

## AKE2003H01b\_Leonhard\_SD-Ausgleich\_Windenergie.pdf

Netzlast und Windleistung nicht deckungsgleich

## Ausgleich von Windenergieschwankungen mit fossil befeuerten Kraftwerken – wo sind die Grenzen?

Balancing fluctuating wind energy by controlling fossil power plants – where are the limits?

Windenergie soll fossile Energieträger sparen und Emissionen reduzieren, doch erfordert der schwankende Wind Regelleistung aus thermischen Kraftwerken, was Brennstoffverluste verursacht und der Substitution von Energie Grenzen setzt. Eine verstärkte künftige Nutzung von Windenergie ist nur mit Energiespeichern möglich, die auch zur Erzeugung nachhaltiger sekundärer Energieträger für ortsfeste und mobile Anwendungen dienen könnten.

### SUMMARY

Wind energy, fed to the grid to save resources and reduce emissions, requires control power for balancing fluctuations; this causes fuel losses in thermal power stations and limits the degree of energy substitution. Facilities for energy storage are needed when greatly extending wind power acquisition, at the same time generating sustainable secondary fuel for stationary and mobile applications.



Prof. Dr.-Ing. *Werner Leonhard*, Institut für Regelungstechnik der TU Braunschweig, und

Prof. Dr.-Ing. *Kai Müller*, Institut für Automatisierungs- und Elektrotechnik der Hochschule Bremerhaven.

Die Verfasser danken Dr. *H. Bouillon*, Eon Netz, für Daten und wertvolle Hinweise.

Energie ist eine Grundlage unseres durch industrielle Produktion, Mobilität, den Wegfall schwerer körperlicher Arbeit sowie viele energieverzehrende Systeme der Computer- und Kommunikationstechnik geprägten Lebens. Angesichts der in den Industrieländern verbrauchten enormen Mengen und der bei Energiewandlung entstehenden Umweltbelastungen, andererseits aber auch der begrenzten Vorräte an fossilen Energieträgern gewinnen sich erneuernde Quellen an Bedeutung. Neben Wasserkraft und Biomasse, die sich an den zeitgebunden wechselnden Bedarf anpassen lassen, gelten vor allem Wind und Sonne als unerschöpfliche Energiequellen der Zukunft.

Ihre Erschließung durch Wandlung in elektrische Energie wird ideell und mit hohen Subventionen gefördert. Wie in einem früheren Aufsatz erörtert [6], besteht dabei das Problem, dass die Elektrizität am wechselnden Bedarf orientiert sein muss, während das Energieangebot von Wind und Sonne völlig anderen Gesetzmäßigkeiten folgt und nicht steuerbar, außerdem zufälligen witterungsbedingten und saisonalen Einflüssen unterworfen ist. Große Energiespeicher wären nötig, um das schwankende Angebot an den veränderlichen Bedarf anzupassen, indem man zeitweilige Überschussenergie (abzüglich unvermeidlicher Verluste) für spätere Phasen mit geringem Angebot verfügbar macht. Solche Speicher sind im Prinzip möglich, doch würde ihre Entwicklung hohe Kosten und Änderungen der gegenwärtigen Förderziele erfordern, die darauf beschränkt sind, den Ausbau netzgekoppelter Windenergieanlagen und Solargeneratoren mit hohen Subventionen zu forcieren.

Wind soll fossile Brennstoffe verdrängen

Durch vorrangig eingespeiste Windenergie soll im Netz Energie aus herkömmlichen Kraftwerken

### Netzlast

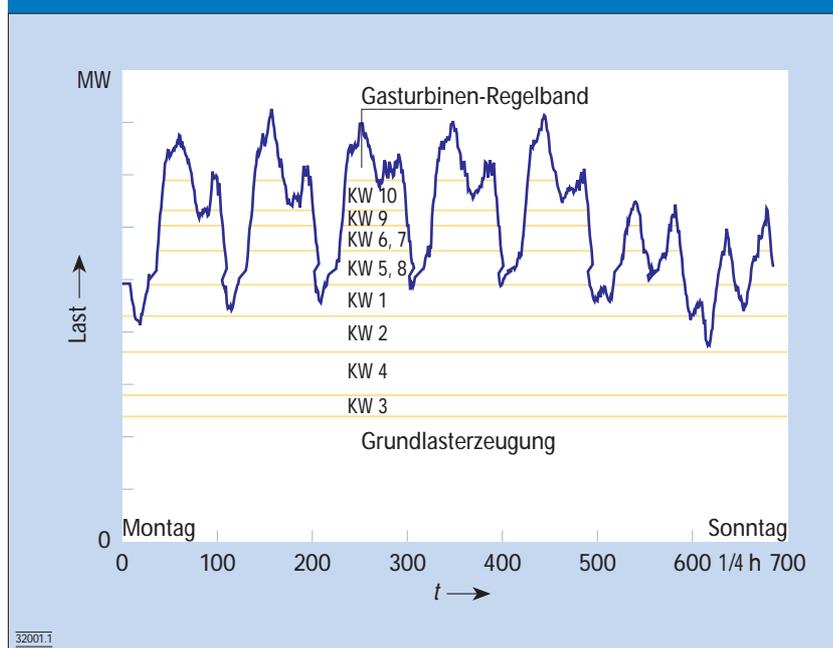


Bild 1. Beispiel für den Verlauf der Netzlast und möglicher Kraftwerkseinsatzplan, jeweils gültig für den nächsten Tag

