

Problematische Energiespeicherung

Netzeinspeisung aus regenerativen Quellen

Feeding the electrical grid from regenerative sources

Die Einspeisung aus erneuerbaren Energiequellen in das elektrische Netz ist nicht bedarfsgerecht und muss bei uns vorwiegend durch thermische Kraftwerke korrigiert werden; für den weiteren Ausbau sind deshalb auch Windkraftanlagen in die Netzregelung einzubinden. Langfristig sind große Speichereinrichtungen notwendig, deren Entwicklung gleichrangig mit der primären Energiegewinnung vorangetrieben werden sollte. Hierfür können Speicher mit chemischen Energieträgern von Interesse sein, bei denen die elektrische Endnutzung bedarfsgesteuert über ortsfeste oder mobile Brennstoffzellen stattfindet.

SUMMARY OF THE REPORT

Feeding the electrical grid from renewable sources is not matching the load and must be corrected by mainly thermal power stations; when further expanding the use of wind energy, the grid control must also include the wind converters. In the long run large storage facilities are needed that should be developed along with the primary energy acquisition. Chemical storage could be of interest in view of the energy content and a demand-driven end use with stationary or mobile fuel cells.

In Industrieländern sind wir gewohnt, jederzeit nahezu beliebig elektrische Leistung abrufen zu können; möglich wird dies mit den heute über ganze Kontinente und von Ballungszentren bis ins letzte Gebirgsdorf reichenden Drehstrom-Verbundnetzen. Sie werden von tausenden im Netz verteilten Generatoren mit sinusförmigen Spannungen gespeist (wozu es aus physikalischen Gründen keine Alternative gibt) und bieten wegen der Diversität der Energiequellen und ausgefeilten Schutzmaßnahmen ein Höchstmaß an Versorgungssicherheit. Im vermaschten Netz fließt die elektrische Leistung auf Pfaden minimaler Verluste zu den Verbrauchern, ähnlich einem im Rohrleitungsnetz strömenden Medium. Die Verfügbarkeit elektrischer Energie ist eine Grundlage unserer technischen Welt mit ihren Wegfall schwerer körperlicher Arbeit, industrielle Produktion, Mobilität und zahllose Dienstleistungen geprägten Möglichkeiten.

Die Generatoren als mechanisch-elektrische Energiewandler werden von Dampf-, Gas- oder Wasserturbinen angetrieben, die chemische (fossile), nukleare oder mechanisch-potenzielle Primärenergie in mechanisch-kinetische Energie umformen. Angesichts der enormen Elektrizitätsmengen (in Deutschland mehr als 500 Mrd. kWh/a) kommen die Grenzen des Energiekonsums in Sicht, bedingt durch die Endlichkeit fossiler Ressourcen (vor allem Öl und Gas) und die Beeinträchtigung der Umwelt durch Schadstoffemissionen und Abfallwärme bei der Energiegewinnung und -umwandlung. Regenerative Primärquellen, die letztlich fast alle auf Sonneneinstrahlung beruhen, sollen diese Nachteile

le vermeiden, doch vergisst man oft, dass es auch dort unerwünschte Nebeneffekte gibt, etwa einen hohen Landschaftsverbrauch wegen der geringen Energiedichte. Außerdem bleibt meist unbeachtet, dass elektrische Energie im Augenblick des Bedarfs bereitgestellt werden muss. *Bild 1* zeigt die Umwandlungskette für elektrische Energie von den Primärquellen zum Endverbraucher.

Die elektrische Gesamtlast eines Versorgungsnetzes ist das Ergebnis der beliebigen Aktivierung elektrischer Verbraucher durch Millionen von Netzkunden (ohne Besetzzeichen wie im Kommunikationsnetz). Zwar sind dies statistische Vorgänge, doch gibt es eine Systematik durch tägliche, wochenweise und jahreszeitliche Arbeits- und Lebensrhythmen, außerdem bekannte Abhängigkeiten von Wetter und Temperatur bis hin zu beliebten Fernsehsendungen, was eine verlässliche Vorhersage der Netzbelastung für den jeweils nächsten Tag ermöglicht; nachts und am Wochenende kann die Netzlast auf die Hälfte des Spitzenwertes zurückgehen. Detaillierte Verbrauchsmuster ermöglichen die Planung eines kosten- und emissions-optimalen Einsatzes der Kraftwerke, deren Inbetriebnahme Stunden dauern kann.

