

Realistisches Langzeitkonzept oder Utopie?

Nachhaltige elektrische Energieversorgung mit Windenergie, Biomasse und Pumpspeicher

Nachhaltigkeit der Energieversorgung durch Nutzung erneuerbarer Quellen ist ein langfristiges politisches Ziel [1]; die Gründe sind die begrenzten fossilen Ressourcen und die Vermeidung schädlicher Emissionen und Rückstände. Von den jetzt oder künftig erschließbaren Energiequellen – Wasser, Sonne, Wind, Wellen, Biomasse, Gezeiten, Geothermie und Kernfusion – wird in Europa derzeit die Windenergie für am ehesten geeignet angesehen, im Laufe der nächsten Jahrzehnte einen nennenswerten Beitrag zur elektrischen Energieversorgung zu leisten. Die Elektrizitätserzeugung aus Wind ist Stand der Technik und die Einspeisung großer Leistungen aus Windenergieanlagen in das elektrische Netz wird von vielen als problemlos angesehen. Anhand neuerer Daten aus einer der vier deutschen Regelzonen wird zunächst diskutiert, wie eine nachhaltige elektrische Energieversorgung auf der Basis von Offshore-Windenergie und Pumpspeicher (»Wind und Wasser«-Modell) aussehen könnte. Dabei zeigt sich, dass eine solche Lösung wegen der notwendigen immensen Speicherkapazität wenig Aussicht auf Verwirklichung hat. Deshalb wird auch künftig eine thermische Erzeugung notwendig sein; die Hinzunahme der Biomasse verändert dieses Bild nicht entscheidend.

Die Gewinnung von Windenergie wird durch finanzielle Anreize stark gefördert; derzeit sind in Europa rd. 24 GW Erzeugungsleistung installiert, davon 13 GW in Deutschland, was bei einer angenommenen mittleren Betriebsdauer von 1 500 Volllaststunden/a einer Energie von 20 TWh/a oder rd. 4 % der gesamten elektrischen Erzeugung entspricht, vergleichbar mit der aus Wasserkraft gewonnenen Energie.

Da günstige Standorte rar werden und in der Bevölkerung der Widerstand gegen Windfarmen in der Nachbarschaft zunimmt, richtet sich jetzt das Interesse vor allem auf die See, wo der Wind stärker und stetiger weht und Windenergieanlagen (WEA) außer Sichtweite wären. Erste Offshore-Windfarmen wurden in Schweden und Dänemark gebaut, allerdings noch in Küstennähe und flachem Wasser bis rd. 10 m Tiefe; auch in den USA gibt es entsprechende Projekte.

Wegen der Zuordnung der internationalen Gewässer und aus Gründen des Naturschutzes müssten in Deutschland küstenfernere Standorte gewählt werden. Erwogen werden Standorte mit Wassertiefen bis 40 m, auch die Anordnung auf Pontons wird diskutiert. Große Windenergieversuchsanlagen bis 4,5 MW werden zzt. entwickelt und an Land erprobt [2;3].

Sofern es technisch möglich ist, solch große Anlagen auf hoher See zu bauen und trotz Sturm und Wetter mit noch vertretbarem Aufwand dauerhaft in Betrieb zu halten, versprechen sie in der Tat einen unerschöpflichen Beitrag zur Energieversorgung, der wenig Anlass zu Umweltkontroversen bietet. Es gibt Hoffnungen, in 20 bis 30 Jahren bei entsprechender finanzieller Förderung Windfarmen mit Leistungen

bis 35 GW im deutschen Teil der Nord- und Ostsee errichten zu können.

Regelleistung

Wenn diese Leistung nach Überwindung rechtlicher Hindernisse und der Durchquerung von Naturschutzgebieten schließlich mit Drehstrom- oder Gleichstromkabeln an Land übertragen wird, ist aber erst ein Teil des Problems gelöst, denn nun muss sie zu den Ballungszentren geführt und ins Netz eingespeist werden. Da die elektrische Leistung aus WEA und die Netzlast zeitlich nicht korreliert sind, entsteht dabei ein hoher Bedarf an Regelleistung zur Frequenzhaltung und Netzstabilisierung [4;5]:

In Schwachwindphasen ist positive Regelleistung notwendig (die in Deutschland heute überwiegend thermisch erzeugt wird), um fehlende Leistung aus WEA zu ersetzen. Wie die Erfahrung des Sommers 2003 lehrt, können Flaute Tage und Wochen dauern; bei vollständiger Windstille muss Leistung in Höhe der Netzlast bereitstehen.

