad eines Lade- und Entlade-Zyklus liegt zwischen 70 und 90 %.

Beim Laden steigt die Zellenspannung von 2,1 V auf maximal 2,75 V. Während der Entladung sinkt die Spannung bald unter 2 V, aber bleibt dann lange Zeit zwischen 1,9 und 1,95 V. Auf keinen Fall darf die Batterie so weit entladen werden, dass die Zellenspannung unter 1,75 V sinkt. Durch wiederholte derartige Tiefentladungen wird die Batterie beschädigt und verliert an Kapazität.

Es gibt sehr grosse Qualitätsunterschiede bei den Bleiakkumulatoren. Abhängig von der Qualität einer Batterie, ihrer Einsatzart und insbesondere vom Ladeverfahren variieren die Lebensdauern sehr stark. Während billige Starterbatterien oft nicht länger als 2 bis 4 Jahre überdauern, können hochwertige Traktionsbatterien oder Speicherbatterien Lebensdauern von 15 bis 25 Jahren erreichen.

Bleiakkumulatoren haben den Vorteil, dass sie wesentlich kostengünstiger sind als andere Akkumulatoren, unter anderem deshalb, weil das Blei nahezu vollständig rezykliert werden kann. Zudem haben sie den wesentlichen Vorteil, dass sie nicht überladen werden können, weil ab einem bestimmten Ladezustand die Wasserzersetzung eintritt. Ferner können Bleibatterien im Gegensatz zu Lithium-Ionen-Batterien nicht brennen. Ein grosser Nachteil für mobile Anwendungen ist jedoch das relativ hohe Gewicht pro Wh. Ein weiterer Nachteil der Bleibatterien besteht darin, dass sie durch Tiefentladung irreparabel geschädigt werden.

Nickel-Cadmium-Akkumulatoren

Nickel-Cadmium-Akkumulatoren haben einen kleinen Innenwiderstand und können daher hohe Ströme liefern. Sie wurden deshalb vor allem im Modellbau und für kabellose Elektrowerkzeuge eingesetzt. Sie haben eine Energiedichte von 40 bis 70 Wh/kg und einen Wirkungsgrad von 70 bis 80 %. Die Zellenspannung beträgt 1,2 V. Im Gegensatz zu anderen Akkumulatoren haben NiCd-Akkus auch bei tiefen Temperaturen noch eine hohe Kapazität, so z.B. bei $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ noch 50 % der Kapazität bei Raumtemperatur.

NiCd-Akkumulatoren werden auch in Batterie-Speicherkraftwerken eingesetzt. In Fairbanks wird seit 2003 von der Golden Valley Electric Association eine Anlage mit einer maximalen Leistung von 46 MW und einer Kapazität von 6.5 MWh betrieben.

Weil Cadmium ein giftiges Schwermetall ist, wird der Einsatz von NiCd-Akkus immer mehr eingeschränkt und wird möglicherweise bald ganz verboten. Cadmiumhaltige Batterien sind nur noch für Not- und Alarmsysteme, Notbeleuchtungen, medizinische Ausrüstungen und kabellose Elektrowerkzeuge erlaubt.

Nickel-Metallhydrid-Akkumulatoren

Wegen der Einschränkungen des Einsatzes von Cadmium haben die NiMH-Akkus die NiCd-Akkus weitgehend verdrängt. Sie haben die gleiche Zellenspannung und den gleichen Wirkungsgrad wie die NiCd-Akkus. Ein grosser Vorteil ist ihre höhere Energiedichte (80 Wh/kg), aber nachteilig sind die höhere Selbstentladung, der höhere Innenwiderstand, die niedrigere Zyklenzahl, der kleinere Temperaturbereich und die höhere Empfindlichkeit gegen Tiefentladung.

In Hybrid-Fahrzeugen werden fast ausschliesslich NiMH-Akkumulatoren eingesetzt, da sie sicherer sind als die Lithium-Batterien.

Lithium-Ionen-Akkumulatoren

Für die positive Elektrode können eine ganze Anzahl verschiedener Lithium-Metalloxide verwendet werden. Auch für die negative Elektrode stehen mehrere Materialien zur Auswahl. Zudem sind für den Elektrolyten gewisse Polymere und eine Reihe von Lithiumsalzen in bestimmten organischen Lösungsmitteln geeignet. Dementsprechend gibt es eine grosse Zahl von möglichen Kombinationen der Materialien für Li-Ionen-Akkumulatoren mit unterschiedlichen Zellenspannungen und Lebensdauern. Obwohl sich in der Praxis bisher bereits etwa 6 Typen bewährt haben, wird immer noch intensiv geforscht nach Kombinationen mit noch besseren Eigenschaften. Li-Ionen-Akkus erreichen Wirkungsgrade von über 90 bis nahezu 100 %.