Bedarfsgerechte Bereitstellung elektrischer Energie

Elektrische Energie lässt sich in elektrischer Form nicht nennenswert speichern, weshalb die ins Netz eingespeiste Leistung der Netzlast genau folgen muss. Andernfalls schwankt die Frequenz und ein geordneter Parallelbetrieb des Verbundnetzes wird unmöglich – vergleichbar mit einer speicherlosen (just-in-time) Produktionsanlage, in der das zu verarbeitende Material bedarfsgerecht angeliefert werden muss, oder einem Flughafen ohne Warteschleifen, wo ankommende Flugzeuge sofort landen müssen.

Hier gibt es bei den Energiequellen wesentliche Unterschiede: Mit herkömmlichen Kraftwerken auf der Basis vorhandener Ressourcen, seien sie fossil, nuklear oder mechanisch (Wasser- oder Druckspeicher), lässt sich elektrische Energie bedarfsgerecht liefern, die Umwandlung in Elektrizität geschieht

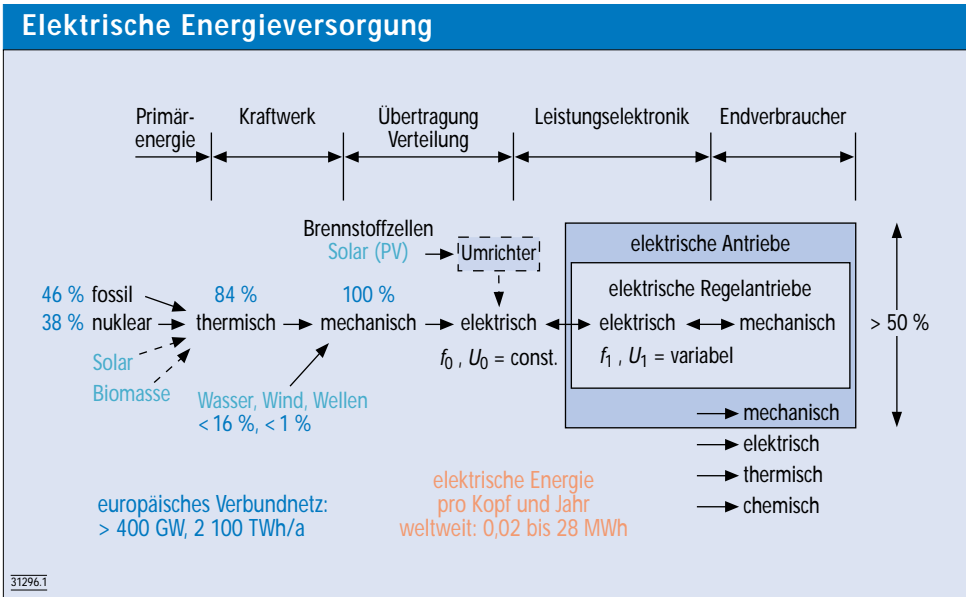


Bild 1. Umwandlungskette von den Primärquellen zum Endverbraucher

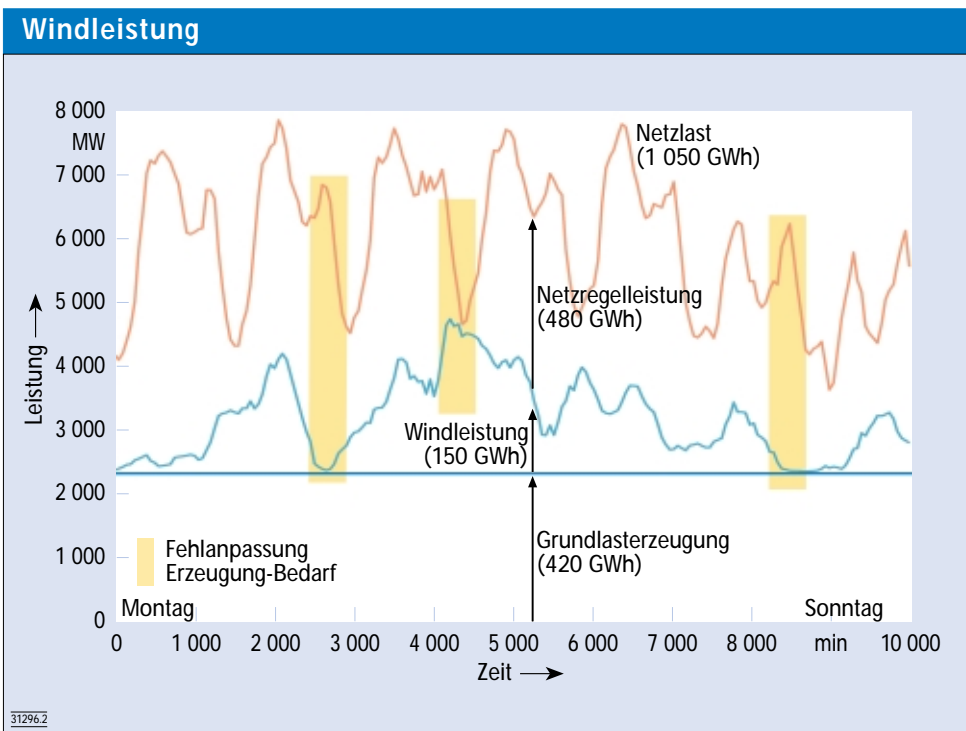


Bild 2. Netzlast und eingespeiste Windleistung

dann, wenn sie benötigt wird. Anders ist es bei regenerativen Quellen, etwa Wind oder Sonne, wo die angebotene und bei fehlendem Bedarf nicht sofort umgesetzte Bewegungs- oder Strahlungsenergie verloren geht, während bei Windstille oder fehlendem Sonnenschein der Energiebedarf der Last nicht gedeckt werden kann. Die Versorgung