Die erforderliche Regelleistung kann aber auch negativ sein, um in Starkwindphasen Energie, die das Netz nicht aufnehmen kann, als Vorrat zu speichern; dies ist mit Pumpspeicherkraftwerken und auch mit thermischen Speicherkraftwerken [14;15;16] möglich. Einrichtungen zur Energiespeicherung sind eine Voraussetzung jeder nachhaltigen Versorgung.

Bild 1 zeigt (für $a = 1$) neuere Aufzeichnungen aus einer deutschen Regelzone über jeweils eine Woche. Die mit tausenden von Rotoren auf dem Festland gewonnene und mit Priorität zum Vorzugspreis eingespeiste WEA-Leistung wird von unbeeinflussbaren meteorologischen und atmosphärischen Bedingungen in der gesamten Regelzone bestimmt und hat offensichtlich einen völlig anderen Verlauf als die dem Netz entnommene elektrische Last.

Die Möglichkeiten einer Beeinflussung der Netzlast (demand-side management) werden häufig überschätzt, da der verzögerbare Verbrauch im Haushalt (Waschmaschinen, Kühlung, Heizung usw.) nur einen kleinen Teil des gesamten Strombedarfs ausmacht, während der einer Kostenoptimierung unterliegende industrielle Stromver-

Leistungs-Szenario

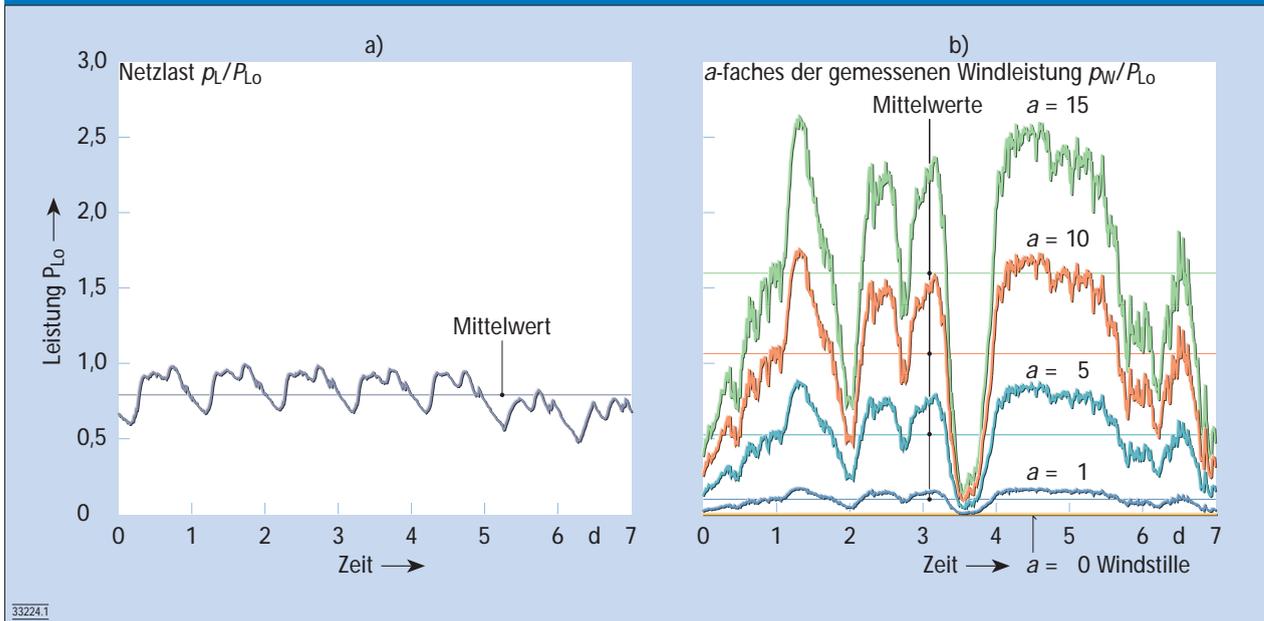


Bild 1. Netzlast und WEA-Leistung in einer deutschen Regelzone

a) Netzlast während einer Woche

b) a-faches der Windleistung in einer anderen Woche

brauch meistens zeitgebunden ist. Oft ist eine zeitliche Verschiebung überhaupt nicht praktikabel (vernetzter Fabrikbetrieb oder Bahnfahrpläne). Auch in der kalifornischen Energiekrise im Jahr 2000 wurden in der Not nichtselektive gebietsweise Abschaltungen vorgenommen, um Netzzusammenbrüchen zuvorzukommen [6]. Die Anpassung an die Netzlast wird sich bei Erweiterung des Einzugsbereiches auf See nicht verbessern, denn die WEA-Leistung ist bereits über weit auseinanderliegende Standorte gemittelt.