verdrängt werden, um dort den Brennstoffverbrauch und die Emissionen zu verringern. Sofern der Wind Leistung aus Wasserkraftwerken ersetzt, werden Emissionen zwar nicht direkt reduziert, doch wird natürliche Energie in speicherbare und somit höherwertige mechanisch-potenzielle Energie umgewandelt, die dann anderweitig zur Verfügung steht. Anders ist es im norddeutschen Raum, wo Windenergieanlagen massiert sind und vorwiegend Kohle- und Gas-Kraftwerke den Ausgleich der eingespeisten Windleistung übernehmen müssen. Deren Umwandlungsprozess ist komplizierter als bei Wasserkraftwerken; sie reagieren langsamer auf Steuerbefehle und sind auch nur in einem begrenzten Leistungsbereich betriebsfähig. Durch Windenergie werden Kraftwerke zur Anpassung der Erzeugung vermehrt in den Teillastbereich gedrängt, wo der energiebezogene Brennstoffverbrauch und die CO<sub>2</sub>-Emission je kWh steigen. Ein Teil des von Wind und Sonne erhofften Gewinns für die Umwelt geht durch diese »Regelverluste« verloren, was, abgesehen von den Kosten, Fragen nach der Effektivität des Verfahrens aufwirft. Da die Fördermaßnahmen auf den Ersatz fossiler Energieträger zielen, wird im Folgenden versucht, diesen Nebeneffekt der Windenergienutzung am Beispiel eines thermisch gespeisten Teilnetzes näher zu quantifizieren.

Bild 1 zeigt einen charakteristischen Verlauf der Netzlast während einer Woche mit ihren täglichen Schwankungen, der durch das unkoordinierte Zusammenwirken von Millionen von Netzkunden entsteht und sich nicht ohne gravierende Eingriffe in den Arbeitsrhythmus der Wirtschaft und die Gewohnheiten der Verbraucher ändern lässt; doch ist er für einen Tag im Voraus gut prognostizierbar. Mit den bekannten Brennstoffkosten und den lastabhängigen Emissionen der Regelkraftwerke ist eine emissions- oder kostenoptimale Einsatzplanung der verfügbaren Kraftwerke für den nächsten Tag möglich. Wie angedeutet, kommen die »besseren«, d. h. gewöhnlich moderneren Kraftwerke dabei bevorzugt zum Einsatz.

In Bild 2 sind beispielhaft einige Wirkungsgradkurven fossil befeuert

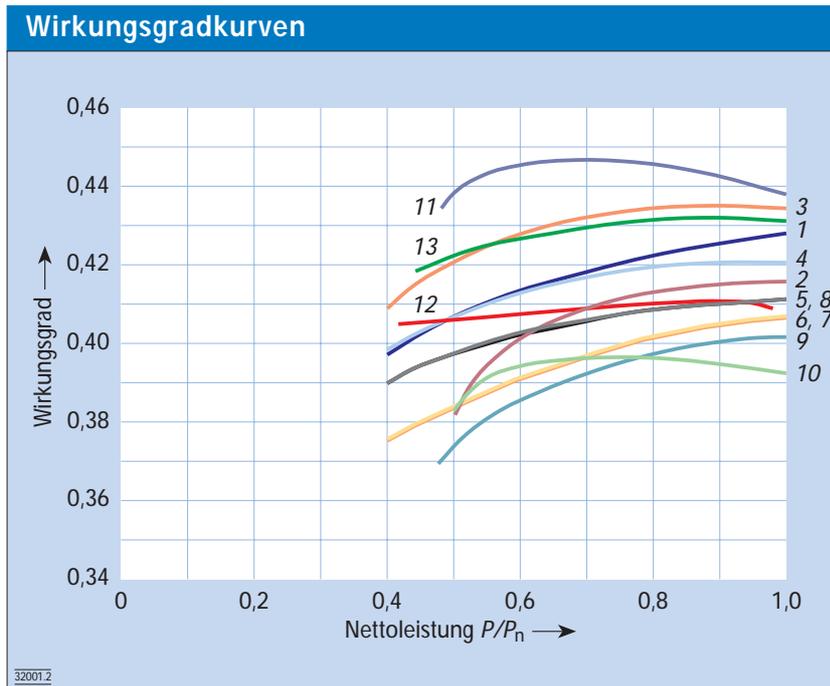


Bild 2. Beispiele für Wirkungsgradkurven von Kohle- und Gaskraftwerken

erter Kraftwerke dargestellt, die abgesehen von Sonderfällen bei Teillast monoton abnehmen. Der spezifische Brennstoffverbrauch und die Emissionen je kWh steigen dort gegenüber dem üblichen Betrieb im optimalen Wirkungsgradbereich.

Die tägliche Lastvorhersage kann nicht exakt sein, auch sind jederzeit Störungen auf der Erzeugerseite oder im Netz möglich, weshalb der Einsatzplanung eine als Sekundär- oder Netzkennlinien-Regelung ausgeführte Netzregelung zum Ausgleich überlagert sein muss. Hierzu bildet man in jeder Regelzone – zz. vier in Deutschland – aus dem nicht geplanten Anteil der gemessenen Export/Import-Leistung und der Frequenzabweichung eine Fehlergröße zur Anforderung von Regelleistung, die in einem liberalisierten System von Vertragspartnern irgendwo eingespeist und der anfordernden Regelzone zugerechnet werden kann.

#### Prinzip einer verbrauchsorientierten Netzregelung

Die Netzregelung ist vereinfacht durch das in Bild 3 gezeigte Modell beschrieben, wo das primärgeregelt Netz der Regelzone unabhängig vom Verbund mit einem Netzregler auf konstante Frequenz

geregelt wird. Die angenommene Verzögerung der Kraftwerke ist 2 min, während der Zeitmaßstab der Netzregelung dem der Sekundärregelung mit einer Einschwingzeit von rd. 30 min entspricht.