zeitgebundener elektrischer Verbraucher aus regenerativen Quellen erfordert deshalb entweder die Orientierung des Verbrauchs an der momentan verfügbaren Leistung, was, anders als bei historischen Windmühlen, mit industriellen Verbrauchern nicht immer möglich ist, oder die Speicherung von in Schwachlastperioden gewonnener

Überschussenergie; windabhängige Betriebszeiten wären in der heutigen Wirtschaft wenig sinnvoll.

Die bei uns mit hohen Subventionen geförderte Energiegewinnung aus regenerativen Quellen ignoriert solche Zusammenhänge, indem man die z. B. aus Wind anfallende elektrische Leistung mit Priorität und ohne Rücksicht auf den momentanen Bedarf ins Netz einspeist, d. h. das elektrische Verbundnetz als leicht zugänglichen und scheinbar kostenlosen Ablageplatz für Energie nutzt. Solange es sich dabei um kleinere Beiträge handelte, mochte dies angehen, doch hat die Leistung aus Windfeldern inzwischen Dimensionen erreicht, bei denen unerwünschte Rückwirkungen auf den Netzbetrieb entstehen; die in Deutschland überwiegend in den Küstenregionen und im norddeutschen Flachland installierte Erzeugungskapazität aus Wind beträgt jetzt mehr als 7 000 MW und steigt weiter; sie entspricht mehr als 2 % des elektrischen Energiebedarfs.