In Netzen mit hohem Wasserkraftanteil wie in Norwegen (99 %) könnten speicherfähige Wasserkraftwerke ohne oder mit Pumpbetrieb die erforderliche Regelleistung verlustarm liefern. Anders in Deutschland, wo die Erzeugung aus Wasserkraft minimal ist und die Regelung vorwiegend mit thermischen, hauptsächlich fossil befeuerten Kraftwerken stattfinden muss. Deren Wirkungsgrad sinkt bei Teillast, weshalb bei Einspeisung von WEA-Energie Brennstoffverbrauch und Emissionen je kWh steigen und ein Teil der erhofften Umweltentlastung unbemerkt und bei erhöhten Kosten verloren geht [7;8].

Die zum Ausgleich notwendige Regelleistung ändert sich i. d. R. mit begrenzten Gradienten gemäß der

regionalen Windverteilung, doch kann es auch vorkommen, dass die eingespeiste WEA-Leistung schnell abnimmt. Während eines Starkwindregimes im Frühjahr 2002 erreichten viele Windrotoren nacheinander ihre oft bei einer Windgeschwindigkeit von 25 m/s eingestellten Leistungsgrenzen, und die Anlagen wurden zum Schutz selbsttätig abgeschaltet. In der Regelzone führte dies zu einem mehrstündigen Einbruch der WEA-Leistung um bis zu 2500 MW, was weiträumige Verschiebungen des Lastflusses im europäischen Netz und Auswirkungen auf Nachbarnetze zur Folge hatte [9]. Solche Vorgänge sind auch mit verbesserten Prognoseverfahren, an denen vielfach gearbeitet wird [10], nicht auszuschließen.

Die geplante Einspeisung vieler zusätzlicher Gigawatt an nicht steuerbarer Offshore-WEA-Leistung in das elektrische Netz mit seinem momentanen Ausgleichsbedarf setzt deshalb die Verfügbarkeit großer Energiespeicher im GWh-Maßstab voraus.

Energiespeicherung mit Pumpspeicher-Kraftwerken, »Wind und Wasser«

Pumpspeicherkraftwerke nutzen ein bewährtes Verfahren der Speicherung potenzieller Energie: Zum

Einspeichern wird mit Überschussenergie Wasser in Oberbecken gefördert, beim Rücklauf ins Unterbecken oder einen Fluss wird elektrische Regelenenergie zurückgewonnen. Der Wirkungsgrad eines Speicherzyklus kann 80 % erreichen, beide Betriebsarten können auch in einer einzigen hydraulischen Maschine vereinigt sein, die wahlweise als Turbine oder als Pumpe arbeitet. Weltweit gibt es rd. 280 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 90 GW, entsprechend rd. 3 % der gesamten Kraftwerksleistung; sie haben Leistungen bis zu mehreren GW und speichern Energie für Betriebsdauern von Stunden bis Tagen [11].

Große Pumpspeicherkraftwerke in den Alpen mit Höhendifferenzen von mehreren hundert Metern dienen zur Sekundärregelung der deutschen Netzbetreiber, bei denen kurze Reaktionszeiten von wenigen Minuten wichtig sind, weitere Anlagen befinden sich in den Mittelgebirgen. Im September 2003 wurde nach jahrzehntelanger Planung und sieben Jahren Bauzeit bei Goldisthal im Thüringer Wald ein großes Speicherkraftwerk mit einer Leistung von 1,06 GW und 8,5 GWh Speicherinhalt in Betrieb genommen, in dem zur Verbesserung des Wirkungsgrades zwei der vier Motoren/Generatoren mit variabler Drehzahl arbeiten.