Im März 2012 wurde vom Elektrizitätswerk des Kantons Zürich in Dietikon ein Batteriespeicher mit einer Leistung von 1 MW in Betrieb genommen. Die Batterie besteht aus rund 10'000 Li-Ionen-Zellen und hat eine Speicherkapazität von 500 kWh.

In portablen mobilen Anwendungen werden anstelle der NiMH-Akkus zunehmend Li-Ionen-Batterien verwendet, da diese hohe Energiedichten von bis zu über 200 Wh/kg erreichen. Die hohe Energiedichte ist jedoch nicht unproblematisch, wie eine Reihe von brennenden und explodierenden Akkus in Laptops auf erschreckende Weise gezeigt haben. Bei verschiedenen Li-Ionen-Akkus besteht die Gefahr des „thermal runaway“. Bei starker thermischer Belastung kann es durch Schmelzen des Separators zu einem inneren Kurzschluss und damit zu einer extrem schnellen Energiefreisetzung kommen. Ebenso können mechanische Beschädigungen einer Lithium-Batterie zu einem inneren Kurzschluss führen. Schon der Brand oder die Explosion einer Laptop-Batterie ist ein ziemlich dramatisches Ereignis. Noch weitaus schlimmer wäre die Explosion der Lithium-Batterie eines Elektrofahrzeuges. Dabei würde eine Energiemenge frei, die über 1'000 mal grösser sein kann, als die Energie, die beim Versagen einer Laptop-Batterie freigesetzt wird.

Natrium-Nickel-Chlorid- und Natrium-Schwefel-Akkumulatoren

Im Gegensatz zu anderen Batterien ist bei NaNiCl- und NaS-Batterien der Elektrolyt nicht flüssig, sondern ein Festkörper, eine für Natriumionen durchlässige Keramik. Dafür sind bei der NaS-Batterie die beiden Elektroden, Natrium und Schwefel, im flüssigen Zustand. Bei der NaNiCl-Batterie besteht die negative Elektrode aus Natrium und die positive Elektrode aus Natriumaluminiumchlorid und (im geladenen Zustand) Nickelchlorid und Natrium, bzw. (im ungeladenen Zustand) Nickel und Natriumchlorid. Damit Natrium und Schwefel im flüssigen Zustand sind und eine hinreichend grosse Leitfähigkeit haben, müssen die Batterien bei Temperaturen von 270 bis 350°C betrieben werden. Die Batterien haben praktisch keine elektrochemische Selbstentladung, aber da sie dauernd auf der hohen Betriebstemperatur gehalten werden müssen, bedingt die notwendige Heizung eine hohe effektive Selbstentladung. Sie sind daher nur als kurzzeitige Speicher geeignet.

Die Energiedichte von NaNiCl-Akkus beträgt 100 bis 120 Wh/kg, diejenige von NaS-Akkus ist rund 200 Wh/kg. Der Gesamtwirkungsgrad für Ladung und Entladung (ohne Energieaufwand für die Heizung) liegt zwischen 80 und 90 %. Neben der hohen Energiedichte sind auch die relativ hohen Zellenspannungen von 2.6 bzw. 2 V von Vorteil.

NaNiCl- und NaS-Batterien werden vor allem für Elektrofahrzeuge eingesetzt. Der grosse Nachteil, dass sie ständig auf hoher Temperatur gehalten werden müssen, verhinderte aber bisher eine weite Verbreitung.