Verdrängungswirkung der Netzregler

Das europäische Verbundnetz ist aus betrieblichen Gründen in Regelzonen unterteilt, davon sechs in Deutschland, wo mit Netzreglern dafür gesorgt wird, dass die zwischen den Zonen fließenden Austauschleistungen und die gemeinsame Netzfrequenz auf vorgegebenen Werten gehalten werden. In jedem Gebiet müssen Regelkraftwerke die Abweichungen der tatsächlichen Last vom tagesweise gut prognostizierbaren Teil der Netzlast decken. Außerdem müssen sie nun wegen der Priorität der Windenergie die zufallsbeding-



te und nicht bedarfsgerechte Einspeisung ausgleichen; die Windleistung verdrängt also Kraftwerksleistung an anderer Stelle mit dem Ziel, Brennstoffverbrauch und CO₂-Emissionen zu reduzieren. Sofern – wie in skandinavischen Ländern – überwiegend schnell steuerbare Wasserkraftwerke die Netzregelung besorgen, ist das Netzregelproblem leicht lösbar; Windenergie wird dann in speicherbare und somit höherwertige Primärenergie umgewandelt. Anders bei uns, wo vorwiegend thermische Regelkraftwerke eingesetzt werden, die einen eingeschränkten Arbeitsbereich haben und wegen der komplizierteren Umwandlungsprozesse den Steuerbefehlen langsamer folgen. Thermische Kraftwerke weisen außerdem im Teillastbetrieb einen höheren Brennstoffverbrauch und größere CO₂-Emissionen je kWh auf, so dass ein Teil der erhofften Einsparungen an anderer Stelle verloren geht.

Dies wird anhand der Situation im norddeutschen Verbundnetz während einer Aprilwoche 2001 in *Bild 2* deutlich; die Netzlast mit ihren gut prognostizierbaren tageszeitlichen Schwankungen zwischen rd. 4 000 und 8 000 MW wird dabei aus drei Quellen gedeckt:

- einem konstanten Anteil von rd. 2 500 MW aus Grundlastkraftwerken,
- einer stark schwankenden Windleistungseinspeisung bis zu rd. 2 500 MW sowie
- der zum Teil vom Netzregler gesteuerten Leistung aus thermischen Mittellast- und Regelkraftwerken, bei Windstille also die Differenz zwischen Netzlast und Grunderzeugung.

Die Intervalle mit ausgeprägter Bedarfs-Fehlanpassung der Windleistung sind markiert; in der Nacht vom Mittwoch zum Donnerstag wurde bei schwach belastetem Netz besonders viel Leistung eingespeist, umgekehrt am Samstagabend. Die Regelkraftwerke müssen solche Schwankungen zusätzlich zu den Änderungen der Netzlast ausgleichen, wobei die vorhandenen Prognoseverfahren für Windleistung (ein Tag voraus) Abweichungen bis zu 1 400 MW aufweisen.

Ein weiteres Problem sind nicht prognostizierbare Gradienten der Windleistung. Die in tausenden über ganz Norddeutschland verteilten Windkraftgeneratoren erzeugte Leistung kann, offenbar durch re-

gionale Windstörungen, hohe Gradienten der Summen-Leistung aufweisen, die sich bis zu mehreren hundert MW/15 min addieren und mit thermischen Kraftwerken nicht ausgleichbar sind (*Bild 3*); daraus folgen Leistungsverchiebungen zwischen den Regelzonen und eine verstärkte Unruhe des Netzbetriebes.

Da die herkömmlichen Regelkraftwerke wegen der Priorität der Windenergie nur liefern dürfen, wenn Windleistung nicht ausreichend zur Verfügung steht, werden sie in eine Lückenbüßerrolle gedrängt; der Kraftwerkspark lässt sich andererseits nicht reduzieren, da Flauteperioden zu überbrücken sind. Dies stellt die Rentabilität von Kraftwerksinvestitionen in Frage und kann die zukünftige Versorgungssicherheit gefährden.

Kurzfristig ist das Problem der Einspeisung von Windenergie während Schwachlastperioden nur durch die Einbindung größerer Windkraftanlagen in die Netzregelung zu entschärfen, indem die Netzregler nicht nur auf die Regelkraftwerke sondern auch auf Windanlagen einwirken und gegebenenfalls deren Leistung drosseln; auch die positiven Leistungsgradienten lassen sich über entsprechende Anschlussbedingungen begrenzen. In der Windkraftindustrie wären solche Maßnahmen zwar höchst unpopulär, doch sind sie bei dem heute erreichten und noch mehr beim

geplanten Ausbau der Windenergienutzung unvermeidlich; bei Offshore-Anlagen könnte die Steuerung der Windleistung über Gleichstrom-Verbindungen stattfinden.