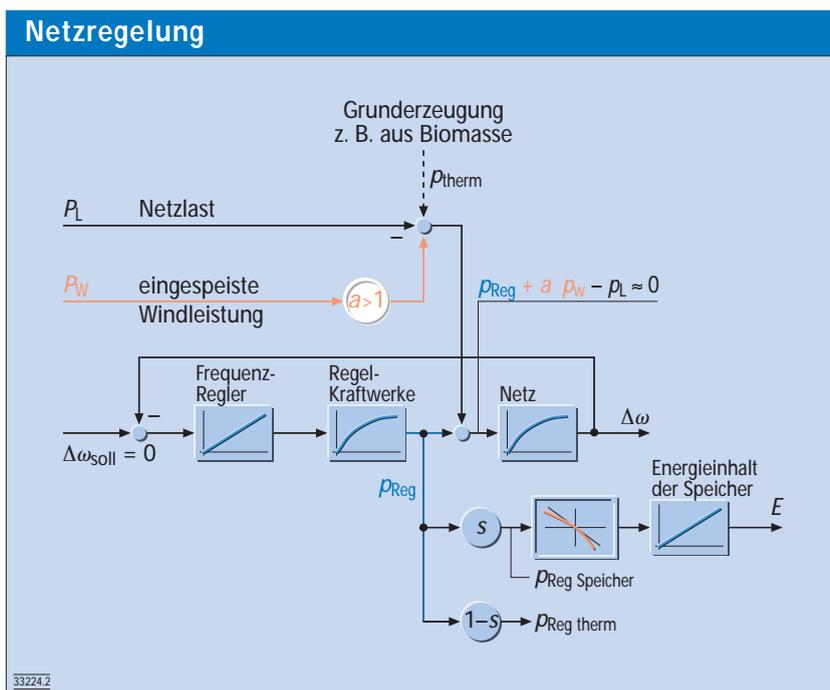


Bild 2. Netzregelung mit Windleistungseinspeisung und Pumpspeicher, »Wind und Wasser«

Im Prinzip wäre es denkbar, mit einer genügenden Anzahl großer Pumpspeicherwerke abrufbare Regelleistung für künftige Offshore-Windfarmen bereitzuhalten, doch wäre das Netz zu erweitern und zusätzliche Hochspannungsleitungen müssten gebaut werden. Möglicherweise könnten die bei weit vor der Küste liegenden Windfarmen erforderlichen Gleichstromverbindungen an Land mit hohen Spannungen (HGÜ) bis zu den Kraftwerken weitergeführt werden. Auch gibt es Vorschläge, das skandinavische Netz mit seinem großen Wasserkraftanteil zur Speicherung zu nutzen, was ebenfalls den Bau entsprechender Übertragungsleitungen erfordern würde, abgesehen von den politischen Problemen. Wie das Beispiel Finnland zeigt, sind auch dort die ausbaubaren Reserven inzwischen weitgehend ausgeschöpft, und in trockenen Jahren muss thermisch erzeugter Strom importiert werden. Hinderlich wäre auch die Tatsache, dass die in Deutschland gewonnene Offshore-Windenergie wegen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) mit hohen Kosten belastet und international nur eingeschränkt handelbar ist. Ähnliche Gesichtspunkte gelten bei dem Gedanken einer einzigen deutschen oder gar »europäischen« Regelzone mit den dann notwendi-

gen langen Übertragungsleitungen zu den Pyrenäen usw. Angesichts weiträumiger Netzzusammenbrüche drängt sich schließlich auch die Frage auf, ob es nicht auch Grenzen für die sichere Übertragung nicht planbarer Ausgleichsleistung gibt.

Grundsätzlich sind Pumpspeicherkraftwerke aber jedenfalls eine mit heutiger Technik denkbare Lösung, um große Energiemengen mit akzeptablem Wirkungsgrad zu speichern und ohne zusätzliche fossile Brennstoffe bedarfsgerecht in Strom zurückzuwandeln. Das bedeutet allerdings neben einer geeigneten Topographie gravierende Landschaftsveränderungen, lange Bauzeiten und oft hohe Kosten, bei der Bevölkerung wären sie nicht willkommen. Da die Kombination von Offshore-Windenergie und Pumpspeicher aber immerhin einen denkbaren Weg zur nachhaltigen Energieversorgung weist, soll das »Wind und Wasser«-Modell am Beispiel einer großen deutschen Regelzone genauer quantifiziert werden.

Hinweis: Wie bei allen Prognosen sind im Folgenden Schätzungen notwendig, wobei die WEA-Leistung sehr starken Schwankungen unterliegt, die vom Sturm bis zur totalen Flaute reichen. Bei der Netzlast ist eher zu vermuten, dass in einer dienstleistungsorientierten und

zahlenmäßig abnehmenden Gesellschaft keine großen Steigerungen mehr zu erwarten sind.