Sofern alle Regelkraftwerke bei Teillast monoton fallende Wirkungsgradkennlinien aufweisen, ist ein statisches Brennstoff-Optimum im Idealfall dann erreicht, wenn von den insgesamt  $n$  unter Vertrag stehenden Regelkraftwerken jeweils die  $m$  »besten« mit Vollast arbeiten, ein einziges Kraftwerk mit variabler Teillast fährt und die übrigen  $(n - m - 1)$ -Kraftwerke abgeschaltet sind. Dieses Prinzip ist in Bild 3 angedeutet, doch ist eine solche ideale »Folgeregelung« naturgemäß nicht in jedem Augenblick zu verwirklichen, da die Regelleistung schwankt und man die Kraftwerke nicht beliebig an- und abfahren kann. Wegen nichtstationärer Verluste und aus Verschleißgründen sollen die Anlagen jeweils wenigstens für einige Stunden in Betrieb oder abgeschaltet bleiben, was das Optimierungsproblem verkompliziert. Das Anfahren eines Kraftwerks aus dem kalten Zustand auf Vollast kann mehrere Stunden dauern und verursacht hohe Anfahrverluste. Bei den in Bild 3 als Verzögerungsglieder mit Anstiegsbegrenzung, z. B.  $0,02 P_n/\text{min}$ , gezeichneten