Die geschilderten Schwierigkeiten werden sich durch die geplanten Offshore-Windfelder – man spricht von 25 000 MW bis zum Jahr 2030 in der Nord- und Ostsee – noch wesentlich vergrößern. Die Windleistung steigt dann auf ein Vielfaches, ihr Verlauf wird sich aber nicht nennenswert von dem in *Bild 2* unterscheiden, wo ja bereits eine weiträumige Mittelung vorliegt; wegen des Fehlens von Hindernissen wird die Windgeschwindigkeit über See eher noch stärker kohärent sein als über dem Festland, was das Problem der Fehlanpassung verschärft.

Energiespeicherung – eine zukunftsweisende Lösung

Bei einem so massiven Ausbau der Windenergienutzung wird eine Lösung des Speicherproblems dringend, wobei aber die erforderlichen Leistungen alles Bisherige in den Schatten stellen, auch große Pumpspeicherwerke mit tausenden von MW. Eine zukunftsweisende Lösung könnte es sein, die statistisch anfallende Windenergie chemisch zu speichern, etwa indem man mit der in Offshore-Anlagen gewonnenen elektrischen Energie vor Ort oder auf dem Festland Wasserstoff

Gradienten der Windleistung

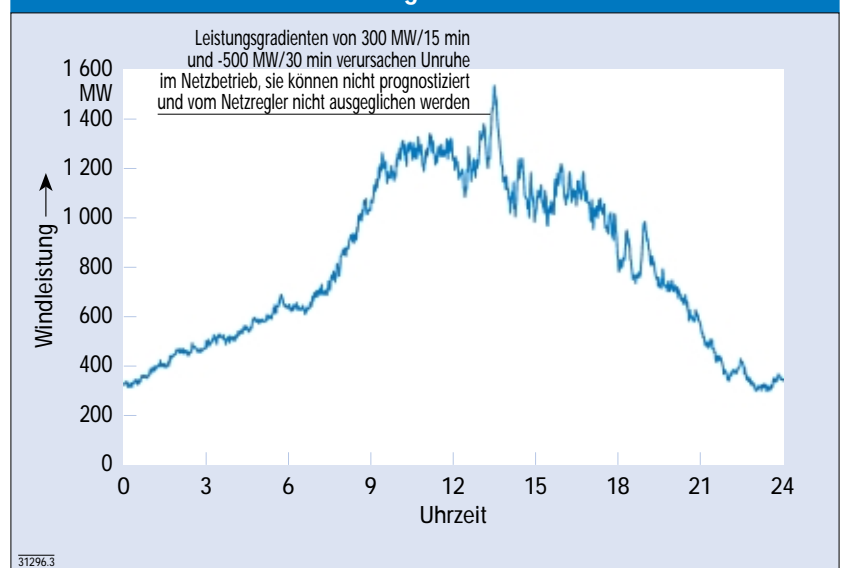


Bild 3. Hohe Gradienten haben eine verstärkte Unruhe des Netzbetriebes im Eon-Netz zur Folge



Bild 4. Pilkington-Solar, Solargenerator Herne, 1 MW, 750 MWh/a, 10 000 m² Solarzellen

oder andere Energieträger erzeugt und unter Tage speichert, um die Energie später mit Brennstoffzellen bedarfsgerecht in elektrischen Strom zurückzuverwandeln; dabei kommen dezentrale ortsfeste Anlagen mit Umrichtern zur Netzeinspeisung oder auch mobile Anwendungen in Betracht.