Bild 1a zeigt den Verlauf der Netzlast p_L in der betrachteten Regelzone während einer Woche im Dezember 2002 mit der als Bezugsgröße verwendeten Spitzenleistung $P_{L0} = 20$ GW und einer Energie von 2,67 TWh. In Bild 1b ist (mit dem Parameter $a = 1$) die in die gleiche Regelzone während einer früheren Starkwind-Woche eingespeiste Windleistung p_W mit dem Spitzenwert 3,5 GW und einer Energie von 0,36 TWh aufgetragen.

Zunächst ist abzuschätzen, um welchen Faktor $a > 1$ die Windleistung im Laufe der nächsten Jahrzehnte durch Zubau von Offshore-Windfarmen erhöht werden müsste, um bei allmählicher Stilllegung der heutigen Kraftwerksanlagen die jetzige Netzlast zu speisen. Wie ein Vergleich der Kurvenscharen zeigt, wäre hierfür ein Ausbau der Offshore-WEA-Leistung um einen bei $a = 10$ liegenden Faktor auf eine Spitzenleistung von 35 GW mit einem Energiepotenzial von 3,6 TWh erforderlich, was etwa der von der Politik anvisierten Erzeugungsleistung in 30 Jahren entspricht, allerdings dort für alle deutschen Regelzonen. Für die folgende Diskussion wird dieser Wert $a = 10$ zugrunde gelegt.

Da die zeitlichen Verläufe der Netzlast p_L und der extrapolierten WEA-Leistung $a \cdot p_W$ stark voneinander abweichen, zur Stabilisierung des Netzes aber ein kurzfristiger Ausgleich notwendig ist, wird im Folgenden angenommen, dass ausreichend Regelleistung p_{Reg} aus Pumpspeichern zur Verfügung steht. Auf die Annahme thermischer Regelkraftwerke wird vorerst verzichtet, um beim nachhaltigen »Wind und Wasser«-Modell zu bleiben.

Bild 2 zeigt ein Regelschema, um den momentanen Bedarf an »Regelleistung« p_{Reg} vereinfacht über eine Frequenzregelung zu bestimmen. Wegen des unterschiedlichen Zeitmaßstabes gilt dabei angenähert $p_{Reg} + a \cdot p_W - p_L \approx 0$. Das Signal $p_{Reg} \approx p_L - a \cdot p_W$ kann somit für die verfügbaren Pumpspeicherkraftwerke als Summensollwert $p_{Reg,soll}$ dienen. Zunächst wird $s = 1$ gesetzt, d. h. die gesamte Regelleistung soll mit Pumpspeicherkraftwerken erzeugt werden.

Für $p_{Reg} > 0$ ist elektrische Ersatzleistung notwendig, und die Kraft-

werke arbeiten generatorisch, so dass ihr Energieinhalt, entsprechend dem Wasserstand in den Oberbecken, sinkt. Dagegen wird bei Überschuss gepumpt und der Wasserstand steigt, $p_{Reg} < 0$. Die unvermeidlichen Leistungsverluste des Ein- und Ausspeichervorgangs werden entweder pauschal geschätzt oder genauer mit dem in Bild 2 angedeuteten nichtlinearen Funktionsgeber berücksichtigt, der bei einer zyklisch verlaufenden Speicherleistung p_{Reg} den Speicherinhalt insgesamt abnehmen lässt.

In Bild 3 ist die gemäß Bild 2 ermittelte erforderliche Regelleistung für $a = 0$, d. h. vollständige Windstille, und bei einer um dem Faktor $a = 10$ gegenüber dem heutigen Stand erhöhten WEA-Leistung dargestellt. Die maximale Speicherleistung liegt zwischen $p_{Reg} = 20$ GW (Generatorbetrieb) und $p_{Reg} = -21$ GW (Pumpbetrieb). Sofern auf eine vollständige Erfassung der Windenergie verzichtet wird, etwa indem bei Starkwind die WEA durch Drosselung an der Netzregelung beteiligt werden, wird der Pumpbetrieb eingeschränkt. Dies geht dann zu Lasten der für spätere Schwachwindperioden vorgehaltenen Energie.

In Bild 4 sind für verschiedene Windleistungs-Szenarien gemäß $a = 0; 1; 10$ die Änderungen der Speicherenergie in den Oberbecken der Pumpspeicherkraftwerke während einer Woche aufgetragen, wobei Leistungsverluste und etwaige Engpässe zunächst unberücksichtigt bleiben. Bei starkem Windenergieausbau, $a = 10$, entstünde während der Woche ein Energieüberschuss, und Rücklagen für Schwachwindzeiten würden gebildet. Für $a = 1$, entsprechend der heutigen Einspeisung, und noch mehr bei vollständiger Windstille, $a = 0$, wäre bei pauschaler Schätzung der Verluste dagegen ein Abbau der gespeicherten Energie um rd. 3 TWh zu verzeichnen, die Speicher wären also in Kürze leer oder Strom müsste rationiert werden.