Metall-Luft-Akkumulatoren

Ein vielversprechendes Konzept stellen die Metall-Luft-Akkumulatoren dar, an deren Entwicklung intensiv gearbeitet wird. Das Prinzip, Metalle wie Zink, Eisen, Aluminium oder Lithium mit Hilfe von Sauerstoff elektrolytisch zu oxidieren, ist schon seit langem bekannt. Wenn der Sauerstoff der Umgebungsluft entnommen wird, muss er nicht in der Batterie mitgeführt werden. Dadurch wird der Akkumulator wesentlich leichter und er erreicht eine höhere Energiedichte. Für elektrisch wiederaufladbare Batterien sind vor allem Zink und Lithium geeignet. Zink-Luft-Akkus haben Energiedichten, die mehr als dreimal höher sind als diejenigen von Li-Ionen-Akkus. Mit Lithium-Luft-Batterien werden sogar zehnmal höhere Energiedichten, also bis zu 2'000 Wh/kg, erreicht. Bis zur Seriereife und Praxistauglichkeit dieser Akkumulatoren ist aber noch sehr viel Entwicklungsarbeit erforderlich.

3.2 Redox-Flow-Batterien

Bei Akkumulatoren sind die Elektroden durch die Lade- und Entladezyklen ständigen chemischen Umwandlungen ausgesetzt, was im Laufe der Zeit zu irreversiblen Veränderungen führt. Dadurch ist die Lebensdauer der Akkumulatoren begrenzt. Bei den Redox-Flow-Batterien wird dieser Nachteil vermieden, indem Elektroden verwendet werden, die chemisch nicht reagieren. Das aktive Material besteht aus Salzen, die in einem flüssigen Elektrolyten gelöst sind. Beim Lade- und Entladeprozess in der Reaktionszelle, die durch eine Membran in zwei Halbzellen

unterteilt ist, werden die Oxidationszustände der gelösten Salze geändert. Als Redoxpaare sind Verbindungen aus Titan, Eisen, Chrom, Vanadium, Cer, Zink, Brom und Schwefel geeignet. Am weitesten ist die Entwicklung von Vanadium-Redox-Batterien fortgeschritten. Diese haben eine Zellenspannung von 1.4 V.

Die Lösungen werden getrennt von der Reaktionszelle gelagert. Die Grösse der Lagertanks bestimmt die Speicherkapazität der Batterie, während durch die Grösse der Reaktionszelle die Leistung der Batterie festgelegt wird. Da die Grösse der Lagertanks unabhängig von der Reaktionszelle gewählt werden kann, sind Redox-Flow-Batterien zur Speicherung von sehr grossen Energiemengen geeignet. Weil in den Lagertanks die Oxydationszustände sich nicht ändern, kann die Energie auch praktisch beliebig lange gespeichert werden. Eine entladene Batterie kann sehr schnell „mechanisch“ durch Einfüllen von frischem Elektrolyt geladen werden, und der eventuell lang dauernde Ladeprozess kann in einem andern System räumlich getrennt von der Batterie stattfinden. Das „Betanken“ eines mit einer Redox-Flow-Batterie betriebenen Fahrzeuges ist daher ähnlich wie das Betanken eines Fahrzeuges mit Benzin- oder Diesel-Motor. Während jedoch Benzin eine Energiedichte von 12'000 Wh/kg hat, ist die Energiedichte der Elektrolyte eines Vanadium-Redox-Systems lediglich etwa 25 Wh/kg. Dabei ist allerdings noch zu berücksichtigen, dass die im Benzin gespeicherte Energie vom Fahrzeugmotor, der meist im nichtoptimalen Teillastbereich arbeitet, nur mit einem mittleren Wirkungsgrad von rund 20 % umgesetzt werden kann, während das System Batterie und Elektromotor einen Wirkungsgrad von etwa 80 % hat.

3.3 Wasserstoff

Die Möglichkeit, mit überschüssiger elektrischer Energie Wasserstoff zu produzieren, diesen in geeigneter Weise zu speichern, um damit später mit Hilfe eines Gas- und Dampfturbinenkraftwerks oder mit Hilfe von Brennstoffzellen wieder elektrische Energie zu erzeugen, wurde bereits in den Bulletins Nr. 49 und 50 diskutiert.

Wasserstoff hat eine Energiedichte von 33'000 Wh/kg. Würde in den Kavernen des Druckluftspeicherkraftwerks bei Huntorf Wasserstoff bei 70 bar gespeichert, so hätte dieser einen Energieinhalt von $2.34 \cdot 10^{14}$ J. Wenn ein Umwandlungswirkungsgrad von 50 % vorausgesetzt wird, könnten 32.5 GWh elektrische Energie freigesetzt werden. Wasserstoff könnte daher als Langzeitspeicher geeignet sein. Im Vergleich zu Pumpspeicherkraftwerken hat diese Art von Energiespeicherung jedoch einen deutlich schlechteren Wirkungsgrad. Bisher wurde noch keine grosse Wasserstoffspeicheranlage realisiert.