Die Elektrolysetechnik ist weit fortgeschritten und es gibt leistungsfähige Anlagen mit gutem Wirkungsgrad (> 80 %), doch wären wegen der neuen Dimensionen umfangreiche Entwicklungen erforderlich; angesichts des verbreiteten Optimismus hinsichtlich der viel komplizierteren und weniger weit fortgeschrittenen Brennstoffzellentechnologie sollte aber auch die schritthaltende Weiterentwicklung großer Elektrolyseanlagen technisch praktikabel sein. Die Gewinnung elektrischer Energie aus Wind und ihre bedarfsgerechte Anwendung würden damit entkoppelt und so ein wichtiges Hindernis für die Nutzung regenerativer Energiequellen beseitigt. Die direkte Netzeinspeisung zufallsbedingt anfallender Windenergie ohne Rücksicht auf den momentanen Bedarf und ohne Speicherung ist jedenfalls keine zukunftsfähige Lösung.

Speicherbedarf auch bei Solarenergie

Ähnliche Probleme der Bedarfs-Fehlanpassung, wenngleich bisher wegen des geringen Umfanges bei

uns nicht aktuell, entstehen bei der Einspeisung von Energie aus Fotovoltaik-Generatoren in das elektrische Netz, wegen der erforderlichen Umrichter künftig ein weiteres wichtiges Anwendungsgebiet der Leistungselektronik. Angesichts der geringen Ausbeute wären rd. 7 000 Anlagen von der Größe des in Bild 4 gezeigten Solargenerators erforderlich, um 1 % der in Deutschland verbrauchten elektrischen Energie zu liefern.

Die Sonneneinstrahlung hat, ähnlich wie der Lastverlauf, eine ausgeprägte tagesperiodische

Komponente, doch hängt die erzeugte elektrische Leistung wie beim Wind von nicht vorhersehbaren Wetterbedingungen ab; da jede vorbeiziehende Wolke Schatten wirft und im Leistungsverlauf Spuren hinterlässt, können schnelle Schwankungen entstehen, die mit thermischen Regelkraftwerken nicht ausgleichbar sind.

Bild 5 zeigt die von einem großen Solargenerator auf dem Münchener Ausstellungsgelände am Tag der Sonnenfinsternis im August 1999 ins Netz eingespeiste Leistung; der zerklüftete Verlauf (abgesehen vom »Black-out« um die Mittagszeit) führt im Netz zu erhöhtem Rauschen durch schwankende Leistungsflüsse auf den Leitungen. Manchmal wird gesagt, dieser Effekt werde sich bei Einspeisung aus vielen örtlich entfernt angeordneten Solargeneratoren ausgleichen, doch gilt dies natürlich nur aus globaler Sicht, da die räumliche Mittelung ja über Ausgleichsströme zwischen den verschiedenen Solargeneratoren erfolgt.

Eine Voraussetzung für den Ausbau solarelektrischer Energiegewinnung ist auch hier die örtlich benachbarte Anordnung von dezentralen Speichern. In dünn besiedelten Trockengebieten geschieht dies schon heute (wegen der hohen Kosten allerdings nur in geringem Umfang) mit solarbetriebenen Pumpen; in großem Maßstab wären solargespeiste Meerwasser-Entsalzungsanlagen denkbare Verbrau-