Bei der Bewertung dieses Ergebnisses ist zu bedenken, dass die betrachtete Regelzone gegenwärtig nur über eine gesamte Pumpspeicherleistung von 1,2 GW und eine Speicherkapazität von 6,5 GWh verfügt. Einen anderen Orientierungspunkt liefert das neue Pumpspeicherkraftwerk in Goldisthal mit 1,06 GW und 8,5 GWh. In der Regel-

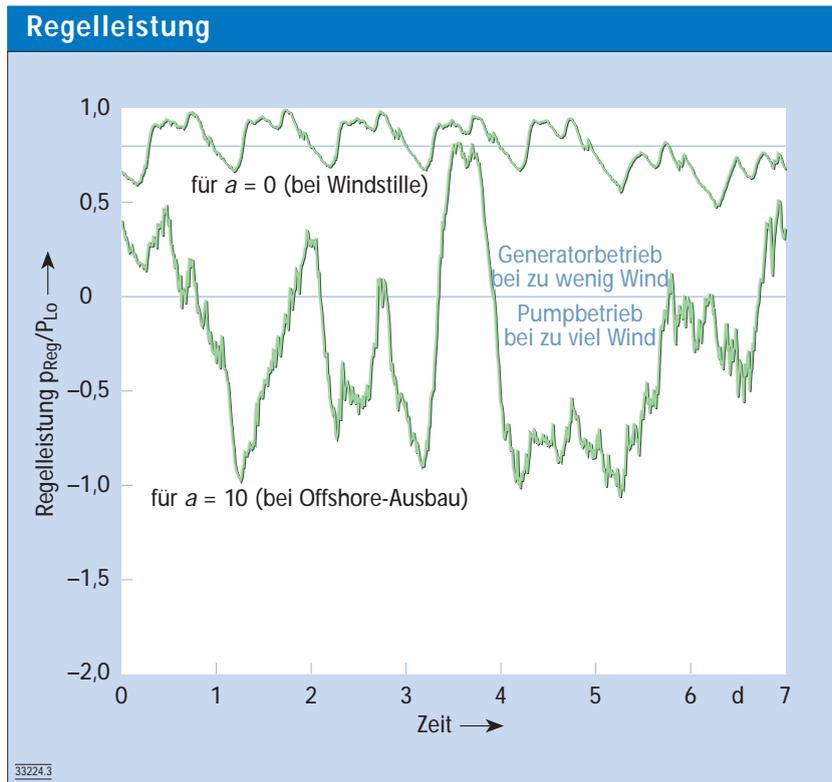


Bild 3. Regelleistung während einer Woche

zone würde das nachhaltige »Wind- und Wasser«-Modell somit einen Ausbau der Speicherleistung auf das 20fache und der Speicherkapa-

zität auf das 350fache der Werte von Goldisthal erfordern, um den Netzbetrieb bei Windstille auch nur für eine Woche aufrecht erhalten zu