Der Wirkungsgrad des gesamten Zyklus elektrische Energie – Elektrolyse – Wasserstoff – Komprimierung – Gas- und Dampfturbinenkraftwerk oder Brennstoffzelle – elektrische Energie kann der Tabelle 1 in Bulletin Nr. 59 und der Abbildung 5 in Bulletin Nr. 50 entnommen werden. Der Wirkungsgrad der Elektrolyse beträgt rund 75 %, derjenige für die Kompression des Wasserstoffs 90 %. Wenn der Wasserstoff am gleichen Ort, an dem er produziert wurde, gespeichert und wieder genutzt wird, entfallen die beim Transport auftretenden Verluste. Für die Stromproduktion mit einem Gas- und Dampfturbinenkraftwerk oder mit Brennstoffzellen wird – etwas optimistisch – mit einem Wirkungsgrad von 50 bis 55 % gerechnet. Damit ergibt sich für den gesamten Zyklus ein Wirkungsgrad von 34 bis 37 %.

3.4 Methan

Die Probleme, die bei der Speicherung des Wasserstoffs auftreten (s. Bulletin Nr. 49), können reduziert werden, wenn der Wasserstoff zur Herstellung von synthetischem Methan verwendet wird. Die volumetrische Energiedichte (Wh/m³) von Methan ist 3,33 mal grösser als diejenige von Wasserstoff. Würde in den Kavernen bei Huntorf Methan statt Wasserstoff bei 70 bar gespeichert, so könnten damit 108 GWh produziert werden. Bei Volketswil (ZH) wurde 2004 ein Erdgas-Röhrenspeicher mit einem Volumen von 9540 m³ fertiggestellt. Gefüllt mit Methan unter einem Druck von 70 bar könnte ein solcher Speicher 3.3 GWh Strom liefern.

Bei der Methanisierung des Wasserstoffs wird bei hohem Druck und bei Temperaturen zwischen 300 und 700 °C aus Wasserstoff und Kohlendioxid mit Hilfe eines Katalysators Methan

gebildet. Als Kohlendioxidquellen kommen fossil gefeuerte Kraftwerke, Biogas- und Kläranlagen, Industrieprozesse und eventuell auch die Abscheidung aus der Umgebungsluft in Frage.

Am 30. Oktober 2012 wurde im Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, Stuttgart-Vaihingen, eine 250 kW_{el}-Power-to-Gas-Forschungsanlage eingeweiht. Die Anlage liefert bis zu 15 m³ Methan pro Stunde. Sie dient als Pilotanlage für künftige Power-to-Gas-Anlagen im Bereich von 1 bis 20 MW.

Methan hat den Vorteil, dass das bereits vorhandene Erdgasnetz einerseits für den Transport und andererseits für die Speicherung verwendet werden kann. In Deutschland sind 43 unterirdische Erdgasspeicher mit einem totalen Fassungsvermögen von rund 20 Milliarden Kubikmetern in Betrieb, deren Energiespeicherkapazität 200 TWh beträgt. Nachteilig ist der erhöhte Aufwand, durch den der Gesamtwirkungsgrad noch weiter reduziert wird.

4. Thermische Energie

4.1 Wärmespeicher

Genau genommen ist der Begriff „Wärmespeicherung“ nicht korrekt⁷. Es wird aber hier dem üblichen Sprachgebrauch gefolgt und auf schwerfällige Formulierungen wie „Energiespeicherung durch Erhöhung der inneren Energie“ verzichtet.

Wärmespeicher werden schon seit langem in Heizungen und in Wärmekraftwerken, insbesondere in solarthermischen Kraftwerken, eingesetzt. Hier geht es aber nicht primär um die Speicherung thermischer Energie, sondern um die Speicherung elektrischer Energie. Es geht hier also nicht etwa darum, die überschüssige Wärme eines solarthermischen Kraftwerks zu speichern, um den Wärmekraftprozess auch während vorübergehender Bewölkung in Gang halten zu können. Vielmehr soll mit der überschüssigen elektrischen Energie von Photovoltaik- oder Windkraftwerken während Schwachlastzeiten ein Speichermedium aufgeheizt werden, um dann bei erhöhtem Energiebedarf mit Hilfe des heißen Mediums ein Wärmekraftwerk betreiben zu können.

