

**Vorlesung - Sommeruniversität Dessau
03.09.09**

**Energiespeicherung – Dr. Frank Täubner
rosseta Technik GmbH**

1. Einführung

Die Fragen der Speicherung von Energie bekommen durch den starken Ausbau der Energiegewinnung durch Windturbinen und Photovoltaik-Anlagen ein großes Interesse. Die Betreiber solcher Anlagen wünschen sich Speicher für elektrischen Strom, damit sie in die Lage kommen, eine möglichst dauerhafte Versorgung der Verbraucher am besten über das ganze Jahr zu realisieren.

Bisher sind industriell nur Bleibatterien breit eingeführt. Diese werden zu 90% als Starterbatterien für Autos verwendet und sind in ihren Eigenschaften gut bekannt. Sofern man die Bleibatterien zur Speicherung elektrischer Energie aus Solaranlagen benutzen möchte, sind die Autobatterien wenig geeignet. Sie verkraften die täglichen Zyklen Aufladen und Entladen nur schlecht. Es gibt dafür spezielle Solarbatterien. Die Eigenschaften und Preise sind in der folgenden Tabelle für einen typischen Vertreter dargestellt (www.oeko-energie.de):

Batterietyp	DETA Solar 196800138	
Kapazität in Abhängigkeit von den Entladungsbedingungen Gewicht der Batterie 64 kg Spezifisch 15 Wh/kg Größe 0,034 m ³	250 Ah	Bei 100 h Entladung Herstellerangaben
	160 Ah	Bei 10 h Entladung Typisch für einen Tag
	80 Ah = 960 Wh	Bei 10 h Entladung und 50 % Entladetiefe, nutzbar für 1000 Zyklen
Preis der Batterie	622 bis 372 Euro	Abhängig von Pb-Weltmarktpreis
Aufwand für Wartung	100 .. 50 Euro / Jahr ?	Sehr unterschiedlich für verschiedene Batterieanlagen
Preis der gespeicherten kWh	0,80 bis 0,50 Euro	

Tabelle 1 : Eigenschaften von Bleibatterien, geeignet für die Energiespeicherung

Zwei Probleme stören besonders stark. Das ist zum einem der hohe Preis, der für die Speicherung einer kWh elektrische Energie zu zahlen ist, und zum anderen ist es die relativ kurze Lebensdauer von etwa 2 bis 3 Jahren bei täglicher voller Nutzung der Batterien und der damit verbundene Aufwand für Wartung und Austausch. Die Nutzungsdauer kann verlängert werden, wenn die Batterien nicht so tief entladen werden und die Temperatur stabilisiert wird. Aber auch dann ist nach etwa 6 Jahren in jedem Fall die Batterie auszutauschen. Die Kosten steigen, da für die gleiche Speicherenergie jetzt eine größere Anzahl von Batterien eingesetzt werden muss. Bei preiswerten Batterien ist der Wartungsaufwand durch die erforderlichen Kontrollen der Säure höher.

Inzwischen gibt es eine ganze Reihe von neuen Batterien mit besseren Eigenschaften, die hinsichtlich Leistungsdichte und Lebensdauer besser sind. Allerdings sind diese Typen auch

drei- bis vier Mal so teuer, so dass die Bleibatterien immer Preisvorteile je gespeicherter kWh haben. Daher bleibt für stationäre Speicherung die Bleibatterie auch in Zukunft die erste Wahl, während für Elektroautos inzwischen insbesondere Li-Metall-Batterien wegen des geringeren spezifischen Gewichtes eingesetzt werden. Hier gibt es bisher nur Autos von Toyota und Honda mit Hybridantrieben zu kaufen, die zumindest schon mal einen kleinen Schritt in die Richtung des Antriebs ohne Benzin gegangen sind. Reine Elektroautos werden auch in den nächsten Jahren sich nur mit intensiver Förderung durch den Staat verbreiten, da die Kosten des Autos wesentlich höher sind und durch die Einsparung der Kraftstoffkosten nicht aufgewogen werden. Hinzu kommt noch die geringe Reichweite und die Ungewissheit, wie lange die Batterien wirklich durchhalten. Dazu wurde ein Konzept zur Vermietung von Batterien und zur Errichtung eines einigermaßen dichten Netzes von Batterietauschstationen entwickelt, das bereits von der Firma Better Place für Israel und Dänemark geplant wird. Sofern man eine längere Fahrt vor hat, muss dann alle 150 km die Batterie wechseln werden. Das erinnert ein wenig an das System der Postkutschen, die auch regelmäßig die Pferde wechseln mussten. Die Chancen damit die Verbrennungsmotoren in Deutschland ernsthaft zu verdrängen sind nach Meinung des Verfassers gering, solange es noch Benzin, Diesel oder irgend eine andere brennbare Flüssigkeit an der Tankstelle zu kaufen gibt. Jedoch könnten die Elektrofahrzeuge als Kurzstrecken-Leihwagen, zum Beispiel verfügbar an allen ICE-Bahnhöfen durchaus eine Chance bekommen.

