

26. Schwankungen und Speicherung

Der Wind als Quelle der Bewegung ist völlig unpassend für ein maschinelles Fertigungssystem, denn während einer windstillen Zeit käme das gesamte Geschäft des Landes zum Erliegen. Vor der Ära der Dampfmaschine wurden Windmühlen verwendet, um Bergwerke zu entwässern; zwar waren dies kräftige Maschinen, doch sie arbeiteten sehr unregelmäßig, so dass bei windstillem Wetter die Bergwerke überflutet wurden und die Arbeiter untätig herumstanden.

William Stanley Jevons, 1865

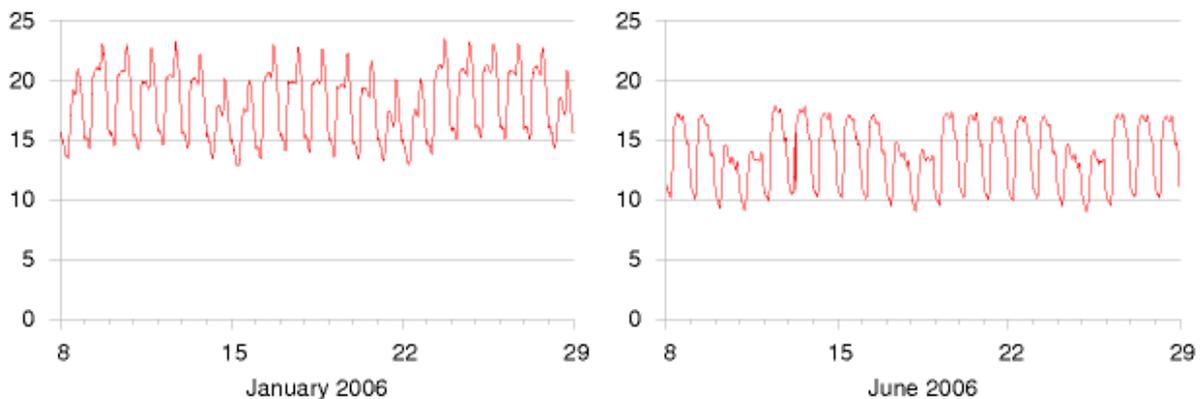


Fig.26.1: Elektrizitätsbedarf (in kWh/d pro Person) während dreier Wochen im Winter und im Sommer 2006 (Werte von Großbritannien). Die Spitzen im Januar sind jeweils um 18 Uhr abends. Die fünftägige Arbeitswoche sieht man im Sommer und im Winter. (Wenn Sie den nationalen Bedarf in GW ableiten wollen, erinnern Sie sich, dass das obere Ende der dargestellten Skala, 24 kWh/d pro Person, äquivalent mit 60 GW in Großbritannien ist.)

◦Wenn wir alle fossilen Brennstoffe weglassen und ausschließlich Erneuerbare, oder ausschließlich Atomkraft, oder einen Mix dieser beiden verwenden, könnten wir ein Problem haben. Die meisten der großen Erneuerbaren sind nicht beliebig an- und ausschaltbar. Wenn der Wind bläst und die Sonne herauskommt, dann ist Energie da, die man sich nehmen kann, doch nach vielleicht zwei Stunden ist sie wieder weg. Auch Kernkraftwerke sind normalerweise nicht dafür ausgelegt, beliebig an- und abgeschaltet zu werden. Normalerweise laufen sie durch und ihre abgegebene Leistung kann allenfalls auf einer Zeitskala von Stunden hoch- und runtergeregelt werden. Das ist ein Problem, denn im Stromversorgungsnetz muss Verbrauch und Produktion zu jeder Zeit gleich sein. Das Stromnetz kann keine Energie *speichern*. Damit ein Energieplan jede Minute an jedem Tag aufgeht, brauchen wir etwas, das *einfach an- und abzuschalten ist*. Es wird gemeinhin angenommen, dass dieses leicht an- und abschaltbare Etwas eine Energiequelle sein sollte, die an- und abgeschaltet wird, um die Fluktuationen der Versorgung relativ zum Verbrauch zu kompensieren (etwa ein Erdgaskraftwerk!) Doch ein anderer genauso effektiver Weg zum Angleichen von Versorgung und Verbrauch wäre es, einen leicht an- und abschaltbaren *Verbraucher* für die Leistung zu haben – eine Energie-Senke, die beim geringsten Anlass an- oder ausgeschaltet werden kann.

In jedem Fall muss das leicht ein- und ausschaltbare Etwas ein *großes* Etwas sein, denn die Schwankungen im Energiebedarf sind hoch (Fig.26.1). Manchmal schwankt der Bedarf signifikant auf einer Zeitskala von wenigen Minuten. Dieses Kapitel erklärt, wie man mit den Fluktuationen in der Versorgung und in der Nachfrage umgehen kann, ohne fossile Brennstoffe zu benutzen.

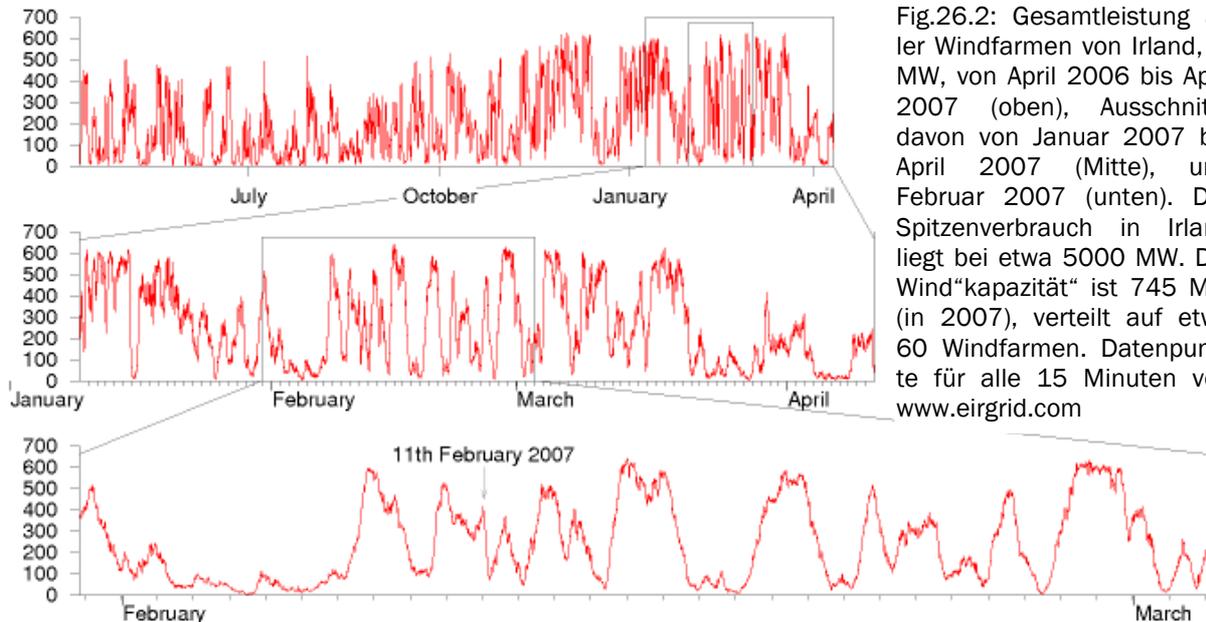


Fig.26.2: Gesamtleistung aller Windfarmen von Irland, in MW, von April 2006 bis April 2007 (oben), Ausschnitte davon von Januar 2007 bis April 2007 (Mitte), und Februar 2007 (unten). Der Spitzenverbrauch in Irland liegt bei etwa 5000 MW. Die Windkapazität ist 745 MW (in 2007), verteilt auf etwa 60 Windfarmen. Datenpunkte für alle 15 Minuten von www.eirgrid.com

Wie viel schwanken Erneuerbare?

Wie sehr wir die Erneuerbaren auch lieben, wir dürfen uns nicht über die Tatsache hinwegtäuschen, dass der Wind schwankt.

Kritiker der Windkraft sagen: „Windkraft ist intermittent¹⁹ und unvorhersagbar, deshalb kann sie keinen Beitrag zur Versorgungssicherheit leisten; wenn wir riesige Windfarmen bauen, brauchen wir ebensoviel fossile Wärmekraftwerke, damit wir bei Flaute Ersatz haben.“ Schlagzeilen wie „Rückgang des Windes löst in Texas Stromnotstand aus“ stärken diesen Standpunkt. Windkraftbefürworter spielen das Problem herunter: „Keine Sorge - einzelne Windfarmen mögen intermittent sein, aber zusammengenommen ist die Summe der Windkraft aus verschiedenen Gegenden weil weniger intermittent.“

Schauen wir auf die realen Zahlen, um einen objektiven Standpunkt zu finden. Fig.26.2 zeigt den summierten Output aller Windfarmen der Republik Irland von April 2006 bis April 2007. Sicherlich ist Wind intermittent, auch wenn wir viele über ein ganzes Land verteilte Turbinen aufsummieren. Deutschland ist etwas größer als Irland, doch das Problem bleibt das gleiche. Zwischen Oktober 2006 und Februar 2007 gab es 17 Tage, an denen der Output aller 1632 englischer Windmühlen unter 10% ihrer Nennkapazität blieb. Darunter waren fünf Tage mit einem Output von weniger als 5% der Nennkapazität und einer mit nur 2%.