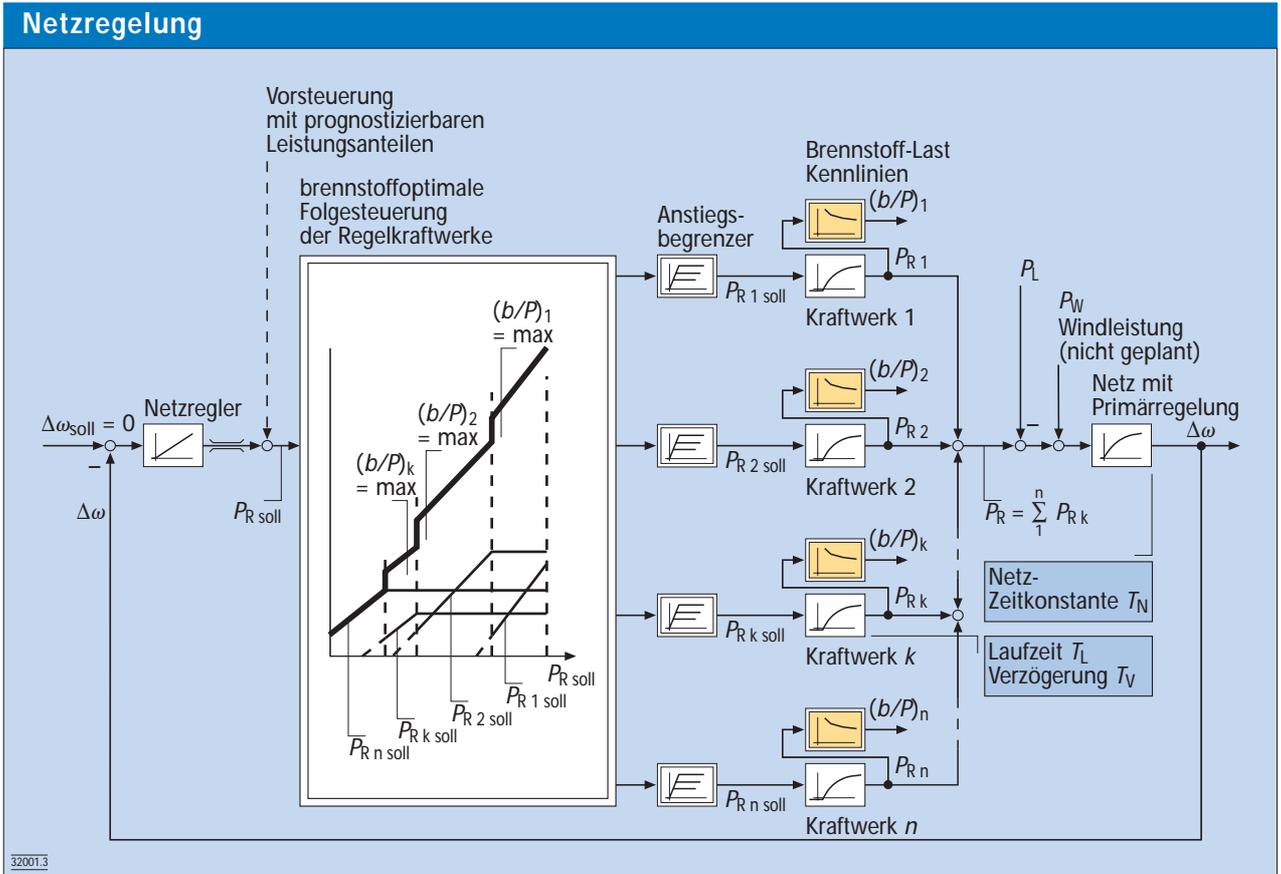


Bild 3. Schema einer vereinfachten Netzregelung mit n Regelkraftwerken

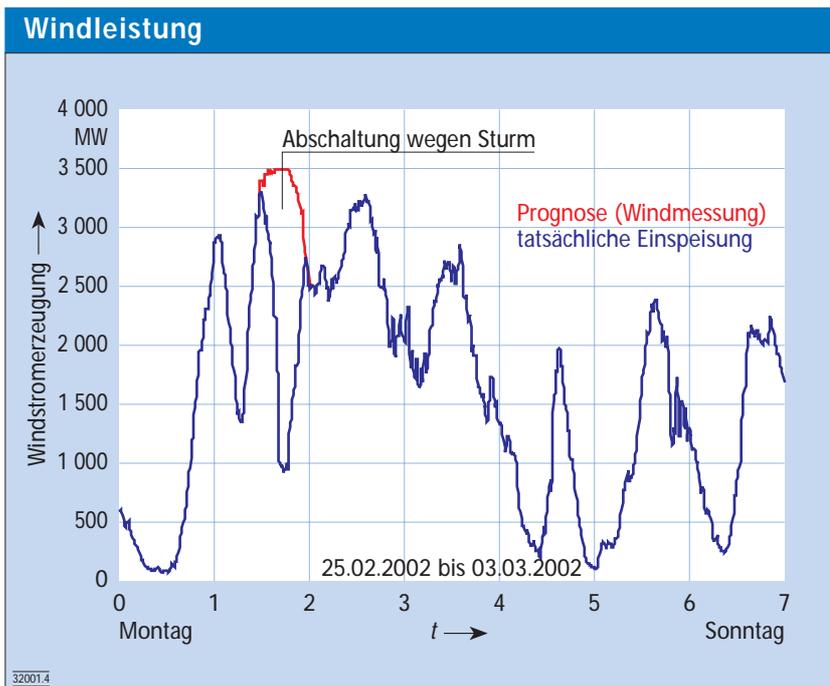


Bild 4. Ausfall von 2 500 MW am 26. Februar 2002 durch sturmbedingte Abschaltung von Windenergieanlagen

ten Leistungsregelkreisen sind jeweils die zugehörigen Brennstoff-/Last-Kennlinien eingetragen.

Da der Leistungshub eines einzigen Kraftwerks gewöhnlich nicht ausreicht, um die kurzzeitigen Schwankungen auszugleichen, wird im Folgenden das Verfahren auf *i* mit Teillast betriebene Kraftwerke erweitert, so dass man von einer brennstoff- oder kostenoptimalen »Gruppen-Folgeregelung« sprechen kann; die *i* mit Teillast arbeitenden Kraftwerke werden dabei entsprechend ihren Nennleistungen prozentual gleich beaufschlagt.

Um die dynamischen Fehler der integral wirkenden Netzregelung zu reduzieren, wird man am Ausgang des Netzreglers die prognostizierbaren Anteile von Netzlast und Einspeisung als Vorsteuerung aufschalten, was bei der Windleistung aber nur mit Einschränkungen sinnvoll ist. Vielmehr ist eine ausreichende Leistungsreserve

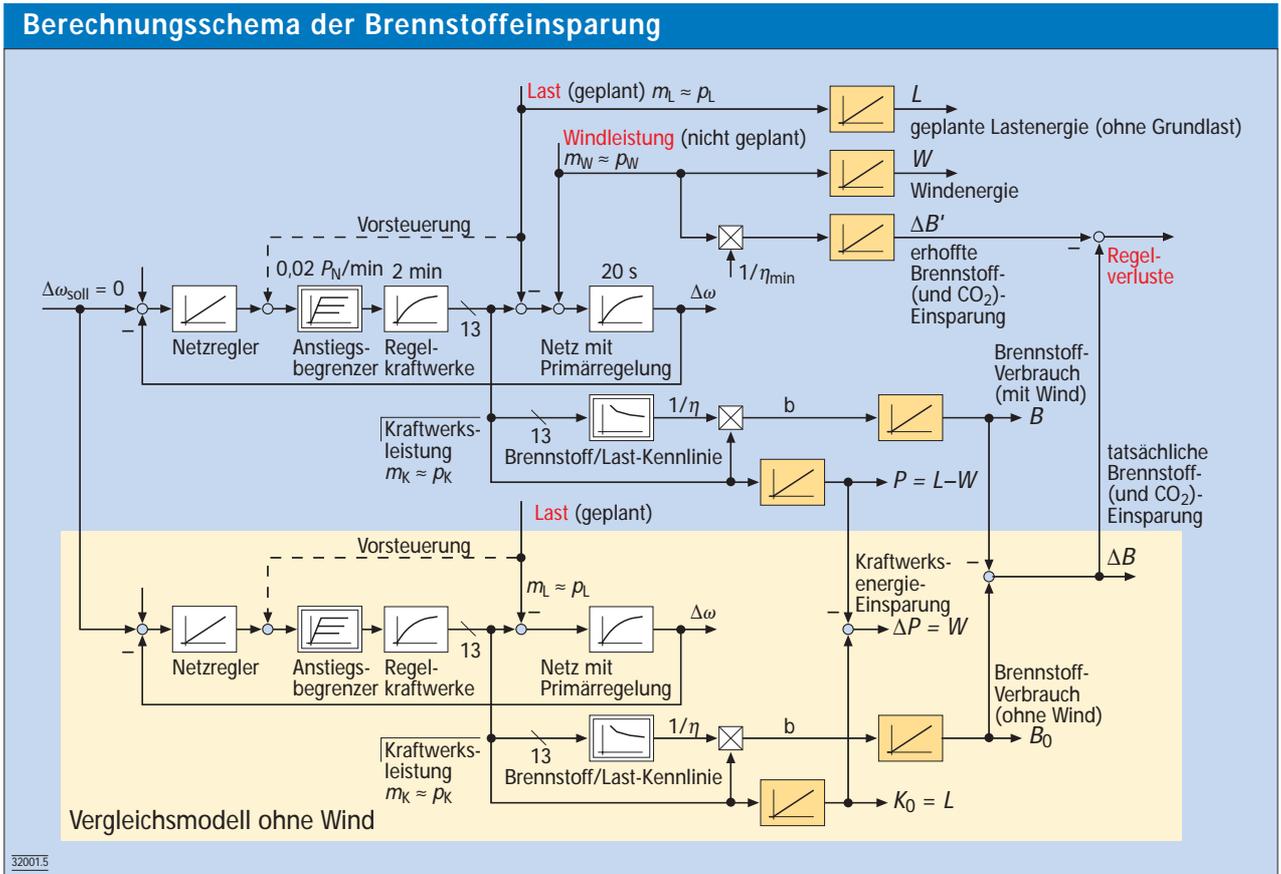


Bild 5. Erweitertes Blockschaltbild für die bei Einspeisung von Windleistung erzielbare Brennstoffeinsparung