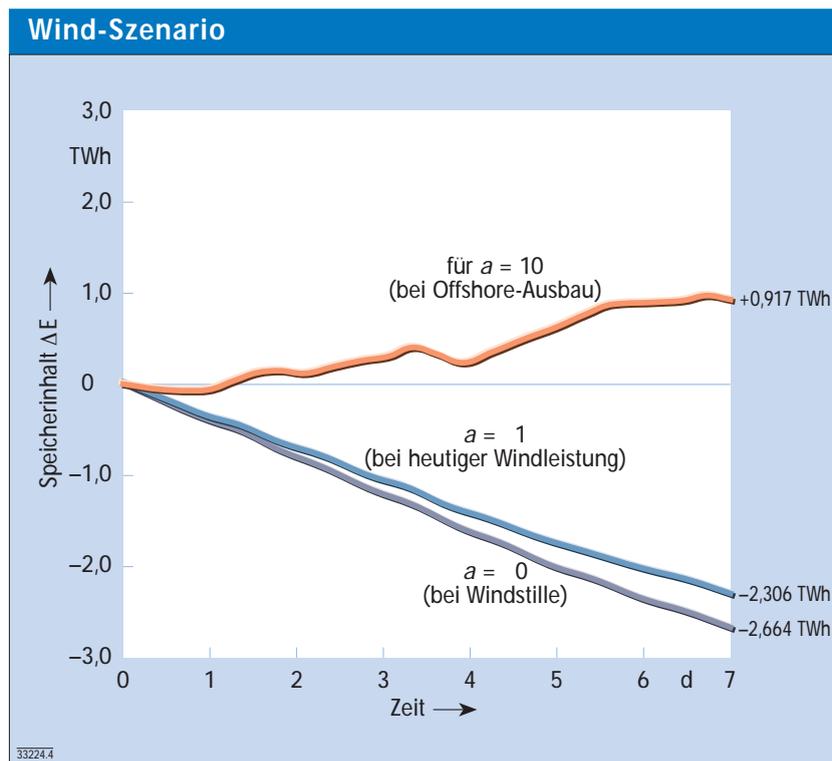


Bild 4. Änderung der Speicherenergie bei verschiedenen Wind-Szenarien



Bild 5. Offshore-Windenergieanlagen und Pumpspeicher – kein Weg zur nachhaltigen Energieversorgung

können. Dass ein solcher Ausbau topographisch unmöglich, außerdem umwelt- oder kostenmäßig völlig indiskutabel wäre, liegt auf der Hand. Realistischere Ergebnisse sind nur durch Begrenzung von WEA-Leistungsspitzen zu erreichen, oder indem, wie in *Bild 2* angedeutet, thermische Kraftwerke zur Grunderzeugung eingesetzt werden.

Die Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe kommt in einem Bericht [12] zu dem Ergebnis, dass mit der gesamten Menge der in Deutschland anfallenden Biomasse bei ausschließlich elektrischer Nutzung rd. 220 TWh/a erzeugt werden

könnten. Da Biomasse nicht beliebig transportierbar ist und es auch andere Anwendungen gibt, etwa für die Umwandlung in Treibstoff, wird hier angenommen, dass nicht mehr als 40 % der gesamten aus Biomasse gewinnbaren elektrischen Leistung in das Netz der betrachteten Regelzone eingespeist werden können (*Bild 2*), entsprechend einer konstanten Leistung von 10 GW. Damit würde zur Deckung des Energiebedarfs ein Ausbau der WEA-Leistung um den Faktor $a = 4$ genügen, doch entspräche die dann in der Regelzone erforderliche Speicherleistung immer noch dem 11fachen und die Speicherkapazität dem 115fachen

der Werte des Pumpspeicherkraftwerks Goldisthal. Nachhaltigkeit ist auf diese Weise also nicht zu erreichen. Erst wenn fossile oder nukleare Energieträger in Grundlast- oder Regelkraftwerken einbezogen werden, wird das durch die Einspeisung aus WEA entstehende Speicherproblem handhabbar [13].

Eine andere Möglichkeit wäre – gemäß *Bild 2* –, nur einen Teil der Regelenenergie, $s < 1$, hydraulisch zu speichern und die übrige Regelleistung $(1 - s) \cdot p_{\text{Reg}}$ in Gaskraftwerken mit Druckluftspeicherung zu erzeugen, die im Gegensatz zu anderen thermischen Kraftwerken beide Vorzeichen der Regelleistung bedienen können. Zwar erfordern auch sie den Einsatz von Erdgas, doch in geringeren Mengen [14;15;16]. Die Energie wird dabei mit Druckluft in großen Kavernen gespeichert, die durch Auslaugung in unterirdischen oder unter dem Meeresboden befindlichen Salzstöcken geschaffen werden.

Die von den Gasturbinen mechanisch getrennten Verbrennungsluftkompressoren werden über Umrichter mit schwankender WEA-Leistung gespeist, und die energiesparende Ausspeicherung geschieht bedarfsgerecht durch verdichterlose Gasturbinen. Nach dem Vorbild des seit 20 Jahren erfolgreich betriebenen 290-MW-Spitzenlastkraftwerks in Huntorf befinden sich optimierte Speicherkraftwerke für den Ausgleich fluktuierender WEA-Leistung in der Planungsphase.