Lassen Sie uns die Fluktuationen der landesweiten Windkraft quantifizieren. Die zwei Aspekte sind kurzzeitige Schwankungen und langandauernde Flaute. Lassen Sie uns die schnellste kurzzeitige Veränderung in einem Monat der Irland-Daten suchen. Am 11. Februar 2007 fiel die irische Windleistung stetig von 415 MW um Mitternacht auf 79 MW um 4 Uhr früh. Das ist eine Änderungsrate von 84 MW pro Stunde für eine landesweite Kapazität von 745 MW. (Mit Änderungsrate meine ich die Rate, mit der die abgegebene Leistung ansteigt oder abfällt – die Steigung des Graphen am 11. Februar.) OK: Wenn wir die deutsche Windenergie auf 33 GW Nennleistung hoch skalieren (so dass sie 10 GW im Mittel liefern kann), können wir gelegentliche Änderungsraten von

¹⁹ ♦Der Begriff „intermittent“ beschreibt ursprünglich das Verhalten nichtlinearer dynamischer Systeme beim Übergang in einen chaotischen Zustand. Im Zusammenhang mit Energiequellen wird er auch zur Beschreibung des schwankenden und unregelmäßigen Verhaltens, Intermittenz als qualitatives Maß für die Größe dieser unregelmäßigen Schwankungen verwendet.

$$84 \text{ MW/h} \times \frac{33.000 \text{ MW}}{745 \text{ MW}} = 3.700 \text{ MW/h}$$

erwarten, wenn Deutschland wie Irland ist.²⁰ Wir müssen also entweder Ersatz für die Windkraft mit derselben Rate von 3,7 GW pro Stunde *hochfahren* können – das sind, etwa, vier AKWs von Null auf hundert jede Stunde – *oder* wir müssen in der Lage sein, unseren *Verbrauch* um 3,7 GW pro Stunde zu *reduzieren*.

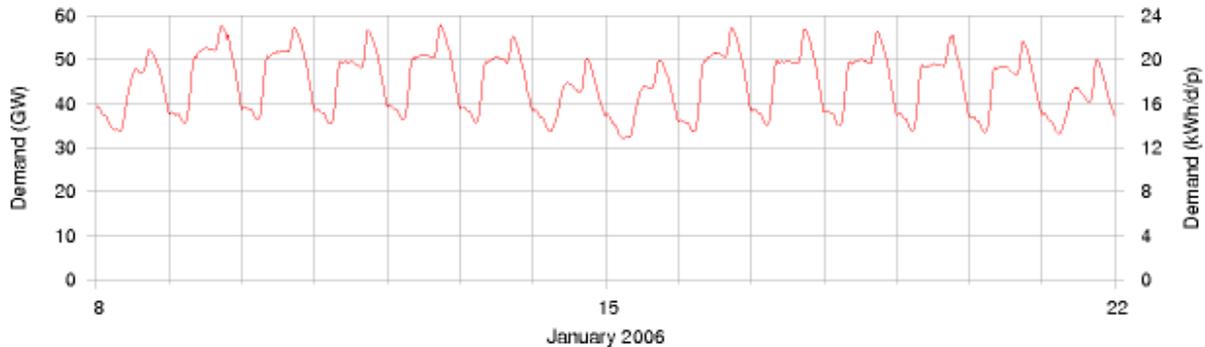


Fig.26.3: Elektrizitätsbedarf (Werte für Großbritannien) über zwei Wochen im Winter 2006. Die linke und rechte Skala zeigen den Bedarf jeweils in nationalen Einheiten (GWh) und in personalisierten Einheiten (kWh/d pro Person). Dies sind dieselben Daten wie in Fig.26.1.

Können solch windige Anforderungen überhaupt erfüllt werden? Für die Antwort dieser Frage müssen wir etwas näher über „Gigawatt“ sprechen. Gigawatt sind große, landesweite Einheiten für Leistung. Sie sind für ein Land, was eine Kilowattstunde-pro-Tag für den Einzelnen ist: eine nette passende Größe. Der mittlere (elektrische) Energieverbrauch Deutschlands ist etwa 70 GW. Wir können diesen nationalen Verbrauch mit dem persönlichen Verbrauch in Relation setzen: 1 kWh/d pro Person ist äquivalent mit 3,5 GW national. Wenn jeder täglich 20 kWh Elektrizität verbraucht, ist der nationale Energiebedarf 70 GW.

Ist eine nationale Änderungsrate von **4 GW pro Stunde** völlig außerhalb der menschlichen Erfahrung? Nein. Jeden Morgen, wie Fig.26.3. zeigt, steigt der Verbrauch um 13 GW von 6:30 Uhr bis 8:30 Uhr. Das ist eine Veränderungsrate von **6,5 GW pro Stunde**. Unsere Versorgungsingenieure sind also täglich mit Änderungsraten von mehr als 4 GW pro Stunde im nationalen Netz konfrontiert. Eine mögliche zusätzliche Änderungsrate um 4 GW pro Stunde durch plötzliche Windveränderungen ist kein vernünftiger Grund, die Idee landesweiter Windfarmen zu verwerfen. Sie ist ein Problem, vergleichbar mit den Problemen, die die Ingenieure bereits gelöst haben. Wir müssen einfach herausfinden, wie wir den dauernd veränderlichen Verbrauch und das dauernd veränderliche Angebot aufeinander abstimmen ohne fossile Brennstoffe. Ich sage nicht, dass dieses Problem schon gelöst wäre – nur dass es ein Problem von der selben Größenordnung wie andere, bereits gelöste, Probleme ist.

²⁰ *Dies gilt, wenn die Ursachen der Schwankungen landesweit korreliert sind, etwa abhängig von der Großwetterlage. Überlagern sich dagegen lokale, unabhängige Schwankungen, ist eine korrektere Abschätzung, mit der Quadratwurzel des Kapazitätsverhältnisses zu skalieren, also $84 \text{ MW/h} \times \sqrt{(33.000/745)} = 560 \text{ MW/h}$. Üblicherweise werden tatsächliche Superpositionen Elemente beider Aspekte beinhalten (also Schwankungen sowohl durch korrelierte als auch durch unkorrelierte Ereignisse ausgelöst sein) und der real auftretende Wert zwischen diesen beiden berechneten Extremen liegen. Für die weiteren Abschätzungen wird vom oberen Grenzwert ausgegangen.

OK, bevor wir nach Lösungen suchen, müssen wir noch das andere Problem des Windes betrachten: langanhaltende Flaute. Anfang Februar 2007 hatte Irland eine landesweite Flaute, die fünf Tage dauerte. Das war nichts Ungewöhnliches, wie Sie in Fig.26.2 sehen können. Flaute von zwei oder drei Tagen kommen mehrmals jedes Jahr vor.

Es gibt zwei Möglichkeiten, Flaute zu überbrücken. Entweder können wir Energie vor der Flaute irgendwo speichern, oder wir müssen während der gesamten Flaute den Bedarf reduzieren. (Oder ein Mix der beiden.) Wenn wir 33GW Windturbinen hätten, die im Mittel 10GW Leistung liefern, dann ist die Energiemenge, die wir entweder vorher speichern oder währenddessen einsparen müssen bei einer 5-tägigen Flaute

$$10 \text{ GW} \times (5 \times 24 \text{ h}) = 1200 \text{ GWh}$$

(Die Gigawattstunde (GWh) ist die griffige Energieeinheit für Nationen. Der deutsche Energieverbrauch ist etwa 1700 GWh pro Tag.)

Um diesen Wert zu personalisieren: Ein Energiespeicher von 1200 GWh für Deutschland ist äquivalent zu einem Energiespeicher von 15 kWh pro Person. Ein solcher Energiespeicher würde der Nation erlauben, auf 10GW über fünf Tage zu verzichten; oder äquivalent jedem einzelnen, auf 3 kWh Elektrizität pro Tag über fünf Tage.

Der Umgang mit Flaute und Änderungsraten

Wir müssen zwei Probleme lösen – Flaute (lange Perioden mit geringer Produktion erneuerbarer Energien), und Änderungsraten (kurzzeitige Schwankungen entweder im Verbrauch oder im Angebot). Wir quantifizierten diese Probleme unter der Annahme, dass Deutschland 33GW Windkraftanlagen hätte. Um Flaute in den Griff zu bekommen, müssen wir **größenordnungsmäßig 1.200 GWh Energie (20 kWh pro Person) speichern**. Die Änderungsrate, mit der wir zurecht kommen müssen, liegt bei **6,5 GW pro Stunde** (oder 0,1 kW pro Stunde pro Person).

Versorgungsseitige Maßnahmen zur Schwankungsanpassung

Manche Erneuerbare sind an- und abschaltbar. Hätten wir eine große Menge erneuerbare Leistung, die wir einfach an- oder ausschalten könnten, würden all die Probleme dieses Kapitels verschwinden. Länder wie Norwegen oder Schweden haben große und tiefe Wasserspeicher mit Kraftwerken, die sie an- oder ausschalten können. Wie könnten die Optionen für Deutschland aussehen?