vorzuhalten, da die Windleistung unvorhergesehenen Schwankungen unterliegt, etwa durch weiträumige Abschaltungen bei hoher Windgeschwindigkeit. Die Wahrscheinlichkeit solcher Störungen nimmt mit der Windgeschwindigkeit zu, weshalb es sich empfiehlt, die Leistungsreserve mit der Wind einspeisung zu erhöhen. Ein markantes Beispiel ist in Bild 4 zu sehen, als im nördlichen Teil des Eon-Netzes in kurzer Zeit mehr als 2 500 MW durch sturmbedingte Abschaltungen ausfielen [8]. Solche Einbrüche lassen sich nur durch bereits am Netz befindliche freie Kapazitäten, Wasser- oder andere schnellstartende Kraftwerke ausgleichen und verursachen hohe Kosten [9].

Die Netzregelung muss deshalb auch die kurzfristig aktivierbare Regelleistung, also die Summen-Maximalleistung aller gerade in Betrieb befindlichen Kraftwerke über den im Augenblick für die Frequenzregelung nötigen Wert

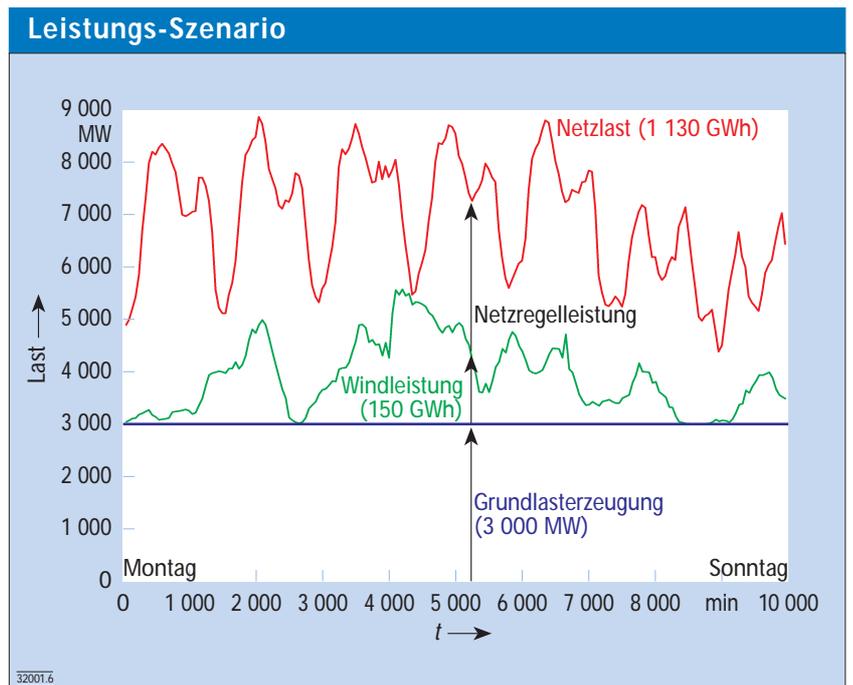


Bild 6. Leistungs-Szenario (Netzlast und Windleistung) für eine Woche im April 2001

hinaus erhöhen, was die Tendenz zum Teillastbetrieb mit Regelverlusten verstärkt. Sobald ein Grenzwert der Regelreserve unterschritten ist, muss ein weiteres Kraftwerk unter Berücksichtigung der emissions- oder kostenbedingten Reihenfolge und der Zeitvorgaben zugeschaltet und die Verteilung der Leistungs-Sollwerte im Sinne der geschilderten Gruppen-Folgeregelung neu geordnet werden; entsprechend ist bei einem Sinken des Leistungsbedarfs zu verfahren.

Zu erkennen ist, dass für eine Netzregelung Algorithmen erheblicher Komplexität notwendig sind und einfache Standard-Regelverfahren nicht ausreichen. Gegebenfalls muss der Dispatcher in der Netzleitstelle eine Minutenreserve anfordern, etwa bei kurzfristigen Einschränkungen der Verfügbarkeit von Anlagen oder bei Störungen im Netz.