Zusammenfassung

Nach dem heutigen Stand der Technik wäre eine nachhaltige elektrische Energieversorgung mit Offshore-WEA, Biomasse und Pumpspeicherkraftwerken zwar prinzipiell denkbar, doch zeigt die Schätzung anhand aktueller Daten aus einer Regelzone, dass dies einen prohibitiven Ausbau der Pumpspeicherkapazität erfordern würde, was topographisch unmöglich und hinsichtlich der Landschaftsveränderungen und der Kosten indiskutabel wäre. Deshalb sind thermische Kraftwerke auch künftig unentbehrlich, darunter je nach Verfügbarkeit solche mit biogenen Energieträgern. Das Ziel einer nachhaltigen elektrischen Energieversorgung auf der Basis von Wind, Wasser und Biomasse erscheint dagegen aus heutiger Sicht nicht er-

reichbar und es stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist, ihm weiterhin nachzujagen, koste es was es wolle.

Sofern das zweifellos vorhandene Potenzial an nicht steuerbarer Energie aus Offshore-WEA im erhofften Umfang tatsächlich erschließbar ist, wäre es jedenfalls besser, die schwankende WEA-Leistung zur Erzeugung speicher- und transportierbarer Sekundär-Energieträger für Brennstoffzellen zu nutzen [17], wofür es bei ortsfesten wie mobilen Anwendungen künftig weltweiten Bedarf geben wird. Neben der primären elektrischen Energiegewinnung gleichrangig die zugehörigen Umwandlungs-, Transport- und Speichertechnologien voranzutreiben, wäre zwar eine ebenfalls aufwändige, aber immerhin sinnvolle Langfriststrategie, statt das elektrische Verbundsystem durch die Einspeisung immer größerer Mengen fluktuierender WEA-Leistung zu gefährden.

[1] European Communities: Towards a European strategy for the security of energy

LITERATUR

- supply. Green Paper, 2001, ISBN 92-894-0319-5.
- [2] *Durstewitz, M.; Hahn, B.; Hoppe-Kilpper, M.; Czisch, G.; Enßlin, C.; Rohrig, K.; Nath, C.; Köhne, V.*: Offshore-Windenergienutzung in der AWZ – Potenziale, Netzintegration, Stromgestehungskosten. Windenergie Report Deutschland 2002.
- [3] Windblatt, Enercon Magazin 05, 2002.
- [4] *Schwarz, J.; Staschus, K.*: Systemverantwortung – Voraussetzung für eine sichere Stromversorgung, *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 2003, H. 3, S. 446 – 450.
- [5] *Luther, M.; Winter, W.*: Erweiterte Anforderungen an Windenergieanlagen zur Aufrechterhaltung der Systemstabilität. *Hu-sum Wind* 2003.
- [6] *Kerber, H.*: Versorgungsengpässe und Strompreisschwankungen in Kalifornien. *Energiewirtschaftliche Tagesfragen* 2001, H. 31/2, S. 60 – 66.
- [7] *Leonhard, W.*: Netzeinspeisung aus regenerativen Quellen. *ew Jg. 101* (2002), H. 4, S. 36 – 41.
- [8] *Leonhard, W.; Müller, K.*: Ausgleich von Windenergieschwankungen mit fossil befeuerten Kraftwerken – wo sind die Grenzen? *ew Jg. 101* (2002), H. 21/22, S. 30 – 37.
- [9] *Bouillon, H.*: Auswirkungen des fluktuierenden Energieangebotes auf den Systembetrieb, VGB-Konferenz Erneuerbare Energien/Dezentrale Erzeugung, 2002, Salzburg.
- [10] *Ernst, K.; Rohrig, K.*: Online monitoring and prediction of wind power in German Transmission System Operating centres. IEA Symposium Norrköping, 2002.
- [11] Electricity Storage Association: Large scale electricity storage technologies. <http://www.electricitystorage.org>.
- [12] *Kaltschmitt, M.*: Bioenergie, Technologien und Potenziale. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. <http://www.nachwachsende-rohstoffe.de>.
- [13] Siemens Power Journal: Gasturbinen, Kraftwerke mit Gasturbinen, Heft April 1999.
- [14] *Crotogino, F.*: Druckluftspeicher-Gasturbinen-Kraftwerke: Ausgleich fluktuierender Stromproduktion. *etz* 2003, H. 5, S. 12 – 18.
- [15] *Crotogino, F.*: Komprimierte Luft »speichert« Windstrom. *Erneuerbare Energien*, 2003, H. 11.
- [16] *Althaus, R.*: How CAES fits today's market requirements. Proc. of the Electrical Energy Storage Applications and Technologies, EESAT San Francisco, 2003.
- [17] *Altmann, M.; Stiller, C.*: Wasserstoff-erzeugung in Off-shore Windparks. L-B-Systemtechnik, Ottobrunn 2001.

(33224)

w.leonhard@tu-bs.de