Erstens, Deutschland könnte eine große Anzahl Müll- und Biomasse-Heizkraftwerke haben, die die Rolle der jetzigen Heizkraftwerke mit fossilen Brennstoffen übernehmen. Würden diese Kraftwerke an- und abschaltbar betrieben, hätte das Kosten, wie sie auch konventionelle Heizkraftwerke haben, die nur Teilzeit arbeiten: Ihre Generatoren stehen teils still, teils arbeiten sie doppelt hart; und die meisten Generatoren sind dabei weniger effizient als wenn sie gleichmäßig arbeiten. OK, abgesehen von den Kosten, die entscheidende Frage ist, wie groß unsere an- und abschaltbaren Ressourcen denn wären. Würden wir all unseren Hausmüll verbrennen, und dazu dieselbe Menge an landwirtschaftlichem Abfall, wäre die mittlere Leistung etwa 3 GW. Würden wir nun Anlagen für die doppelte Leistung bauen, also Verbrennungsanlagen für 6 GW installieren mit der Planvorgabe, sie nur in der Hälfte der Zeit in Betrieb zu haben, könnten sie 6 GW in Zeiten hoher Anforderung liefern und null dazwischen. Diese Heizkraftwerke könnten so gebaut werden, dass sie innerhalb einer Stunde an- und ausgeschaltet werden können und so Änderungsraten von 6 GW pro Stunde auffangen – doch nur bis zu einem Maximum der Schwankungshöhe von 6 GW! Das ist ein hilfreicher

Beitrag, doch nicht genug Schwankungshöhe, wenn wir mit Fluktuationen von 33 GW Wind zu tun haben.

Wie steht es mit der Wasserkraft? ♦In Deutschland sind 8,2 GW Wasserkraftwerksleistung installiert, die eine mittlere Leistung von 3 GW liefern, das ist ein Load-Faktor von 35%. ◦Also haben Wasserkraftwerke sicherlich Potential, an- und abgeschaltet zu werden. Zudem hat Wasserkraft die nette Eigenschaft, sehr schnell an- und abschaltbar zu sein, Glendoe, ein neues britisches Wasserkraftwerk mit 100 MW Kapazität, wird beispielsweise von aus zu an in 30 Sekunden schaltbar sein. Das ist eine Änderungsrate von 12 GW pro Stunde mit nur einem Kraftwerk! Ein ausreichend großer Park an Wasserkraftwerken könnte also die Schwankungen eines enormen Windparks auffangen. ♦Die deutsche Wasserkraft mit 8,2 GW installierter Spitzenleistung könnte schon einen guten Beitrag zur Netzstabilität leisten, oder? Richtig, und das ist auch bereits in großem Umfang realisiert. Ein Anteil von etwa 6 GW dieser installierten Leistung sind Pumpspeicher, die zum schnellen Ausgleich zwischen wechselnder Nachfrage und schwankendem Angebot eingesetzt werden.

Pumpspeicher-Kraftwerke

◦Pumpspeicher nutzen billige Elektrizität, um Wasser von einem tiefergelegenen See in einen höhergelegenen See zu pumpen, und generieren dann wieder Elektrizität, wenn es sich lohnt. Sie benutzen dabei Turbinen genau wie die in Wasserkraftwerken. ♦Der Anlagenwirkungsgrad (Effizienz) ist 75%.

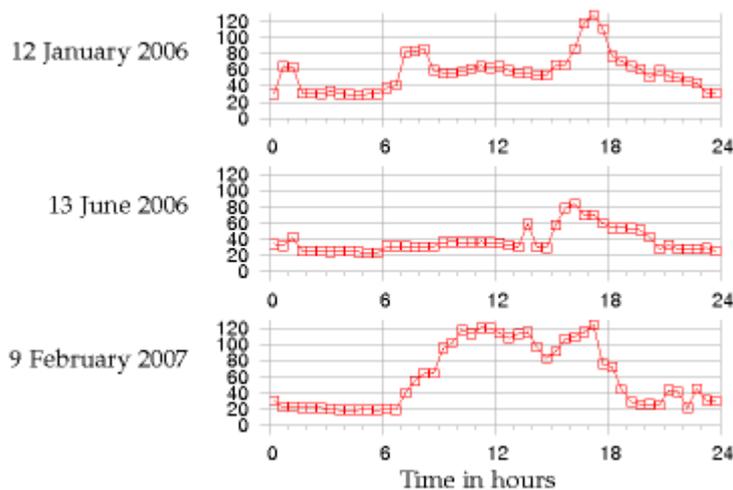


Fig.26.5: Wie sich Pumpspeicherwerke selbst finanzieren. Strompreise in £ pro MWh, an drei Tagen in 2006 und 2007.

♦Die Pumpspeicherleistung in Deutschland beträgt etwa 6 GW, die gesamte speicherbare Energie liegt bei 40 GWh. Das Pumpspeicherwerk Goldisthal in Thüringen hat eine Leistung von über 1000 MW. Damit ist es das größte Wasserkraftwerk Deutschlands und eines der größten Europas, vergleichbar mit Dinorwig in Großbritannien (vgl. Kasten). Sein Speichervolumen von etwa 12 Mio. m³ Wasser füllt einen 55 ha großen See. Um dieses Seebecken zu schaffen, wurde ein Berggipfel abgetragen. Bei der vorhandenen Höhendifferenz von knapp 350 m speichert es 8,5 GWh, genug für 8 Stunden Turbinenbetrieb.

Können Pumpspeicher ausgebaut werden? Ist es vorstellbar, das gesamte Flautenproblem über Pumpspeicher allein zu lösen?

Können wir 1200 GWh speichern?

♦Das seit Jahrzehnten geplante Pumpspeicherkraftwerk Riedl an der Donau nahe Passau soll 4,2 Millionen Kubikmeter Wasser in 350 m Höhe über dem Auslauf-Wasserspiegel der Donau speichern können. Das sind 4 GWh, etwa die Hälfte von Goldisthal. Das in Deutschland vorhandene Pumpspeicherpotential würde mit diesem Projekt, „das größte private Bauvorhaben in Ostbayern auf Jahrzehnte“, um etwa 10% erweitert.

◦Wir interessieren uns für den Aufbau eines viel größeren Speichersystems, das 1200 GWh speichern kann (♦etwa 130mal mehr als in Goldisthal◦). Und wir hätten gerne eine Maximalleistung von 20 GW – ♦etwa 10-20mal höher als Goldisthal◦. So sieht die Pumpspeicherlösung aus: Wir hätten etwa 12 neue Anlagen zu bauen, jede mit 100 GWh – ♦also 10mal mehr Energie als in Goldisthal. Die Pumpen und Generatoren an jeder Anlage wären etwa mit denen von Goldisthal vergleichbar.

◦Unter der Annahme, die Generatoren seien 90% effizient, stellt Tabelle 26.7 einige Möglichkeiten mit verschiedenen Höhendifferenzen vor, wie man 100 GWh speichern kann. (Für die Physik hinter dieser Tabelle siehe die Anmerkungen am Ende dieses Kapitels)

Pumpspeicher-Kraftwerke in England (UK)

◦England (UK) hat vier Pumpspeicher, die 30 GWh speichern können (Tabelle 26.4, Fig.26.6). Sie werden typischerweise eingesetzt, um übrige Elektrizität in der Nacht zu speichern um sie dann tagsüber zurückzuspeisen, insbesondere zu Zeiten von Spitzenverbrauch – ein profitables Geschäft, wie Fig.26.5 zeigt. Das Dinorwig-Kraftwerk – eine beeindruckende Kathedrale in einem Berg in Snowdonia – spielt so eine Sicherheitsrolle: es hat genug Power, um das nationale Netz nach einem Totalausfall wieder zu starten. Dinorwig kann einschalten, von 0 auf 1,3 GW Leistung, in 12 Sekunden.

Speicherwerk	Leistung (GW)	Höhe (m)	Volumen (Mio m ³)	gespeicherte Energie (GWh)
Ffestiniog	0,36	320-295	1,7	1,3
Cruachan	0,40	365-334	11,3	10
Foyers	0,30	178-172	13,6	6,3
Dinorwig	1,80	542-494	6,7	9,1

Tabelle 26.4: Pumpspeicherwerke in England. Die maximal speicherbare Energie ist etwa 30 GWh

Dinorwig ist die Königin der britischen Anlagen. Lassen Sie uns ihre Lebensgeschichte ansehen. Die gesamte Energie, die hier gespeichert werden kann, ist 9 GWh. Dinorwigs oberer See liegt etwa 500 m über dem unteren, und das Arbeitsvolumen von 7 Millionen m³ fließt mit maximal 390 m³/s, was eine Energieabgabe von 1,7 GW für 5 Stunden erlaubt. Der Anlagenwirkungsgrad (Effizienz) ist 75%. Werden alle vier Pumpspeicherkraftwerke gleichzeitig eingeschaltet, liefern sie 2,8 GW. Sie können extrem schnell eingeschaltet werden und so auf jede denkbare Änderungsrate reagieren, die durch Verbrauchsschwankungen oder Windfluktuationen auftreten kann. Doch reicht die Kapazität von 2,8 GW nicht aus, um 10 GW oder 33 GW Windenergie zu ersetzen, wenn sie plötzlich verloren geht. Die gesamte gespeicherte Energie ist 30 GWh.



Fig.26.6: Llyn Stawlan, der obere Speichersee des Ffestiniog Pumpspeicherwerks in Nord-Wales. Gespeicherte Energie: 1,3 GWh. Foto von Adrian Pingstone

Pumpspeicher-Ausbaupotential für England (UK)

◦Für Großbritannien habe ich folgende Vorschläge: Wir könnten sicher einige Anlagen wie Dinorwig allein in Snowdonia bauen. Tabelle 26.8 zeigt zwei Alternativen nahe Ffestiniog, wo zwei mit Dinorwig vergleichbare Anlagen gebaut hätten werden können. Diese Plätze wurden zusammen mit Dinorwig in den 1970ern erkundet, und Dinorwig wurde schließlich ausgewählt.