Der Nachteil dieser Speichermethode besteht darin, dass zwar elektrische Energie mit einem Wirkungsgrad von praktisch 100 % dazu verwendet werden kann, um ein Speichermedium aufzuheizen, aber dass die „gespeicherte Wärme“ mit Hilfe einer Wärmekraftmaschine nur mit einem Wirkungsgrad von bestenfalls etwa 50 % wieder in elektrische Energie zurück verwandelt werden kann. Wenn jedoch die überschüssige elektrische Energie der Photovoltaik- oder Windkraftwerke sonst gar nicht genutzt werden könnte, ist dieser Nachteil nicht gravierend. Es geht dann vor allem darum, welche Art von Energiespeicherung am kostengünstigsten ist. Ein Vorteil der thermischen Speicherung ist ihr geringer Volumenbedarf. Aus 4'000 m³ Magnesiumoxid, das von 1'300 auf 550 °C abgekühlt würde, könnte mit einer Wärmekraftmaschine, die mit einem Wirkungsgrad von 40 % arbeitet, eine elektrische Energie von 1 GWh erzeugt werden. Wenn die gleiche Energiemenge aus einem Pumpspeicherkraftwerk mit einer Fallhöhe von 300 m gewonnen werden sollte, müsste das Oberbecken eine Fläche von 136'000 m² (z.B. 369 m x 369 m) haben, wenn dessen Wasserspiegel bei der Energieentnahme um 10 m abgesenkt werden könnte. Während ein Wärmespeicher praktisch überall aufgestellt werden könnte, muss für ein Pumpspeicherkraftwerk ein topografisch geeignetes Gelände zur Verfügung stehen.

Ein Wärmespeicher muss jedoch nicht unbedingt bei hoher Temperatur betrieben werden. Das Elektrizitätswerk der Stadt Zürich will zusammen mit der ABB einen elektrothermischen Speicher bauen, der mit Hilfe einer Wärmepumpe Heisswasser von 120 °C und Eis erzeugt. Bei Bedarf kann daraus mit Hilfe einer Turbine wieder Strom produziert werden. Die geplante Pilotanlage soll eine Leistung von 5 MW und eine Speicherkapazität von 15 MWh haben.

⁷ Siehe z.B. Walter Traupel, „Die Grundlagen der Thermodynamik“, G. Braun, Karlsruhe 1971, und Bulletin Nr. 63, Anhang.

Quellen

Lucien F. Trueb, Paul Rüetschi: „Batterien und Akkumulatoren“ Springer, Berlin Heidelberg New York 1998.

Zahlreiche Internetquellen, u.a.:

Energiespeicherung

http://www.unendlich-viel-energie.de/uploads/media/57_Renews_Spezial_Strom_speichern_mar12_online_01.pdf

http://www.eurosolar.de/de/images/stories/pdf/Sauer_Optionen_Speicher_regenerativ_okt06.pdf

<http://www.strom-speicher.org>

http://www.ensys.tu-berlin.de/fileadmin/fg8/documents/schwarz_stromspeichertechnologien.ppt-793092079ba033f03140b2d0d74e62e6.ppt

http://www.leibniz-institut.de/sz2011/rieko_energiespeicherung_durch_synthetisches_erdgas.pdf

<http://tuuwi.wcms-file2.tu-dresden.de/download/urv/ws0809/hightech/Energiespeicherung.pdf>

<http://www.zukunftsenergien.de/hp2/downloads/vortraege/frey-speicher.pdf>

<http://www.umweltdaten.de/publikationen/fpdf-l/3448.pdf>

<http://tuuwi.wcms-file2.tu-dresden.de/download/urv/ws0809/hightech/Energiespeicherung.pdf>

http://www.dbresearch.de/PROD/DBR_INTERNET_DE-PROD/PROD000000000284196/Moderne+Stromspeicher%3A+Unverzichtbare+Bausteine+der+Energie+wende.pdf

http://www.sfv.de/artikel/unterschiedliche_speichertypen_und_ihre_besondere_eignung_fuer_EE.htm

<http://www.zukunftsenergien.de/hp2/downloads/vortraege/frey-speicher.pdf>

http://www.ensys.tu-berlin.de/fileadmin/fg8/documents/schwarz_stromspeichertechnologien.ppt-793092079ba033f03140b2d0d74e62e6.ppt

http://www.focus.de/wissen/klima/klimaprognosen/tid-21910/zukunft-der-energie-ohne-speicher-geht-gar-nichts_aid_616228.html