2. Auf der Suche nach neuen Speichern

Als aufgeschlossener neugieriger Wissenschaftler fragt man sich natürlich, ob es nicht andere preiswerte Möglichkeiten der Speicherung von Energie gibt. Das wollen wir in diesem Kapitel einmal näher untersuchen.

Energiequelle	Beschreibung	Speicherbare Energie
Heim-Pumpspeicherwerk Größe wie ein Pool	2 x 3 x 3 = 18 m ³ Dichte 998 kg/m ³ 10 m Höhe	$mgh = 18 \times 998 \times 9,81 \times 10 =$ 1.762.300 Ws = 0,49 kWh
Ein Stahlblock hoch heben	Größe 2 x 2 x 2 = 8 m ³ Dichte 7800 kg/m ³ 5 m Höhe	$mgh = 8 \times 7800 \times 9,81 \times 5 =$ 3.060.000 Ws = 0,85 kWh
Ein Haus 1 m hochheben	25 t 1 m Höhe	$Mgh = 25.000 \times 9,81 \times 1 =$ 245.250 Ws = 0,07 kWh
Stahlfedern aufziehen	Typ D-445D Max. Federkraft 5.170 N Federweg 35 mm Gewicht 0,864 kg Größe 0,0082 m ³ Anzahl für 8 m ³ = 975	$n \times F \times s / 2$ $= 975 \times 5170 \times 0,035 =$ 176.400 Ws = 0,05 kWh
Den Mann im das Fitness- Studio schicken und arbeiten lassen	1 Stunde Radfahren Dauerleistung 80 W	0,08 kWh
Ein Pferd kaufen und im Kreis jagen	1 Stunde Dauerleistung 750 W	0,75 kWh

Tabelle 2 : Ungebräuchliche Methoden der Energiespeicherung und Erzeugung

Aus der Tabelle 2 wird deutlich, dass die Frage der Energiespeicherung nicht einfach so nebenbei gelöst werden kann, sondern nur einige wenige technisch anspruchsvolle Verfahren geeignet sein dürften. Bevor wir aber weitersuchen, wollen wir uns wenigstens kurz der Frage zuwenden, wofür wir wie viel Energie benötigen:

Vorgang	Beschreibung	Energiebedarf
Wasserkochen	Menge 1 l $c_p = 4183 \text{ J /kg /K}$	$V \times r \times c_p \times T =$ $0,001 \times 998 \times 4183 \times 80 =$ $334.000 \text{ Ws} =$ $0,093 \text{ kWh}$
Fernsehen	2 Stunden 500 W - Leistungsaufnahme	1 kWh
Leben zu Hause	1 Tag Kochen, Licht, manchmal Waschen, etwas Fernsehen usw,	5 kWh
Autofahren	etwa 100 km	15 kWh

Tabelle 3 : Energiebedarf

Aus der Tabelle wird deutlich, der Speicher für das Eigenheim sollte mindestens 5 kWh bringen aber 50 kWh wären natürlich besser. Beim geliebten Automobil benötigt man mehr, hier sind 15 kWh Pflicht und 100 kWh wären wünschenswert, wenn man so weiter wie bisher fahren möchte.