Ort	Leistung (GW)	Höhe (m)	Volumen (Mill. m ³)	gespeicherte Energie (GWh)
Bowydd	2,40	250	17,7	12,0
Croesor	1,35	310	8,0	6,7

Fig.26.8: Alternative Standorte für Pumpspeicherwerke in Snowdonia. An beiden Plätzen wäre das Unterwasser ein neuer künstlicher Stausee.

Pumpspeicher mit signifikant mehr Energiegehalt als Dinorwig könnten in Schottland gebaut werden, wenn man bestehende Wasserkraftwerke aufrüstet. Ein Kandidat würde Loch Sloy als oberen und Loch Lomond als unteren See verwenden. Es gibt bereits ein kleines Wasserkraftwerk, das die beiden Seen verbindet. Fig.26.9 zeigt diese Seen und die Seen Dinorwigs im gleichen Maßstab. Die Höhendifferenz zwischen Loch Sloy und Loch Lemond liegt bei etwa 270 m. Die Fläche von Loch Sloy ist etwa 1,5 km², und kann schon jetzt eine Energie von 20 GWh speichern. Würde man den Damm um 40 m erhöhen, kämen weitere 40 GWh hinzu. Der Wasserspiegel in Loch Lemond würde sich bei einem Zyklus um bis zu 0,8 m verschieben. Das ist weniger als die jahreszeitlichen Wasserspiegelschwankungen von Loch Lemond (2m).

Fig.26.10 zeigt 13 mögliche Plätze für Pumpspeicher in Schottland. (Die meisten davon haben bereits Wasserkraftwerke.) Wenn zehn von ihnen dasselbe Potential hätten, das ich soeben für Loch Sloy abgeschätzt habe, könnten wir 400 GWh speichern – ein Drittel der insgesamt 1200 GWh, die wir anstreben.

Wir könnten die Landkarte von Großbritannien nach weiteren Plätzen durchstöbern. Am besten wären Plätze nahe an Windfarmen. Eine Idee wäre, einen neuen künstlichen See in einem abschüssigen Tal zu erschaffen (am unteren Ende würde es durch einen Damm als Talsperre abgeschlossen) und das Meer als Unterwasser zu verwenden.

Denkt man noch weiter, jenseits von Seen und Staudämmen, könnte man sich vorstellen, eine Hälfte der Anlage in unterirdische Höhlen zu verlagern. Eine Pumpspeicherkammer einen Kilometer unter London wurde schon vorgeschlagen.



Dinorwig is the home of a 9GWh storage system, using Marchlyn Mawr (615E,620N) and Llyn Peris (590E,598N) as its upper and lower reservoirs.



Loch Sloy illustrates the sort of location where a 40GWh storage system could be created.

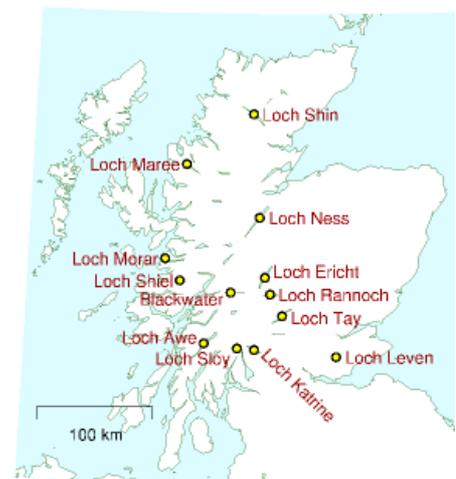


Fig.26.10: (oben) Lochs in Schottland mit Potential für Pumpspeicher

Fig.26.9: (links) Dinorwig im Snowdonia Nationalpark im Vergleich mit Loch Sloy und Loch Lomond. Die oberen Karten zeigen 10km x 10km, in den unteren Karten bezeichnet das blaue Gitter 1-km-Abstände. Bilder erstellt aus Ordnance Survey's Get-a-map service www.ordnancesurvey.co.uk/getamap. Bild mit Genehmigung von Ordnance Survey. © Crown Copyright 2006.

Speichermöglichkeiten für 100 GWh		
Höhendiff. vom Oberwasser	Erforderliches Arbeitsvolumen (Mio m ³)	Beispiel f. Seegröße Fläche Tiefe
500m	80	2 km ² x 40m
500m	80	4 km ² x 20m
200m	200	5 km ² x 40m
200m	200	10 km ² x 20m
100m	400	10 km ² x 40m
100m	400	20 km ² x 20m

Tabelle 26.7: Pumpspeicher. Möglichkeiten 100 GWh zu speichern. Zum Vergleich mit Spalte 2: Das Arbeitsvolumen von Goldisthal ist 12 Millionen m³ und das Volumen des Königssees 500 Millionen m³. Zum Vergleich mit Spalte 3: der Chiemsee hat 80 km², der Wannsee 2,7 km². Der Speichersee des Kraftwerks Uppenborn bei Moosburg hat 1,4 km² und 3 Millionen m³ Volumen.

♦Ist es plausibel, dass 12 solche Stellen gefunden werden könnten? Vorschläge für Großbritannien sind im Kasten oben zusammengestellt, für Deutschland überlasse ich es dem geneigten Leser als Übungsaufgabe. Ich denke, durch den Bau von Pumpspeichern könnten wir unsere Energiespeicherkapazität von 40 GWh auf 100 GWh oder vielleicht 200 GWh erhöhen. ◦Die erhofften 1200 GWh erreichen wir aber nur zäh. Glücklicherweise gibt es eine andere Lösung.



Fig.26.11: (unten) Okinawa Pumpspeicherkraftwerk, dessen Unterwasser der Ozean ist. Gespeicherte Energie: 0,2 GWh. Foto mit freundlicher Genehmigung von J-Power www.ieahydro.org

Verbrauchsmanagement mit Elektrofahrzeugen

◦Um unsere Anforderungen zu rekapitulieren: Wir würden gerne 1200 GWh speichern oder einsparen können – das sind 20 kWh pro Person – und mit Versorgungsschwankungen von bis zu 33 GW klarkommen – das sind 0,5 kW pro Person. Diese Zahlen sind herrlich gleich groß wie die Energie- und Leistungsanforderungen von Elektrofahrzeugen. Die Elektroautos, die wir in Kapitel 20 sahen, hatten Energiespeicher zwischen 9 kWh und 53 kWh. Eine nationale Flotte von 30 Millionen Elektroautos würde eine Energie vergleichbar mit 20 kWh pro Person speichern können. Typische Batterieladegeräte ziehen eine Leistung von 2 bis 3 kW. Schaltet man die 30 Millionen Batterieladegeräte gleichzeitig, ändert das den Verbrauch um etwa 60 GW! Die mittlere Leistung, die man benötigt, um den gesamten nationalen Transport zu versorgen, wenn alles elektrisch lief, ist etwa 40 oder 50 GW. Es gibt also eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Einführung von Elektroautos wie in Kapitel 20 vorgeschlagen und dem Aufbau von etwa 33 GW Windkraftanlagen, die 10 GW Leistung im Mittel abgeben.

Hier ist ein Weg, diese Übereinstimmung auszunutzen: Elektroautos könnten in intelligente Ladegeräte eingesteckt werden, zu Hause oder am Arbeitsplatz. Diese Ladegeräte kennen sowohl den Wert der Elektrizität als auch die Anforderungen der Fahrer (z.B. „Mein Auto muss voll sein bis Montag morgens um 7 Uhr.“) Das Ladegerät würde nun die Anforderungen des Benutzers sensibel erfüllen und Energie saugen, wenn der Wind bläst und abschalten, wenn der Wind aufhört oder andere Verbrauchs-

formen zunehmen. Diese intelligenten Ladegeräte liefern einen sehr nützlichen Beitrag zur Netzstabilisierung, der natürlich finanziell vergütet werden könnte.

Eine besonders stabile Lösung wäre es, wenn die Autobatterien austauschbar wären. Stellen Sie sich vor, an eine Tankstelle zu fahren und ein Set neuer Batterien einzusetzen als Austausch für die leergefahrenen. Die Tankstelle wäre für das Wiederaufladen der Batterien verantwortlich und könnte das zu den perfekten Zeiten durchführen und die Ladegeräte so an- und ausschalten, dass Angebot und Verbrauch immer im Gleichgewicht sind. Austauschbare Batterien sind eine besonders stabile Lösung, weil Millionen von Austauschbatterien in den Lagern der Füllstationen stehen. Diese Reservebatterien gäben einen zusätzlichen Puffer für Windflauten. Einige Leute sagen: Horror! Wie könnte ich der Füllstation vertrauen, dass sie sorgfältig auf meine Batterie achtet?“ Gut, aber ebenso gut könnte man heute fragen: „Was wenn die Tankstellen Benzin mit Wasser verschneiden?“. Ich würde viel lieber ein Auto fahren, das von Profis gewartet wird als durch einen Muppet wie mich!