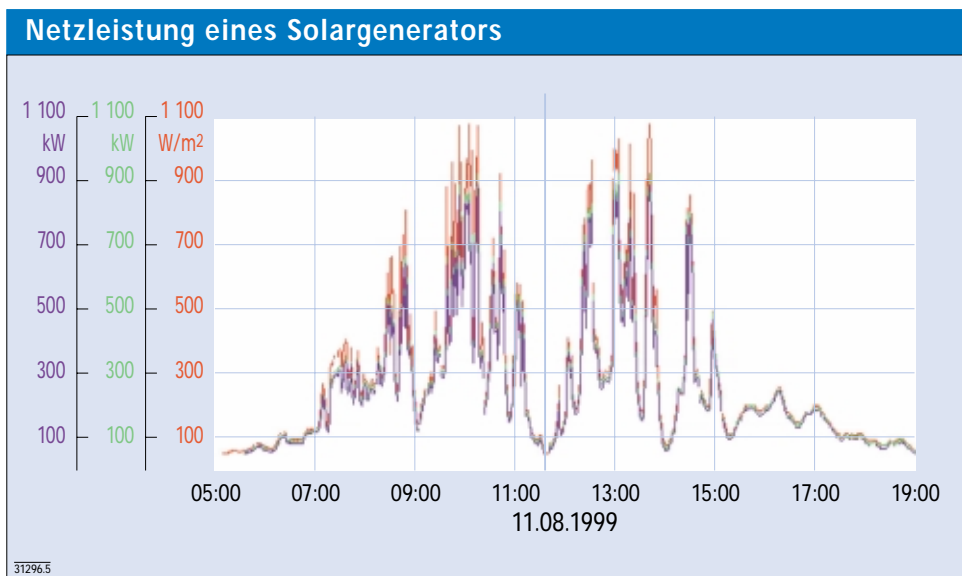


Bild 5. Siemens Solar, Netzleistung des Solargenerators München am Tag der Sonnenfinsternis, 1 MW, 1GWh/a, 7 800 m² Solarzellen



cher, von denen es am Persischen Golf mehrere mit einem Leistungsbedarf von jeweils hunderten von MW gibt. Von solchen systemtechnischen Lösungen ist gegenwärtig bei uns nur noch selten die Rede, vielmehr beschränkt man sich auf den kurzfristig gangbaren, aber ohne Speicherung nicht zielführenden Weg, die solare Netzeinspeisung mit hohen Subventionen (0,99 DM/kWh, in manchen Städten bis zu 2 DM/kWh) zu forcieren.

SCHRIFTTUM

- [1] European Communities: Towards a European strategy for the security of energy supply, Green Paper, 2001, ISBN 92-894-0319-5.
- [2] *Burger, R.*: Es herrscht Pionierstimmung unter den Herstellern von Windkraftanlagen, Frankfurter Allgemeine Zeitung vom 13. 6. 01, S. 7.
- [3] *Luther, M.*: Technical and operational aspects for interconnecting wind generators, DVG/Epri – Workshop on Grid opera-

tion and planning in liberalized markets and emerging roles for grid operators, Frankfurt 2000.

- [4] *Kleinkauf, W.* u. a.: Stromversorgung mit erneuerbaren Energien – dezentrale Strukturen und modulare Systemtechnik, FVS Tagung, Freiburg 2000.
- [5] *Szyszka, A.*: Regenerative Energieversorgung am Beispiel des SWB-Projektes Neunburg vorm Wald, unter besonderer Berücksichtigung von Brennstoffzellenanlagen, VDI-Berichte Nr 1174, 1995.
- [6] *Cramer, G.*: Solarkraftwerk mit modularem Aufbau, *Elektronik* 1999, H. 19, S. 68.
- [7] Pilkington Solar: Megawattstark, Druckschriften.
- [8] *Cunow, E.; Giesler, B.*: The megawatt solar roof at the new Munich Trade Fair Centre – an advanced and successful new concept for PV plants in the megawatt range. 11th Intl. Science and Engineering Conference, Hokkaido 1999.
- [9] Die Technologie des MTU-Druck-Elektrolyseurs, MTU Presseinformation, 1999.
- [10] *Miller, E.*: Mining Megawatts from compressed air, *IEEE Spectrum*, August 2001, pg. 27 (Projekt einer 2700 MW Druckspeicheranlage).
- [11] Beiträge zur Energy Storage Association Meeting (ESA) 2001, Chattanooga, TN: *Sæbrink, K.*: Large-scale Wind Power and Energy Storage. *Pedersen, J.; Kristoffersen, B.B.; Eriksen, P.B.*: System Value of Electric

city Storage. *Hoagland, J.; Ray, M.*: Commercial application of Regenesys Flow Power Technology (Pilotprojekt einer 12 MW, 120 MWh elektrochemischen Speicheranlage).

- [12] *Leonhard, W.*: Regelung in der elektrischen Energieversorgung, Teubner Studienbuch 1980.
- [13] *Leonhard, W.*: Liberalisierung der elektrischen Energieversorgung aus technischer Sicht, Jahrbuch der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft 2000, S. 103-128.

(31296)

w.leonhard@tu-bs.de

www.ifr.ing.tu-bs.de