Nun schauen wir uns wieder weiter die nutzbaren Energiequellen unter dem Gesichtspunkt Bedarf eines Automobils an:

Energiequelle	Beschreibung	Nutzbare Energie
Diesel	Einmal voll tanken bitte = 40 l Dichte = 845 kg/m^3 Heizwert = 42 MJ/kg Wirkungsgrad = 30 %	$0,04 \times 845 \times 42 \times 0,3 =$ $426 \text{ MJ} = 426.000 \text{ kWs} =$ 118 kWh
Holz frisch aus dem Wald	Ein Arm voll = 30 kg Heizwert $6,8 \text{ MJ/kg}$ Wirkungsgrad = 30 %	$30 \times 6,8 \times 0,3 =$ $61,2 \text{ MJ} = 61.200 \text{ kWs} =$ 17 kWh
Holz luftgetrocknet	Einen Kofferraum voll 200 l Dichte 500 kg/m^3 entspricht 50 kg Heizwert 15 MJ/kg Wirkungsgrad 30 %	$50 \times 15 \times 0,3 =$ $225 \text{ MJ} = 225.000 \text{ kWs} =$ 62 kWh
Altreifen	4 Stück je 7 kg Heizwert 32 MJ/kg Wirkungsgrad 30 %	$4 \times 7 \times 32 \times 0,3 =$ $269 \text{ MJ} = 269.000 \text{ kWh} =$ 75 kWh

Tabelle 4 : Herkömmliche Speicher

Die Alternativen Holz oder anderes Brennmaterial statt Diesel oder Benzin klingen nicht sehr verlockend. Deshalb sehen wir uns als nächstes die bereits eingeführten Energiespeicher an:

Bleibatterie	5 Stück aus Tabelle 1 320 kg, 170 l Wirkungsgrad 80 % Lebensdauer 1000 Zyklen	670 Wh x 5 x 0,8 = 2,7 kWh für 2.000 Euro
Modernste Lithium-Batterie (www.gaia-akku.com) Energie pro Zelle 16 Wh Gewicht 320 g Spezifisch 50 Wh/kg Größe 0,13 l	320 kg = 1000 Stück das sind 130 l Wirkungsgrad 80% Lebensdauer 2000 Zyklen	12,8 kWh
Schwungradspeicher (www.rosseta.de)	Schwungrad T4 Leistung bis 100 kW Gewicht 300 kg spezifisch 17 Wh/kg Volumen 0,4 m ³ Lebensdauer unbegrenzt	Energie 5 kWh Vorsicht kein Langzeitspeicher Nur für 1.. 2 Stunden Laufzeit Aber Schnell-Laden möglich
Kondensatoren (www.maxwell.com) Typ BCAP3000P270 3000 F und 2,7 V Energie 2,25 Wh Leistung bis 3 kW Gewicht 0,55 kg Volumen 0,475 l	320 kg = 580 Stück Volumen 275 l Wirkungsgrad 80% Lebensdauer 10 Jahre Oder 1 Mio. Zyklen	Energie 1 kWh Aber bis 1,3 MW für 2 s

Tabelle 5 : Auf dem Markt eingeführte Energiespeicher

Als letztes schauen wir uns noch einige neue Ideen an, die zur Zeit untersucht werden oder vielleicht einmal in der Zukunft Gegenstand von Untersuchungen werden könnten.

Wasserstoff Achtung kein Langzeitspeicher Wasserstoff diffundiert durch Metall !	Heizwert 33 Wh/kg Dichte 0,0899 kg/m ³ 2 Flaschen zu 50 l mit 700 bar Gewicht 6,3 + 50 kg Wirkungsgrad 40%	2 x 0,05 x 700 x 0,0899 x 33 x 0,4 = 83 kWh
Druckluft	6 Flaschen zu 50 l mit 700 bar Druckluft Gewicht 210 kg + 144 kg Wirkungsgrad 60%	$p_1 \times V_1 \times \ln(p_1/p_0) \times 6 \times 0,6$ = $700 \times 10^5 \times 0,05 \times \ln(700) \times$ $6 \times 0,6 = 82 \text{ MJ} = 23 \text{ kWh}$
Heißes Wasser	200 l Temperaturdifferenz 70K Wirkungsgrad 80%	0,2 x 998 x 4183 x 70 x 0,8 = 46,7 MJ = 12,9 kWh
Masse $E = m \times c^2$	1 g Staub vollständig zu Energie umwandeln (verstrahlen ?)	0,001 x 299.792.000 ² = 8,98 x 10 ¹³ Ws = 25 GWh

Tabelle 6 : Zukunftsvisionen

3. Der Schwungradspeicher

Nach dem die Batterien ausführlich betrachtet wurden, soll die Speichermöglichkeit durch Schwungräder etwas näher untersucht werden.