Lassen Sie mich unsere Optionen rekapitulieren. Wir können fluktuierenden Verbrauch und fluktuierendes Angebot ausgleichen, indem wir *Generatoren* an- und abschalten (Müllverbrennung und Wasserkraftwerke zum Beispiel), indem wir Energie irgendwo *speichern* und wiedereinspeisen, wenn sie gebraucht wird und indem wir den *Verbrauch* an- oder abschalten.

Die vielversprechendste dieser drei Optionen ist das an- und ausschalten des Verbrauchs beim Laden von Elektrofahrzeugen. 30 Millionen Autos, jedes mit einer 40 kWh Batterie (einige davon könnten Wechselbatterien sein, die in den Lade-Tankstellen liegen) addieren sich zu 1200 GWh. Würde man zudem den Frachttransport elektrifizieren, wäre die gesamte Speicherkapazität natürlich entsprechend höher.

Die Windkraft und die Elektrofahrzeuge passen deshalb wunderbar zusammen. Wenn wir Elektrofahrzeuge und Windkraft mit derselben Rate aufstocken, etwa 3000 neue Fahrzeuge für 3MW Windturbinen, und wenn wir sicherstellen, dass die Ladesysteme für die Elektroautos intelligent gesteuert sind, würde diese Synergie ein gutes Stück zur Lösung des Wind-Fluktuationsproblems beitragen. Wenn sich meine Vorhersage zu Wasserstoffautos als falsch erweist und sich Wasserstoffautos als die Niederenergie-Fahrzeuge der Zukunft herausstellen, dann könnte sich natürlich dieselbe Synergie ergeben, weil Wind-und-Wasserstoff genauso gut zusammenpasst wie Wind-und-Elektroauto. Die Windturbinen erzeugen Elektrizität; und wann immer Elektrizität ausreichend vorhanden ist, würde man Wasserstoff erzeugen und in Tanks lagern, um ihn später zu benutzen, ob in Fahrzeugen oder in anderen Anwendungen.

Für große Mengen von so erzeugtem Wasserstoff ist die Lagerung in Tanks unhandlich und vielleicht auch zu kostspielig. Aber es gibt eine elegantere Methode, das Lagerproblem zu lösen. Wir kommen darauf weiter unten zurück, wenn wir die Probleme mit den jahreszeitlichen Schwankungen betrachten.

Weitere Ideen zu Verbrauchsmanagement und Speicherung

◦Es gibt noch weitere Ideen zu diesem Themenfeld, die ich kurz anreißen will.

Die Anpassung der Produktionsrate in der industriellen Fertigung an die verfügbare Energiemenge ist nicht neu. Viele Aluminium produzierende Betriebe sitzen nahe an Wasserkraftwerken; je mehr es regnet, um so mehr Aluminium wird produziert. Wo immer Energie zur Produktion von lagerbaren Gütern verwendet wird gibt es ein Potential, den Energiebedarf intelligent an- und abzuschalten. Meerwasserentsalzung durch reverse Osmose etwa (Siehe Seite 105) ist ein Haupt-Energieverbraucher in vielen

Ländern (allerdings nicht in Deutschland). Ein anderes lagerbares Gut ist Wärme. Wenn wir, wie in Kapitel 21 angedacht, Gebäudeheizungen elektrifizieren, dann schafft auch das Potential für leicht an- und abschaltbaren Elektrizitätsverbrauch im Stromnetz. Gut isolierte Gebäude halten die Wärme für viele Stunden und haben daher eine gewisse Flexibilität, zu welcher Zeit sie heizen. Zudem kann man große thermische Reservoirs in den Gebäuden anlegen, und durch Wärmepumpen in Zeiten reichen Stromangebots Wärme in diese oder aus diesen Reservoirs zu pumpen; und dann durch einen zweiten Satz Wärmepumpen die Wärme oder Kälte bei Bedarf an die entsprechenden Plätze im Gebäude verteilen.

Den Elektrizitätsbedarf automatisch zu kontrollieren wäre nicht sehr schwer. Das einfachste wäre, wenn Geräte wie Kühlschränke oder Gefriertruhen auf die Frequenz der Spannungsversorgung sensitiv wären. Gibt es Stromknappheit im Netz, fällt die Frequenz unter den Standardwert von 50 Hz, liegt Energieüberschuss vor, erhöht sich die Frequenz über 50 Hz. (Es ist wie bei einem Fahrraddynamo: Wenn das Licht an ist muss man härter treten, um die zusätzliche Leistung zu bringen; tut man das nicht, wird das Fahrrad ein bisschen langsamer.) Kühlschränke könnten so modifiziert werden, dass sie ihren Thermostat ein kleines Stück nach oben oder unten drehen in Abhängigkeit von der Netzfrequenz, so dass sie, ohne natürlich die Temperatur Ihrer Butter zu gefährden, dazu neigen, Strom nur dann aus dem Stromnetz zu ziehen, wenn es dieses damit stabilisiert.

Kann Bedarfssteuerung ein signifikantes Stück virtueller Speicherkapazität beitragen? Wie groß ist die Leistung der Kühlschränke einer Nation? Ein typischer Kühlschrank zieht etwa 18 W; schätzen wir die Anzahl der Kühlschränke auf 30 Millionen ab. Die Möglichkeit, alle Kühlschränke der Nation einige Minuten an- und abzuschalten wäre somit äquivalent zu 0,54 GW automatisch anpassungsfähiger Leistung. Das ist eine ganze Menge – über 1% des nationalen Gesamtverbrauchs – und ist etwa so groß wie der plötzliche Verbrauchsanstieg, der durch Leute verursacht wird, die in einem Akt religiöser Betrachtung (z.B. wenn sie die „Lindenstraße“ ansehen) gleichzeitig ihre Wasserkessel einschalten. Solche „TV Spitzen“ generieren typische Verbrauchsanstiege im Bereich von 0,6 bis 0,8 GW. Automatisches Schalten der Kühlschränke würde *beinahe* diese täglichen Spikes des gemeinschaftlichen Teewasserkochens ausgleichen. Die intelligenten Kühlschränke könnten in gleicher Weise kurzzeitige Schwankungen der Windleistung ausbügeln. Die TV-Spitzen in Verbindung mit den Allerheiligsten Akten der Betrachtung (*beispielsweise wenn Deutschland gegen England spielt) können plötzliche Anstiege von über 2 GW erzeugen. Bei solchen Gelegenheiten kann der Verbrauch und die Produktion nur im Gleichgewicht gehalten werden durch die volle Macht von Goldisthal *und* Dinorwig.

◦Um den Netzmanagern, die laufend Kraftwerke an- und ausschalten um Verbrauch und Angebot anzugleichen, weitere Flexibilität zu geben, ist mit vielen industriellen Stromkunden vertraglich vereinbart, dass die Netzmanager den Verbrauch des Kunden mit sehr kurzer Vorwarnzeit an- und abschalten können. In Südafrika (wo häufig Stromknappheit herrscht) sind funkgesteuerte Verbrauchs-Managementsysteme in Hunderttausenden von Wohnungen installiert, die Klimaanlageanlagen und Wasserboiler steuern.

♦Der Stromnetzbetreiber Tepco in Japan, dessen Netz durch den Ausfall der Fukushima-Reaktoren arg destabilisiert ist, informiert via Internet seine Kunden im 5-Minuten-Takt über die aktuelle Netzauslastung und die gerade verfügbaren Reservekapazitäten. So werden bei Notabschaltungen viele nicht unvorbereitet getroffen und die Menschen sind in der Lage, durch diszipliniertes Verhalten Stromverbraucher gerade in den versorgungskritischen Zeiten abzuschalten.

Stromverbund - Dänemarks Lösung

◦Und so bekommt Dänemark die Intermitzenz ihrer Windkraft in den Griff: Die Dänen zahlen effektiv für Wasserkraftwerke anderer Länder, um deren Speicherkapazität nutzen zu dürfen. Fast die gesamte dänische Windenergie wird an die europäischen Nachbarn exportiert, von denen einige Wasserkraft haben, die sie zurückfahren, um das dänische Windangebot wieder auszugleichen. Die ersparte Wasserkraft wird dann (zu einem höheren Preis) an die Dänen zurückverkauft, wenn dort hoher Verbrauch bei wenig Wind herrscht. Unter dem Strich steuert dänische Windkraft nützliche Energie bei, und das Gesamtsystem hat ausreichende Stabilität dank der Kapazität der Wasserkraftwerke.

♦Auch Deutschland steht in einem dauernden Stromverbund mit seinen Nachbarstaaten. Gerade der Import des nachbarlichen Atomstroms ist Gegenstand reger Diskussionen. Können wir auch unseren Überschuss-Strom bei unseren Nachbarn zwischenlagern? Österreich besitzt etwa 5 GW Pumpspeicher-Kapazität, die Schweiz etwa 3,5 GW.

Ein Stromverbund für England

◦Wie sieht es mit England aus? Wegen der Insellage ist der Stromaustausch mit seinen Nachbarn erschwert. England bräuchte direkte Verbindungsleitungen zu Ländern mit großen Mengen an- und abschaltbarer Wasserkraft-Kapazität; oder eine große Verbindung zum europaweiten Netz. Norwegen hat 27,5 GW Wasserkraft-Kapazität, Schweden etwa 16 GW und Island 1,8 GW. Eine 1,2 GW HVDC-Verbindung nach Norwegen wurde bereits 2003 vorgeschlagen, aber nicht gebaut. ♦Eine Verbindung nach Holland – der BritNed Interkonnektor mit einer Kapazität von 1 GW – ging am 1. April 2011 in Betrieb [6be3zk7]. ◦Dänemarks Windkapazität ist 3,1 GW, und hat Verbindungen mit 1 GW nach Norwegen, 0,6 GW nach Schweden und 1,2 GW nach Deutschland, also insgesamt 2,8 GW Exportkapazität, ähnlich im Umfang wie seine Windkraft-Kapazität. Um seine überschüssige Windkraft auf die dänische Art zu exportieren, bräuchte England (mit angenommenen 33GW Windkapazität) Verbindungen in den Größenordnungen 10 GW nach Norwegen, 8 GW nach Schweden und 1GW nach Island.