Pumpspeicherwerke

<http://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherkraftwerk>

http://www.strom-online.ch/pumpspeicherwerk_infos.html

http://www.axpo.com/content/dam/axpo/switzerland/erleben/dokumente/121016_Broschuere_Linthal2015_3Auflage_2011_lck.pdf

Ringwallspeicher

<http://www.ringwallspeicher.de/index.htm>

www.buerger-fuer-technik.de/Hilfsb_107_Ringwallspeicher.pdf

<http://www.eike-klima-energie.eu/climategate-anzeige/erneuerbare-speicherprobleme-geloest-ist-der-ringwallspeicher-eine-neue-intelligente-form-der-stromspeicherung>

Hubspeicher

<http://de.wikipedia.org/wiki/Hubspeicherkraftwerk>

<http://eduard-heindl.de/energy-storage>

<http://politikforen.net/showthread.php?105595-Speicherung-von-Grüner-Energie-Deutscher-Professor-hat-revolutionären-Einfall>

<http://www.solarserver.de/solar-magazin/anlage-des-monats/hydraulische-energiespeicher-fuer-den-ausbau-der-erneuerbaren.html>

Druckluftspeicher

<http://de.wikipedia.org/wiki/Druckluftspeicherkraftwerk>

<http://www.kraftwerk-wilhelms->

[haven.com/pages/ekw_de/Kraftwerk_Wilhelmshaven/Mediencenter/_documents/BBC_Huntorf_engl.pdf](http://www.kraftwerk-wilhelms-haven.com/pages/ekw_de/Kraftwerk_Wilhelmshaven/Mediencenter/_documents/BBC_Huntorf_engl.pdf)

http://www.dlr.de/portaldata/1/resources/standorte/stuttgart/broschuere_adele_1_.pdf

Flüssige Luft

http://www.messergroup.com/de/Presse/wpresse/111212_Highview/index.html
http://www.electricitystorage.org/search/structure_content/liquid_air_energy_storage_laes
http://portal.tugraz.at/portal/page/portal/Files/i4340/eninnov2012/files/lf/LF_Hermeling.pdf

Schwungräder

<http://de.wikipedia.org/wiki/Schwungrad>
<http://de.wikipedia.org/wiki/Schwungradspeicherung>
<http://mobil.elektronikpraxis.de/artikel/355190>
<http://cleantechnica.com/2011/08/11/pennsylvania-beacon-power-flywheel-energy-storage>

Gyrobus

<http://de.wikipedia.org/wiki/Gyrobus>
<http://www.fbw.ch/galerie/Gyrobus/gyrobus.HTM>
http://photo.proaktiva.eu/digest/2008_gyrobus.html

Chemische Speicher

<http://www.hems-renewables.de/energiekonzept-2050/chem-speicher.html>

Akkumulatoren

<http://de.wikipedia.org/wiki/Akkumulator>
<http://de.wikipedia.org/wiki/Vanadium-Redox-Akkumulator>
<http://www.ekz.ch/content/ekz/de/ueberuns/medien/medienmitteilungen/archiv2012/batteriespeicher.html>
<http://batterie-info.de/Thema/zink-luft-akku/>
http://www.energie-und-technik.de/energiequellen/news/article/82977/0/IBM_Lithium-Luft-Batterie-Prototyp_bis_2013/

Wasserstoff

<http://www.th.physik.uni-bonn.de/People/dreiner/HOME-PAGE/TEACHING/ENERGIE-Vortraege/Meinert-Energierferat.ppt>

Methan

http://www.erdgas.ch/fileadmin/customer/erdgasch/Data/Versorgung/Beschaffungsstrategie/faktenblatt_ve rsorgungssicherheit_d.pdf
<http://www.nzz.ch/aktuell/startseite/article99UKP-1.341903>
<http://www.zsw-bw.de/infoportal/presseinformationen/presse-detail/weltweit-groesste-power-to-gas-anlage-zur-methan-erzeugung-geht-in-betrieb.html>

Wärmespeicher

<http://www.heise.de/tp/artikel/34/34156/1.html>

Eine Fülle von Informationen über energiepolitische und energietechnische Themen finden Sie im Archiv auf der Website der AVES Regionalgruppe Pfannenstil unter:

www.aves-zh.ch