Beim Schwungrad ist sofort klar, dass der Rand außen den größten Beitrag zur gespeicherten Energie leistet. Daher können wir einen einfachen Gedankenversuch machen, um mehr über den Zusammenhang von Speichervermögen und Materialeigenschaften zu erfahren.

Wir stellen uns einen frei im Vakuum rotierenden dünnen Ring eines noch später irgendwie auszusuchenden Materials vor. Der Ring drehe sich mit n Umdrehungen pro min und hat damit die Winkelgeschwindigkeit

$$\omega = 2 \pi n / 60$$

Die Zentrifugalkraft wirkt auf jede rotierenden Masse mit $F = m r \omega^2$.

Wir suchen uns nun ein kleines Massenelement aus dem Ring, was durch den Winkel $d\phi$ aus dem Ring herausgeschnitten ist. Das Massenelement des Ring hat die Masse

$$dm = \rho A r d\phi$$

Die Zentrifugalkraft für das Massenelement beträgt somit

$$dF = \omega^2 \rho A r^2 d\phi$$

Wir schneiden nun den Ring in zwei gleichgroße Teile und bestimmen die Kraft, die senkrecht auf die Schnittfläche wirkt durch Integration der jeweiligen Kraftkomponente über den halben Ring. Die Komponente erhalten wir, sofern das Koordinatensystem mit $\phi = 0$ senkrecht zur Schnittfläche gewählt wird, durch Multiplikation von dF mit $\cos \phi$. Die Integration von $-\pi/2$ bis $+\pi/2$ ergibt die Kraft

$$F_t = 2 \omega^2 \rho A r^2$$

Diese Kraft wirkt tangential auf beide Schnittflächen, daraus ergibt sich die Spannung in einer Schnittfläche zu

$$\sigma_t = F_t / 2A = \omega^2 \rho r^2 \quad (1)$$

Die tangentielle Spannung wird für die erreichbare Drehzahl des Ringes begrenzend sein, während die Spannung im Ring nur sehr geringe Werte annehmen wird, da sie ja an der innen und äußeren Fläche des Rings zu Null werden muss.

Als nächste interessieren wir uns für die im Ring durch die Rotation gespeicherte Energie. Diese berechnet sich zu:

$$E = J \omega^2 / 2$$

Und das Trägheitsmoment für den Ring ist auch schnell bestimmt, nach seiner Definition erhält man das Trägheitsmoment als Intergration des Quadrates des Radius über den zugehörigen Masselemente. Weil bei unserem Gedankenexperiment mit dem dünnen Ring

die ganze Masse sich auf ein und dem selben Radius befindet, wird das r^2 vor das Integral gezogen und die eigentliche Integration ist trivial. Wir erhalten als Trägheitsmoment des Rings $m r^2$. Damit kennen wir auch die Energie, die im Ring gespeichert ist:

$$E = m r^2 \omega^2 / 2 \quad (2)$$

Wenn man sich die Beziehung (1) noch einmal anschaut, so kann man in (2) $\omega^2 r^2$ durch $\sigma t / \rho$ ersetzen und erhält damit nach Division durch m die spezifische Energie;

$$E / m = \sigma t / 2\rho$$

Mit dieser einfachen Beziehung ist es jetzt möglich verschiedene Stoffe und Materialien hinsichtlich ihrer Eignung als Baumaterial für Schwungräder zu ordnen. Das erfolgte und in der folgenden Tabelle ist das Ergebnis dargestellt.