Eine Lösung mit zwei Stromnetzen

◦Ein radikaler Ansatz ist, die Windkraft in ein separates zweites Netz zu speisen und damit Geräte zu betreiben, die keine verlässliche Stromzufuhr brauchen, etwa Heizungen oder Autobatterie-Ladegeräte. Seit über 25 Jahren (seit 1982) gibt es auf der schottischen Insel Fair Isle (70 Einwohner, 5,6 km²) zwei Stromnetze, die die Leistung von zwei Windturbinen und bei Bedarf eines Dieselaggregates verteilen. Die Standard-Stromversorgung wird auf dem einen Netz sichergestellt, und Elektroheizungen werden über einen zweiten Kabelstrang beliefert. Das Heizungs-Stromnetz wird hauptsächlich durch überschüssige Windenergie gespeist, die andernfalls verloren wäre. Fernprogrammierbare frequenzsensitive Relais steuern die individuellen Wasserboiler und Speicheröfen in den Privathäusern der Gemeinde. Die Frequenz der Versorgungsleitung wird benutzt, um den Heizungen zu sagen, dass sie sich anschalten sollen. In der Tat gibt es sechs Frequenzkanäle pro Haushalt, wodurch das



PRODUCTION	CONSUMPTION
Wind: 4.1	Heating: 2.5
Diesel: 1.8	Other: 2.9

Fig.26.12: Stromproduktion und -verbrauch auf Fair Isle, 1995-96. Alle Zahlen in kWh/d pro Person. Die Produktion übersteigt den Verbrauch, weil 0,6 kWh/d pro Person wegwerfen werden.

System sieben Netze emuliert. Fair Isle führte auch erfolgreiche Versuche mit einem kinetischen Energiespeichersystem (einem Schwungrad) durch, das Energieschwankungen der Windstärke auf einer Zeitskala von 20 Sekunden speichert.

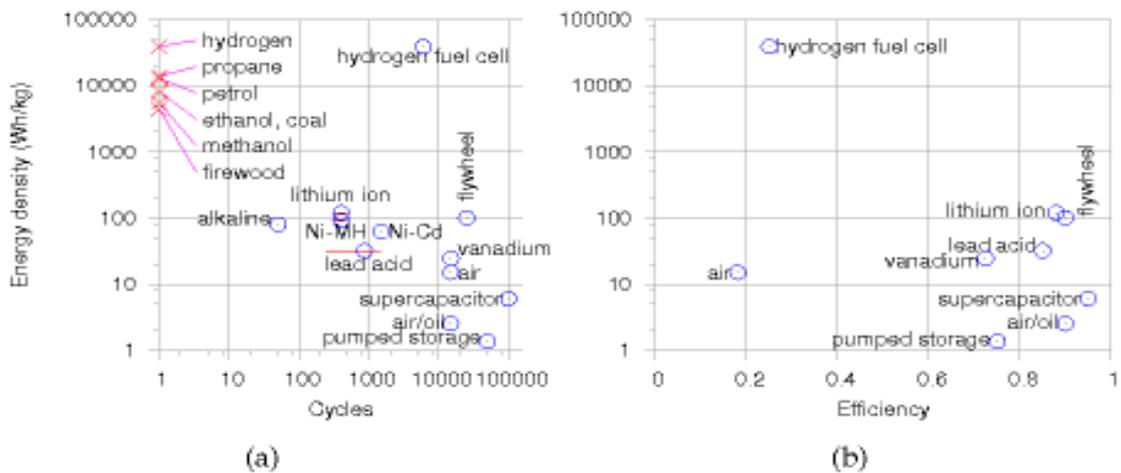


Fig.26.13: (oben) Einige Eigenschaften von Speichersystemen und Brennstoffen. (a) Energiedichte (in logarithmischer Skala) vs. Lebensdauer (Anzahl der Zyklen). (b) Energiedichte vs. Effizienz. Die Energiedichten berücksichtigen keine Masse für Behälter, außer bei Pressluft. Berücksichtigt man das Gewicht eines Kryotanks für Wasserstoff, reduziert sich die Energiedichte von Wasserstoff von 39.000 Wh/kg auf etwa 2.400 Wh/kg.

Brennstoff	Brennwert (kWh/kg)	Brennwert (MJ/l)
Propan	13,8	25,4
Benzin	13,0	34,7
Diesel (DERV)	12,7	37,9
Kerosin	12,8	37
Heizöl	12,8	37,3
Ethanol	8,2	23,4
Methanol	5,5	18,0
Bioethanol		21,6
Kohle	8,0	
Brennholz	4,4	
Wasserstoff	39,0	
Erdgas	14,85	0,04

Tabelle 26.14 (Mitte) Brennwerte (Energiedichten, pro kg und pro Liter) einiger Brennstoffe (in kWh pro kg und MJ pro Liter). (unten) Energiedichte einiger Batterien (in Wh pro kg). 1 kWh = 1000 Wh.

Batterietyp	Energiedichte (Wh/kg)	Lebensdauer (Zyklen)
Nickel-Cadmium	45–80	1500
NiMH	60–120	300–500
Bleiakku	30–50	200–300
Lithium-Ionen	110–160	300–500
Li-Ionen-Polymer	100–130	300–500
wiederaufladbare Alkali-Batterie	80	50

Elektroautos als Generatoren

Wenn 30 Millionen Elektroautos bereit wären, ihre Ladegeräte in Zeiten nationaler Energieknappheit umgekehrt laufen zu lassen und Energie ins Netz zurückzuspeisen, ergäbe das bei 2 kW pro Fahrzeug ein Gesamtvolumen von 60 GW – vergleichbar mit der Gesamtkapazität aller Elektrizitätswerke des Landes. Wenn nur jedes dritte Fahrzeug

zum Zeitpunkt des Bedarfs verbunden und verfügbar wäre, würden sie sich immer noch zu einer potenziellen Quelle von 20 GW summieren. Würde jedes der Fahrzeuge eine Notfallabgabe von 2kWh leisten – was etwa 20% seiner Batterie-Ladefähigkeit entspräche – würde die gesamte Flotte so 20 GWh Energie liefern – ♦mehr als doppelt so viel wie der Pumpspeicher Goldisthal.

Andere Speichertechnologien

◦Es gibt viele Möglichkeiten Energie zu speichern und viele Kriterien, nach denen man diese Lösungen beurteilen kann. Fig.26.13 zeigt drei der wichtigsten Kriterien: Energiedichte (wie viel Energie kann pro kg Speichermedium gespeichert werden), Effizienz (wie viel Energie erhält man pro eingebrachter Einheit wieder zurück) und Lebensdauer (wie viele Ladezyklen kann man durchführen, bis man das System erneuern muss). Andere wichtige Kriterien sind: die maximale Rate, mit der Energie in das und aus dem Speichersystem gepumpt werden kann, oft ausgedrückt in Leistung pro kg; die Zeitspanne wie lange die Energie im System verbleiben kann und natürlich Kosten und Sicherheit des Systems.

Schwungräder

Fig.26.15 zeigt ein Monster-Schwungrad, das kurze Leistungs-Bursts bis 0,4 GW in einer Experimentieranlage erzeugt. Es wiegt 800 t. Wenn es sich mit 225 Umdrehungen pro Minute dreht, speichert es 1000 kWh, seine Energiedichte ist also etwa 1 Wh pro kg. Ein Schwungrad-Energiespeicher in einem Rennauto kann 400 kJ (0,1 kWh) speichern und wiegt 24 kg (Seite 142). Das ist eine Energiedichte von 4,6 Wh/kg. Hochgeschwindigkeits-Schwungräder aus Spezialmaterialien erreichen Energiedichten bis 100 Wh/kg.



Fig.26.15: eines der beiden Schwungräder an der Fusionsforschungsstätte Culham, in Bau. Foto EFDA-JET. www.jet.efda.org

Superkondensatoren

Superkondensatoren sind geeignet, um kleine Mengen elektrischer Energie (bis zu 1kWh) zu speichern, wenn viele Operationszyklen erforderlich sind, und das Laden schnell gehen muss. Etwa beim regenerativen Bremsen von Fahrzeugen, die viele Starts und Stopps machen, sind Superkondensatoren den Batterien vorzuziehen. Sie können Superkondensatoren mit Energiedichten von 6 Wh/kg kaufen. Die US-Firma EESstor behauptet, mit Barium-Titanat viel bessere Superkondensatoren herstellen zu können, mit Energiedichten von 280 Wh/kg.