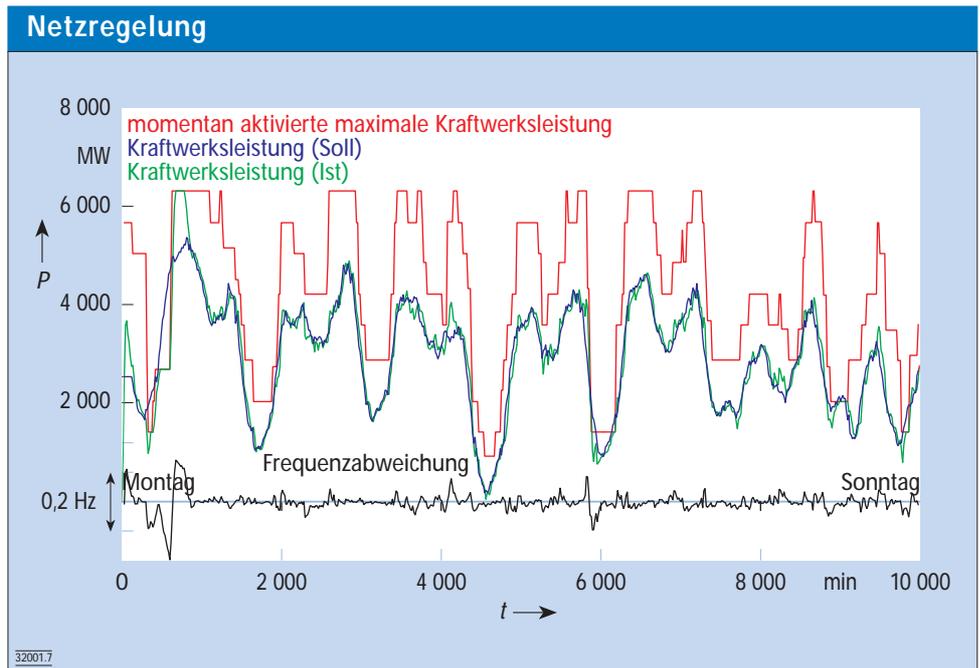


Bild 7. Simulation der Netzregelung mit der während einer Woche im April 2001 bestehenden Netzlast bei Windleistungseinspeisung,  $i = 3$ , Reserveleistung 1 000 MW

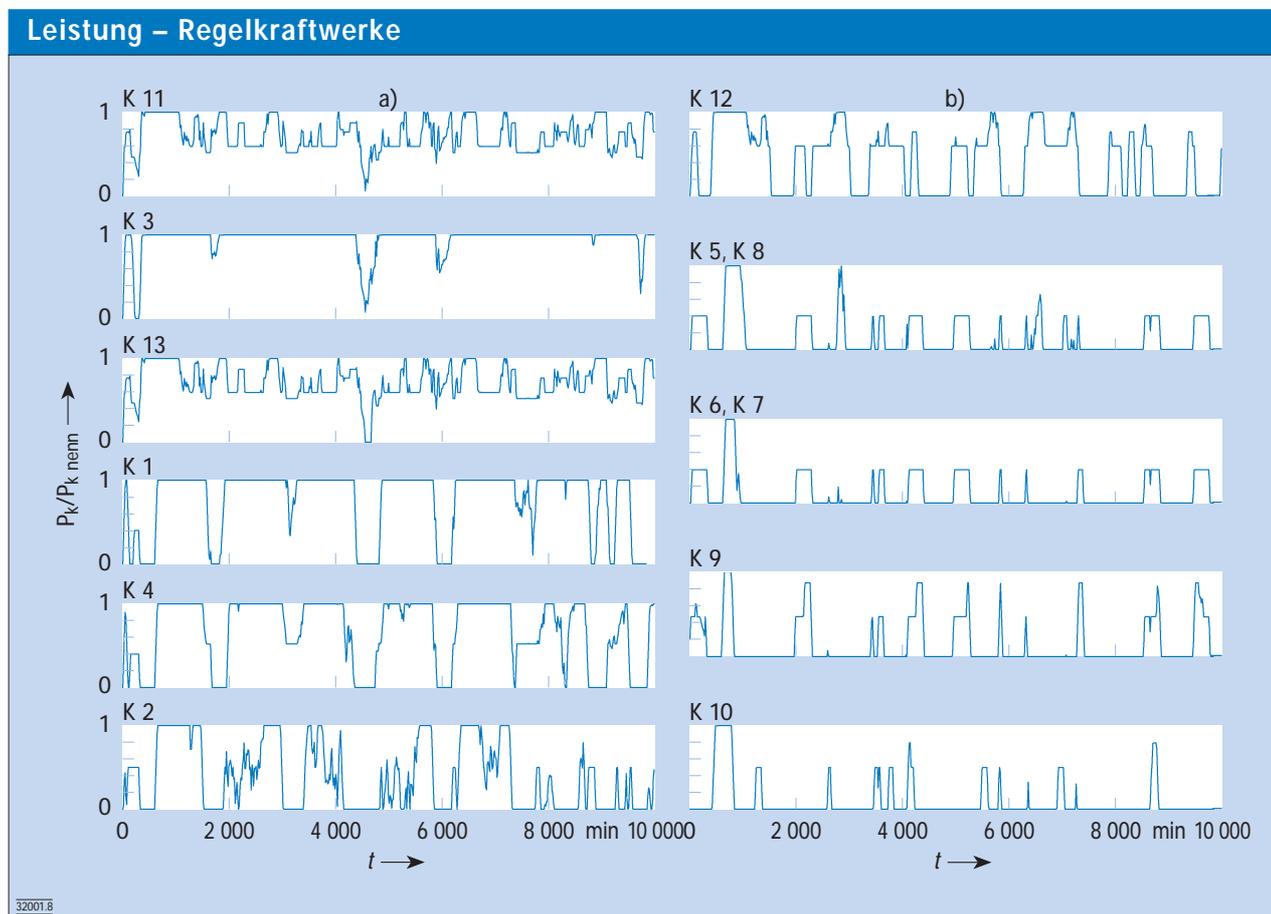


Bild 8. Auf Nennwerte bezogene Kraftwerksleistungen während der Testwoche mit Wind