Material	Spezifische Energiedichte eines dünnen mit max. Drehzahl rotierenden Rings [Wh/kg]	Kosten des Materials [Euro/kg]
Kohlenstofffaser IMS	187	68
Kohlenstofffaser UTS	123	39
Quarzglasfaser	112	140
S2-Glasfaser	62	23
E-Glasfaser RD19	21	3
Stahldraht	18	
Stahl massiv	12	2

Tabelle 7 : Materialauswahl für Schwungräder

Tatsächlich ist ein großes Energiespeichervermögen nur mit Kohlenstofffasern zu erreichen. Die Fasern werden dabei mit Epoxidharz getränkt und auf einer spulenartigen Wickelform aufgewickelt. In der Rosseta Technik GmbH werden für die großen Schwungräder fünf Ringe gefertigt und zu einer Schwungscheibe zusammengebaut. Die verwendeten Fasern haben ein Gesamtgewicht von 100 kg, das Schwungrad dreht sich bei 25.000 Umdrehungen pro min. Der Außendurchmesser beträgt 700 mm und die Umfangsgeschwindigkeit beträgt 916 m/s oder 3.298 km/h. Das ist die dreifache Schallgeschwindigkeit und daher nur in einem guten Vakuum erreichbar. Der nutzbare Energieinhalt beträgt 5 kWh und die auf das Fasermaterial bezogene spezifische Energie 50 Wh/kg. Das ist nur noch ein knappes Drittel des Wertes aus Tabelle 7. Das hat zwei Gründe, zum einen muss der rotierende Außenring an der Stahlwelle innen befestigt werden und das erfordert viel Material, um ein Schwingen des Außenrings zu vermeiden. Und zum zweiten sind Sicherheitsfaktoren erforderlich, die unvermeidliche Streuungen der Materialeigenschaften und die Dauerfestigkeit berücksichtigen.

Um ein funktionierendes Energiespeicher zu erhalten, sind dann noch ein Stahlgehäuse, ein auf einer gemeinsamen Welle angeordneter elektrischer Motor-Generator und als Zusatzaggregate die Vakuumanlage und die Ölpumpe erforderlich. Somit sind für die gesamte Anlage ca. 17 Wh/kg erreicht.

Die Firma Rosseta Technik GmbH fertigt Schwungradspeicher in unterschiedlichen Konfigurationen, wie aus der folgenden Tabelle zu sehen.

Parameter	T2	T3	T4
Maximale Leistung	300 ...800 kW	3 ... 15 kW	20 ... 100 kW
Nutzbare Energie	4 kWh	... 115 Wh	5 kWh
Schwungrad	CFK	Stahl	CFK
Besonderheit	Für höchste Leistungen	geringe Kosten	Für geringe Leerlaufverluste
Anwendung	Straßenbahnnetz, Netz der Stromversorger, unterbrechungsfreie Stromversorgung	Roboter, Pressen, Hochregale	Inselnetze, BHKWs
Produktionsbeginn	2006	2009	2010 (geplant)

Tabelle 8 : Energiespeicherprogramm der rosseta Technik GmbH

Bei der Entwicklung der Speicher wurde sehr großer Wert auf geringen Wartungsaufwand, absolute Sicherheit und eine hohe Zuverlässigkeit der Systeme gelegt. Das Unternehmen hat 2006 einen ersten Speicher von Typ T2 in Zwickau am Straßenbahnnetz in Betrieb genommen. Im Frühjahr 2007 begann der Dauerlauf und nach einigen Kinderkrankheiten, die aber alle nur die Zusatzaggregate betrafen, läuft das System Tag und Nacht automatisch ohne Fehler und Probleme. In den zurückliegenden 12 Monaten gab es überhaupt keine Störungen. Der Wartungsaufwand ist minimal und beschränkt sich auf den Ölwechsel und eine Kontrolle des Systems einmal pro Jahr.

Das System hat umfangreiche Sicherheitseinrichtungen, die das gefahrenlose Betreiben erlauben. In der gesamten Entwicklungszeit seit 1998 wurden verschiedene Bersttests und Havarieversuche gefahren, die mehrfach das zuverlässige Funktionieren der Sicherheitseinrichtungen bewiesen. Selbst wenn es zu einem Crash kommt, ist der Energiespeicher so konstruiert, dass nichts unkontrolliert aus dem Gehäuse austritt und dass sich das Gehäuse nicht aus seiner Verankerung reißen kann.