Vanadium-Redox-Akkumulatoren

VRB Power Systems haben ein 12 MWh Speichersystem für die Sorne Hill Windfarm in Irland geliefert, deren aktuelle Kapazität „32 MW“ ist, und auf „39 MW“ erhöht werden soll (VRB steht für Vanadium-Redox-Batterie). Dieses Speichersystem ist eine große Flüssigbatterie, eine wiederaufladbare Redox-Speicherzelle, mit einigen Tanks voll Vanadium in verschiedenen chemischen Zuständen. Dieses Speichersystem kann den Output der Windfarm auf einer Zeitskala von Minuten glätten, doch die maximale Zeit, für die sie ein Drittel der Windfarm-Leistung während einer Flaute aufrechterhalten kann, ist eine Stunde.

Ein 1,5 MWh Vanadium-System kostet 480.000 \$ und belegt 70 m² Platz mit einer Masse von 107 Tonnen. Seine Lebensdauer liegt bei über 10.000 Zyklen. Es kann genauso schnell geladen wie entladen werden (im Unterschied zu Bleiakkus, die fünfmal langsamer aufgeladen werden müssen), seine Effizienz ist bei 70-75% für den Zyklus.

Man braucht etwa 1 m³ 2-molares Vanadium in Schwefelsäure um 20 kWh zu speichern. (Das sind 20 Wh/kg.)

10 GW zu speichern erfordert also 500.000 m³ (170 Schwimmbäder) – etwa mit 2 m Tankhöhe auf 500m x 500m realisierbar.

Die Vanadiumtechnologie in die Größenordnungen von Pumpspeichern – 10 GWh – hochzuskalieren dürfte nennenswerten Einfluss auf den Vanadium-Weltmarkt haben, doch gibt es keine langfristige Knappheit von Vanadium. Die derzeitige weltweite Produktion von Vanadium ist 40.000 t pro Jahr. Ein 10GWh-System benötigt 36.000 t Vanadium, also etwa eine Jahresproduktion. Vanadium wird gegenwärtig als Nebenprodukt anderer Prozesse hergestellt, die gesamten Vanadiumreserven der Welt werden auf 63 Millionen Tonnen geschätzt.

„ökonomische“ Lösungen

In der heutigen Welt, die keine Kosten auf CO₂-Verschmutzung legt, ist die finanzielle Hürde, die ein Speichersystem nehmen muss, eine hässliche Alternative: Speicherung kann simuliert werden, indem man einfach ein zusätzliches Gasheizkraftwerk für zusätzlichen Verbrauch errichtet und überschüssige Energie in Heizgeräten verbrät.

Jahreszeitliche Schwankungen

Die langfristigen Schwankungen im Bedarf und in der Versorgung sind die im Jahresverlauf. Die wichtigste davon ist der Verbrauch durch Gebäudeheizungen, der im Winter hochgeht. Der Erdgasverbrauch variiert im Jahresverlauf von typischen mittleren 36 kWh/d/p im Juli und August bis zu einem Mittel von 72 kWh/d/p von Dezember bis Februar, mit Extremen von 30-80 kWh/d/p (Fig.26.16, Zahlen für England (UK)).

Einige Erneuerbare haben ebenfalls jahreszeitliche Schwankungen – Solarleistung ist im Sommer höher und Windkraft geringer.

Wie kann man durch diese sehr langzeitlichen Schwankungen kommen? Elektrofahrzeuge und Pumpspeicher können bei der erforderlichen Größenordnung nicht weiterhelfen. Eine nützliche Technologie ist dabei sicher die langfristige Speicherung von Wärme. Ein großer Fels oder ein großes Wassergefäß kann einen Wintervorrat Wärme für ein Gebäude speichern – Anhang E diskutiert diese Idee detaillierter. In den Niederlanden wird Sommerhitze von den Straßen in grundwasserführenden Schichten bis zum Winter gelagert und dann mit Wärmepumpen in die Gebäude geliefert [2wmuw7].

♦Einen Beitrag zum Ausgleich dieser jahreszeitlichen Schwankungen kann auch intelligente Kraft-Wärme-Kopplung liefern, wie wir uns in Kapitel 21 auf Seite 169 bereits überlegt hatten: Werden KWK-Anlagen wärmegeführt betrieben, liefern sie ihren Strom genau dann, wenn es kalt ist. Kleinere KWK-Anlagen, sog. Blockheizkraftwerke (BHKW), verwandeln etwa 25% der Brennstoff-Energie in Strom, 50% in Heizenergie. Der so erzeugte Strom kann in Wärmepumpen (mit einem angenommenen Wirkungsgrad von ca. 300%) ebenfalls Heizenergie liefern. Ein intelligenter Mix von Heizungsanlagen – 40% KWK und 60% Wärmepumpen – hat als System somit einen Heiz-Wirkungsgrad von 125% bezogen auf den BHKW-Brennstoff, ohne den Nachteil einer saisonal

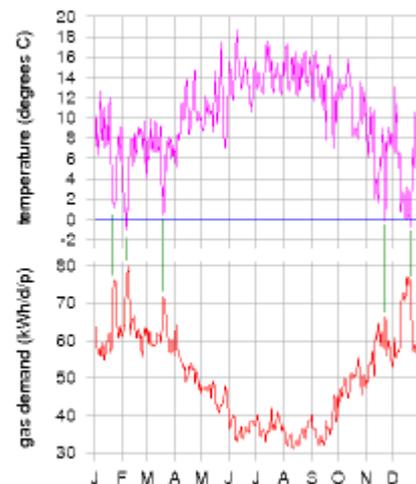


Fig.26.16: Gasverbrauch (unten) und Temperatur (oben) in England (UK) 2007

asymmetrischen Belastung des Strombedarfs, die mit einer vollständig elektrisch basierten Heizung unvermeidbar wäre.

Ein Gas-und-Dampf-Kraftwerk kann Strom aus Gas mit einem Wirkungsgrad von etwa 50% erzeugen. Wird dieser mit 300%-Wärmepumpen zum Heizen verwendet, liegt die Brennstoff-Effizienz bei 150%. Ist das nicht besser als die 125% mit dem KWK-Anteil?

Guter Einwand. Die Antwort ist: Das kommt drauf an. Wie wir in Kapitel 21 auf Seite 170 sahen, werden wir Wärmepumpen nicht immer in den idealisierten Bedingungen unserer Abschätzungen einsetzen können. Sobald wir zusätzliche Energie aufwenden müssen, um die Wärmereservoirs unserer Wärmepumpen im Sommer wiederaufzufüllen, ist der knappe Vorsprung der Nur-Wärmepumpen-Variante dahin. Unsere Abschätzungen sind zudem beliebig ungenau: In dichtbesiedelten Gebieten erhöhen zentrale Wärmekraftwerke die Effizienz gegenüber der von dezentralen Lösungen. Haben wir Zugang zu Grundwasserschichten als Wärmemedium, kann das die Effizienz von Wärmepumpen weit über die angenommenen 300% erhöhen.

Windgas – Methanisierung von Überschussstrom

♦ Sowohl kurzzeitige als auch saisonale Schwankungen lassen sich im bestehenden nationalen (Erd-)Gasnetz ohne Schwierigkeiten ausgleichen. Die vorhandenen Erdgas-Speicher in Deutschland haben eine Kapazität von ca. 19 Milliarden m³, etwa 25% des aktuellen nationalen Jahres-Gasverbrauches. Der Heizwert von Methan liegt bei 36 MJ/m³ (entspricht 10 kWh/m³), insgesamt sind das also 190.000 GWh, über hundertmal mehr als die oben bei den Pumpspeicherkraftwerken diskutierten 1.200 GWh, die wir zum Überbrücken von Windflauten benötigen. Um diese Speicherungs-Infrastruktur für unsere Elektrizität zu nutzen, müssen wir elektrische Energie in chemische Energie – genauer gesagt in Methan – verwandeln. Das ist technisch mit dem Sabatier-Prozess möglich, jedoch nicht ohne Verluste: Der Umwandlungs-Wirkungsgrad beträgt etwa 60%, zur Herleitung sei auf den Anhang I verwiesen. Durch Überschuss-Strom erzeugtes Methan, auch Windgas oder Biomethan genannt, kann in den vorhandenen Erdgas-Speichern zwischengelagert und bei Bedarf zur Stromerzeugung in konventionellen Gas-Kraftwerken eingesetzt werden.

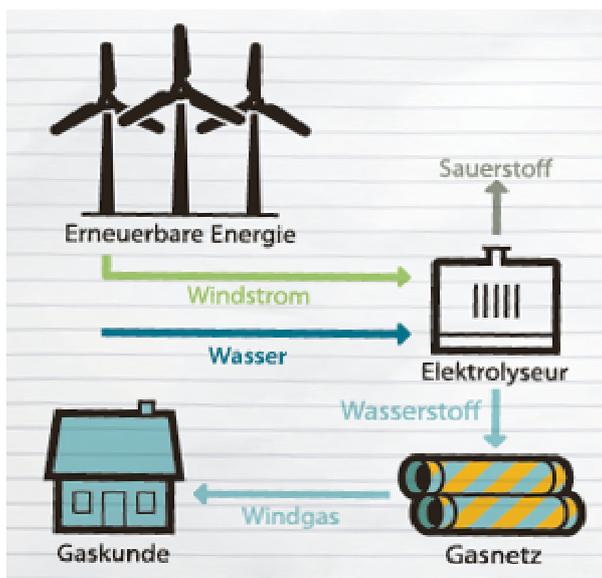


Fig. 26.15. Schematische Darstellung der Erzeugung und Einspeisung von Windstrom ins vorhandene Erdgasnetz. <http://www.greenpeace-energy.de>

Wie viel Strom könnte so zwischengelagert werden? Um die gesamten Erdgasspeicher von 19 Milliarden m³ zu füllen, benötigt man bei einem Methanisierungswirkungsgrad von 60% die gigantische Menge von $10 \text{ kWh/m}^3 \cdot 19 \cdot 10^9 \text{ m}^3 / 60\% =$

300·10⁹ kWh oder 4000 kWh pro Person. Bei Rückverstromung in Gaskraftwerken liegt der Wirkungsgrad bei etwa 50%, die nutzbare Elektrizität dieses Speichers wäre also etwa 1300 kWh pro Person. Diese Methode der Stromspeicherung hat also eine **Energie-Effizienz von 30%**. Zum Vergleich: Pumpspeicher hatten wir mit etwa 75 % Effizienz veranschlagt.