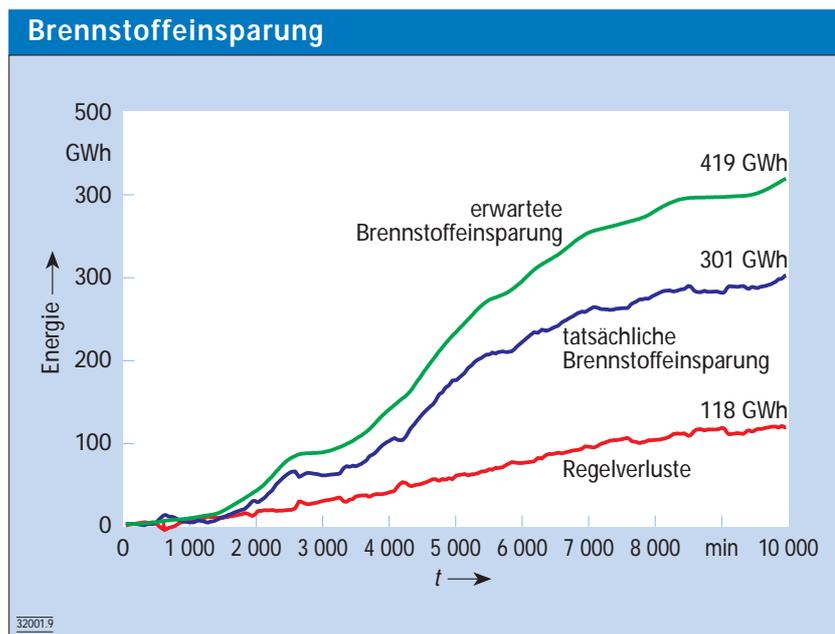


Bild 9. Erhoffte und tatsächliche während der Woche durch Wind eingesparte kumulierte Brennstoffmenge, Regelverluste

#### Simulation zur Schätzung der Brennstoffeinsparung

Soll die durch Windleistung erzielbare Brennstoff- oder CO<sub>2</sub>-Einsparung quantitativ bewertet werden, so ist das gesamte System unter Verwendung gemessener Verläufe von Netzlast und Windleistung für einen längeren Zeitraum, mindestens eine Woche, zu modellieren; anschließend sind die Ergebnisse mit denen ohne Wind zu vergleichen.

Ein vereinfachtes dynamisches Blockschaltbild der Netzregelung ist in Bild 5 gezeigt, wo alle kraftwerksspezifischen Größen (Leistungen, Soll-Leistungen, Maximalleistungen, Anstiegsbegrenzer, Brennstoffmengen, usw.) zu Vektoren mit 13 Elementen zusammengefasst sind, entsprechend den für das betrachtete Netz im Untersuchungszeitraum verfügbaren zehn Kohle- und drei Gas-Kraftwerken mit einer Gesamtleistung von 6 286 MW. Als Testfall dient das in der Woche vom 2. bis 8. April 2001 beobachtete Leistungs-Szenario (Bild 6). Der beim Anfahren eines Kraftwerks entstehende Brennstoffverbrauch kann mit einem von der Nennleistung und der vorhergehenden Stillstandsdauer abhängigen pauschalen Zuschlag berücksichtigt werden.

Die Lastenergie während des Untersuchungszeitraums betrug 1 130 GWh bei einer Grundlastzeugung von 3 000 MW, die eingespeiste Windenergie war 150 GWh, weniger als 15 %. Damals herrschte an einigen Tagen stürmisches Wetter. Andererseits hat sich seitdem die Kapazität der in Deutschland installierten Windenergieanlagen stark erhöht, von rd. 7 000 auf rd. 10 000 MW. Weitere erhebliche Steigerungen sind vor allem durch den geplanten Ausbau der Energiegewinnung vor der Küste zu erwarten [7].

In Bild 7 sind die Ergebnisse der Netzregelungs-Simulation mit Wind aufgetragen, wobei die Grundlastzeugung unberücksichtigt bleibt. Anhand der Energiebilanz:  $\text{Lastenergie} = \text{Kraftwerksenergie} + \text{Windenergie}$  lassen sich die Ergebnisse leicht pauschal überprüfen.

Bild 8 zeigt die vom Netzregler während der Woche aktivierten und auf die Nennleistungen bezogenen Kraftwerksleistungen; Kraftwerk 5 und 8 bzw. 6 und 7 sind identisch und werden parallel betrieben. Kraftwerke mit niedrigem Wirkungsgrad werden offensichtlich nur als Reserve bei kurzzeitigem Bedarf eingesetzt.

Für den gleichen Verlauf der Netzlast wird das in Bild 5 enthal-

tene Vergleichsmodell ohne Wind simultan berechnet, wodurch sich die Dimension der Vektoren auf 26 erhöht. Die Reserveleistung im Vergleichsmodell wird dabei auf das übliche Maß reduziert.

In Bild 9 sind die von der Windleistungseinspeisung erwartete und die tatsächlich erreichbare Brennstoffeinsparung aufgetragen, außerdem als Differenz die anfallenden Regelverluste.

Wie weitere Simulationsrechnungen zeigen, lassen sich auch großräumige Abschaltungen wie in Bild 4 auffangen, sofern die Netzregelung über eine ausreichende Leistungsreserve verfügt.

#### Diskussion der Ergebnisse und Zusammenfassung

Durch Nutzung natürlicher Energiequellen sollen fossile Energieträger eingespart und die Umwelt geschont werden. Um diesen Effekt zu quantifizieren, werden die in einem überwiegend von thermischen Kraftwerken (Kohle und Gas) versorgten Netz entstehenden Vorgänge bei Einspeisung von Windenergie analysiert; dabei sind die während einer Woche beobachteten Verläufe von Netzlast und Windleistung zugrunde gelegt. Es zeigt sich, dass bereits bei einem Windenergieanteil von weniger als 15 % der Lastenergie nennenswerte Regelverluste zu verzeichnen sind, indem sich der Brennstoffverbrauch und die Emissionen an anderer Stelle unbemerkt erhöhen. Zur Deckung der nicht genau prognostizierbaren und möglicherweise starken Störungen unterliegenden Windleistung sind zusätzliche Kraftwerksreserven nötig.