4. Anwendung von Energiespeicher

Wir haben nun gesehen, dass drei große Gruppen von Speicher für elektrische Energie zur Verfügung stehen. Diese sind für die Speicherung von Energie aus Windturbinen und aus Solaranlagen nur ganz beschränkt geeignet. Der preiswerte Langzeitspeicher ist immer noch die Bleibatterie. Alternativen können in Zukunft vielleicht die Wasserstoffherzeugung, die Druckluftspeicherung oder auch die Erzeugung anderer chemischer Materialien (z.B. Methan oder reines Silizium) sein. Trotzdem wird die Speicherung großer Mengen Energie über längere Zeit immer viel Geld kosten und immer die schlechteste Variante sein.

Durch den Aufbau von großräumigen leistungsfähigen Verbundnetzen kann schon jetzt mit überschaubarem Aufwand ganz Europa mit erneuerbarer Energie versorgt werden. Dazu sind in Norwegen, Schweden und den Alpenländern ausreichende Möglichkeiten für Wasserkraftwerke vorhanden. Diese können bei Wind- und Sonnenflaute ohne jede Schwierigkeiten den Bedarf in Europa decken. Ob und wie stark dieser Weg gegangen wird, hängt von den Stromkonzernen, von der Regierungen und den Bürgern ab.

Energiespeicher werden jedoch in zwei Richtungen benötigt.

Zum einen für die vielen mobilen Geräte und für die Fahrzeuge. Die Frage der Umstellung auf Elektroautos haben wir hier diskutiert und die wird zumindest schrittweise kommen.

Zum zweiten ist die Kurzzeitspeicherung von Bremsenergie, die Verbesserung der Netzqualität und die Sicherung einer unterbrechungsfreien Stromversorgung eine Sache, die nur mit Energiespeichern erreicht werden kann.

Hier befinden sich Batterien, Schwungräder und Kondensatoren im Wettstreit und in guter gegenseitiger Ergänzung.

Batterien sind immer nötig, wenn über lange Zeit, sagen wir ab einer Stunde, Energie vorgehalten werden soll. Batterien sind relativ einfach aufgebaut und werden von vielen Anbietern verkauft. Die meisten USV-Anlagen (unterbrechungsfreie Stromversorgung) arbeiten mit Batterien. Problematisch ist der schleichende Ausfall, die Lebensdauer ist begrenzt, aber wann der Austausch nötig ist, kann nicht richtig vorhergesagt werden. Ärger machen weiter hohe Temperaturen, so dass Inselsystem mit Photovoltaik und Bleibatterien in den Ländern der dritten Welt mehr Ärger als Freude bereiten und regelmäßig neue Kunden kommen, die Bleibatterien auf Grund ihrer Erfahrungen hassen.

Schwungradspeicher sind für Speicherzeiten von Sekunden bis Minuten geeignet. Auf Grund ihrer Besonderheiten können sie aber bezüglich ihrer Abmessungen nicht beliebig klein gemacht werden. Außerdem haben die Speicher sehr hohe Anforderungen an die Entwicklung gestellt, so dass sie erst in Zukunft stärker verbreitet werden. In einer Reihe von Anwendungen sind Schwungradspeicher klar im Vorteil und schwer durch anderes zu ersetzen, das betrifft die Speicherung der Bremsenergie in Straßenbahnen, die Versorgung von Industriefahrzeugen, die schnell wieder aufgeladen werden müssen und die Stabilisierung von Netzen mit elektrischem Strom.

Die Energiespeicherung mit Kondensatoren ist in vielen elektrischen Geräten selbstverständlich. So haben alle Wechselrichter im Zwischenkreis Kondensatoren, die Energie speichern. Die speziell für die Energiespeicherung hergestellten Kondensatoren werden als schnelle Stromquelle in mobilen Anwendungen, bei Windkraftanlagen und sogar bei der Speicherung von Bremsenergie eingesetzt. Im Unterschied zu Schwungradenergiespeichern sind jedoch die Lösungen für hohe Energien und große Zuverlässigkeit eher selten, da hier die schleichenden Ausfälle einen höheren Wartungsaufwand bescheren.