Anmerkungen

Seite

209 den summierten Output aller Windfarmen der Republik Irland °Daten von eirgrid.com [2hxf6c].

209 „Rückgang des Windes löst in Texas Stromnotstand aus“ [2I99ht] Tatsächlich lese ich aus diesem Artikel, dass der Vorfall, wenn auch ungewöhnlich, ein Beispiel normalen Netzbetriebes ist. Das Netz hat Kunden, deren Abnahme abschaltbar ist, falls eine Fehlanpassung zwischen Angebot und Bedarf besteht (sog. Lastabwurfkunden). Der Windstrom ging zurück um 1,4 GW und gleichzeitig nahm der Stromverbrauch der Texaner um 4,4 GW zu, was zu genau so einer Fehlanpassung zwischen Angebot und Bedarf führte. Alles funktionierte wie geplant, die Abnahme der Kunden wurde abgeschaltet. Hier ein anderes Beispiel, wo bessere Planung des Energiesystems hilfreich gewesen wäre: .. “Spanische Windkraft erreicht neuen Rekord, Abschaltung befohlen“ [3x2kv] Spaniens Strombedarf liegt im Mittel bei 31 GW. Am Dienstag, den 4.3.2008 lieferten Windturbinen 10 GW. “Spaniens Strommarkt reagiert etwas empfindlich auf Windfluktuationen.”

209 Windkraftbefürworter spielen das Problem herunter: „Keine Sorge - *einzelne* Windfarmen mögen intermittent sein, aber *zusammen* genommen ist die *Summe* der Windkraft aus verschiedenen Gegenden weit weniger intermittent.“ Siehe als Beispiel die Website yes2wind.com, die auf ihrer Seite “Schluss mit dem Mythos, Windkraft sei nicht verlässlich” behauptet, dass “die Schwankungen in der Energiesumme vieler, übers Land verteilter Windfarmen kaum wahrnehmbar“ sei. www.yes2wind.com/intermittencydebunk.html

209 Sicherlich ist Wind intermittent, auch wenn wir viele über ein *ganzes Land* verteilte Turbinen aufsummieren. °Quelle: Oswald et al. (2008). Unabhängige Schwankungen skalieren mit der *Quadratwurzel des Kapazitätsverhältnisses* ♦zur Herleitung siehe: Kerscher (1996) [cjm q6te].

212 In Deutschland sind 8,2 GW Wasser-Kraftwerksleistung installiert Quelle: [6hgxv gp]

212 Der Anlagenwirkungsgrad (Effizienz) ist 75%. °Siehe die Daten von Fig. 26.17. Weitere Informationen über Dinorwig und weitere Seiten über Pumpspeicher: Baines et al. (1983, 1986).

212 Pumpspeicherleistung in Deutschland beträgt etwa 6 GW, die gesamte speicherbare Energie liegt bei 40 GWh. ♦Quelle: SRU (2010) [4yyx19j] oder die VDE-

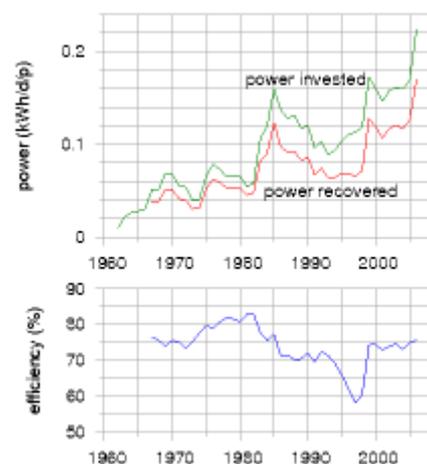


Fig.26.17: Effizienz der vier Pumpspeichersysteme in England

Studie „Energiespeicher in Stromversorgungssystemen mit hohem Anteil erneuerbarer Energieträger - Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf“ vom Dezember 2008, [5wmnfou]. **Pumpspeicherkraftwerk Riedl** s. [32yya7o], **Pumpspeicherwerk Goldisthal**: Daten von Wikipedia, http://de.wikipedia.org/wiki/Pumpspeicherwerk_Goldisthal.

- 215 **Tabelle 26.7:** Das benötigte Arbeitsvolumen V kann man aus der Höhendifferenz h folgendermaßen berechnen: Ist ε die Effizienz der Umwandlung von potentieller in elektrische Energie, gilt

$$V = 100 \text{ GWh} / (\rho g h \varepsilon),$$

wobei ρ die Dichte von Wasser und g die Erdbeschleunigung bezeichnet. Ich setze die Effizienz des Generators an mit $\varepsilon = 0.9$.

- 215 **Tabelle 26.8:** Alternative Standorte für Pumpspeicher: Der vorgeschlagene Obersee für Bowydd war Llyn Newydd, Koordinaten SH 722 470; für Croesor: Llyn Cwm-y-Foel, SH 653 466.

- 216 Wenn zehn von ihnen dasselbe Potential hatten, das ich soeben für Loch Sloy abgeschätzt habe, könnten wir 400 GWh speichern Diese rohe Abschätzung entspricht einer Studie der Strathclyde University [5o2xgu], die 14 Standorte mit einer geschätzten Kapazität von 514 GWh auflistet.

- 217 Kühlschränke könnten so modifiziert werden, dass sie ihren Thermostat nach oben oder unten drehen in Abhängigkeit von der Netzfrequenz [2n3pmb]. Weitere Links: Dynamic Demand www.dynamicdemand.co.uk; www.responsiveload.com; www.rlte.com.

- 217 In Südafrika (wo häufig Stromknappheit herrscht) sind funkgesteuerte Verbrauchers-Managementssysteme in Hunderttausenden von Wohnungen installiert Quelle: [2k8h4o] ♦Tepco in Japan Quelle: <http://www.tepco.co.jp/en/forecast/html/index-e.html>

- 218 Fast die gesamte dänische Windenergie wird an die europäischen Nachbarn exportiert Quelle: Sharman (2005).

- 218 Seit über 25 Jahren gibt es auf der schottischen Insel Fair Isle zwei Stromnetze. www.fairisle.org.uk/FIECo/ Windgeschwindigkeiten liegen meist zwischen 3 m/s und 16 m/s; 7 m/s ist der wahrscheinlichste Wert.

- 220 **Fig.26.13:** Speichereffizienzen: Lithium-Ionen-Akkus: 88% effizient. Quelle: www.national.com/appinfo/power/files/swcapeet.pdf Bleiakkus: 85–95%. Quelle: www.windsun.com/Batteries/Battery_FAQ.htm Pressluftspeicher: 18% effizient. Quelle: Lemofouet-Gatsi and Rufer (2005); Lemofouet-Gatsi (2006). Siehe auch Denholm et al. (2005). Luft/Öl: Hydraulikspeicher, wie sie beim Regenerativen Bremsen in LKWs eingesetzt werden, sind Pressluftspeicher mit 90% Zyklus-Effizienz, die 70% der Bewegungsenergie einfangen können. Quellen: Lemofouet-Gatsi (2006), [5cp27j].

- 220 **Tabelle 26.14:** Quelle: Xtronics http://xtronics.com/reference/energy_density.htm; Battery University [2sxlyj]; Schwungrad-Infos von Ruddell (2003). Die modernsten



Fig.26.18: Ein möglicher Standort für ein weiteres 7 GWh Pumpspeicherkraftwerk. Croesor Valley ist etwas links der Mitte, zwischen dem spitzen Gipfel (Cnicht) zur Linken und den breiteren Gipfeln (die Moelwyns) zur Rechten.

Batterien höchster Energiedichte sind Lithium-Schwefel- und Lithium-Sulfid-Akkus, die Energiedichten von 300 Wh/kg erreichen. Einige desillusionierte Wasserstoff-Enthusiasten scheinen den Weg hoch im Periodensystem gegangen zu sein. Bor hat (angenommen man verbrennt es zu B_2O_3) hat eine Energiedichte von 15 000 Wh pro kg, was ganz schön hoch ist. Allerdings stelle ich mir vor, dass mein Haupteinwand gegen Wasserstoff auch auf Bor zutrifft: Dass nämlich die Herstellung des Treibstoffs (hier Bor aus B_2O_3) energetisch ineffizient sein wird, und damit auch der gesamte Verbrennungsprozess.

220 **Vanadium-Redox-Batterie** Quellen: www.vrbpower.com; *Ireland wind farm* [ktd7a]; *charging rate* [627ced]; *worldwide production* [5fasl7].

221 **Sommerhitze von den Straßen in grundwasserführenden Schichten** [2wmuw7].

Weitere Quellen: [3ohnz3v]