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass die oft vertretene Meinung, elektrische Netze könnten fast beliebig mit Strom aus Windenergieanlagen gespeist werden, unrealistisch ist. Der Grund liegt in der Diskrepanz zwischen dem Verlauf der Netzlast und der Änderung des räumlichen Windfeldes. Die Netzlast könnte nur durch Eingriffe in das Wirtschaftsgeschehen und unsere Lebensgewohnheiten verändert werden, etwa durch zeitweilige Abschaltungen wie in der kalifornischen Energiekrise, während das Windfeld nicht beeinflussbaren meteorologischen und aerodynamischen Gesetzen folgt.

Die bei der Erbringung der erforderlichen »Ausgleichs- oder Regelleistung« entstehenden Energieverluste lassen sich zwar durch Verteilung der schwankenden Windenergie auf größere Gebiete außerhalb der von der Einspeisung betroffenen Regelzone vermindern, doch setzt dies gesetzliche Auflagen wie in Deutschland voraus (EEG). Wenig wahrscheinlich ist ein UCTE-weiter Konsens, wo Länder mit großem Wasserkraft- oder Pumpspeicherpotenzial den überregionalen Ausgleich übernehmen, da in trockenen Jahren auch sie manchmal thermisch erzeugte Energie importieren müssen. Bereits jetzt äußert sich im skandinavischen Nordel-System Unruhe angesichts der durch die starke Einspeisung aus Wind und lokalen Heizkraftwerken in Dänemark verursachten Schwankungen, die viel Regelleistung erfordern und den Ausbau des Hochspannungsnetzes notwendig machen könnten. Zeitweilig wird vom dortigen Netzbetreiber Wind-Spitzenleistung zum Nulltarif exportiert oder Defizit-Leistung teurer eingekauft [10;11]. Bei einem europaweiten Ausgleich windbedingter Sekundär-Regelleistung wäre es notwendig, das Hochspannungsnetz zu verstärken, auch wären die elektrischen Übertragungsverluste zu berücksichtigen.

Ein anderer Vorschlag zum Ausgleich der schwankenden Windenergie sind Gasturbinen mit aus Biomasse erzeugtem Brennstoff [12]. Dies könnte aber zu unerwünschten Agrar-Monokulturen führen, wie bei der Alkoholerzeugung aus Zuckerrohr zur Treibstoffbeimischung in Brasilien. Außerdem würden damit die Probleme beim Zusammentreffen eines Überangebotes an Windenergie mit Schwachlast im Netz nicht gelöst.

Der vieldiskutierte künftige Übergang zu einer dezentralen Energieversorgungsstruktur mit steuerbaren »virtuellen Kraftwerken« kann erst dann eine Lösung bringen, wenn durch erneuerbare Energieträger Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit gesichert sind. Brennstoffzellen mit ihrem hohen Wirkungsgrad können zwar als Schutz gegen unerwartete Stromausfälle vorteilhaft sein, doch bieten sie keine Nachhaltigkeit, solange sie fossiles Erdgas

verwenden. Damit bleibt bei Ausbeutung des zweifellos vorhandenen Windenergiepotenzials auf dem Meer nur die Entwicklung großer chemischer Energiespeicher zur Entkopplung von Angebot und Nachfrage und zur Gewinnung umweltverträglicher Energie für künftige mobile Anwendungen [6]; dies wäre eine zwar längerfristige aber zukunftsweisende Strategie.

## SCHRIFTTUM

- [1] European Communities: Towards a European strategy for the security of energy supply. Green Paper, 2001 ISBN 92-894-0319-5.
- [2] Luther, M.: Technical and operational aspects for interconnecting wind generators. DVG/Epri-Workshop on Grid operation and planning in liberalized markets and emerging roles for grid operators, Frankfurt (Main) 2000.
- [3] Kleinkauf, W. et al.: Stromversorgung mit erneuerbaren Energien – dezentrale Strukturen und modulare Systemtechnik. FVS Tagung, Freiburg, 2000.
- [4] Leonhard, W.: Regelung in der elektrischen Energieversorgung. Teubner Studienbuch 1980.
- [5] Leonhard, W.: Liberalisierung der elektrischen Energieversorgung aus technischer Sicht. Jahrbuch der Braunschweigischen Wiss. Gesellschaft 2000, S. 103 – 128.
- [6] Leonhard, W.: Netzeinspeisung aus regenerativen Quellen. ew-Elektrizitätswirtschaft Jg. 101 (2002), H. 4, S. 36 – 41.
- [7] Burger, R.: Es herrscht Pionierstimmung unter den Herstellern von Windenergieanlagen. Frankfurter Allgemeine Zeitung v. 13.6.2001, S. 7.
- [8] Bouillon, H.: Auswirkungen des fluktuierenden Energieangebotes auf den Systembetrieb. VGB-Konferenz Erneuerbare Energien/Dezentrale Erzeugung, Mai 2002, Salzburg.
- [9] Bonde, B.: Der Stromwettbewerb hat seinen Preis. Frankfurter Allgemeine Zeitung v. 1.7.2002, S. 13.
- [10] Non-dispatchable production in the Nordel-System. Nordel Annual Report 2000.
- [11] Hilger, C.: The impact of decentralized generation on system operation. Eltra, 2001.
- [12] Schmid, J.: Im Energiemix der Zukunft wird Strom aus Wind eine dominierende Rolle spielen. Iset Pressemitteilung auf der World Wind Energy Conference and Exhibition. Berlin, Juli 2002.

(32001)

w. leonhard@tu-bs.de

kp.mueller@ieee.org