

DISS ETH Nr. 17324

„Dynamische Simulation eines Lastmanagements und Integration  
von Windenergie in ein Elektrizitätsnetz auf Landesebene unter  
regelungstechnischen und Kostengesichtspunkten.“

ABHANDLUNG

zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER WISSENSCHAFTEN

der

ETH ZÜRICH

vorgelegt von

Marian Klobasa

Dipl. Ing., Universität Karlsruhe

geboren am 31.12.1975

in Deutschland

Angenommen auf Antrag von

Prof. Dr. Eberhard Jochem

Prof. Dr. Göran Andersson

2007

## Kurzfassung

Die Anforderungen an ein zukünftiges nachhaltiges Elektrizitätssystem bestehen in einer klimafreundlichen und ressourcenschonenden Strombereitstellung; sie kann mit erneuerbaren Energien, darunter auch mit der Windenergie bei entsprechendem Windangebot, langfristig kostengünstig realisiert werden. Im Vergleich zu konventionellen Kraftwerken ist die Einspeisung aus Windenergie größeren Fluktuationen unterworfen und nur eingeschränkt vorherzusagen. Daraus ergeben sich Rückwirkungen auf den Betrieb der Stromnetze, die sich u. a. in einem erhöhten Bedarf und Abruf an Regelleistung und damit verbundenen Kosten zeigen. Diesen Bedarf durch Speicherung von Elektrizität in Schwunrädern, Pumpspeicherkraftwerken oder Druckluftspeichern zu decken, erfordert einen erheblichen Kapitaleinsatz und ist sehr kostenintensiv. Deutlich weniger kapitalintensiv könnte die Nutzung von nachfrageseitigen Verlagerungspotenzialen sein, die durch den Einsatz eines Lastmanagements bei den Stromverbrauchern die Möglichkeit bieten, die Gesamteffizienz des Stromversorgungssystems zu steigern.

Ziel der Arbeit war es daher zu untersuchen, ob und in welchem Umfang die verstärkten Anforderungen nach Regelungsmöglichkeiten innerhalb des Stromnetzbetriebes in Zukunft auch mit einer steuerbaren und flexiblen Nachfrage erfüllt werden können. Die Ausgangshypothese ist dabei, dass ein intelligentes Lastmanagement bei den Stromanwendern bei einem weiteren Anstieg der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien im Vergleich mit einer reinen erzeugungsseitigen Regelung (inklusive der Nutzung von Speichertechnologien) zu einer deutlichen Kostensenkung der Netzregelung führen kann.

Dazu wird zunächst das technische und ökonomische Potenzial an verlagerbarer und flexibler Nachfrage bei den Stromanwendungen systematisch analysiert, um Umsetzungsmöglichkeiten und relevante Akteure zu identifizieren. Zur Quantifizierung der Effizienzgewinne und Regelungskosten wurde ein Simulationsmodell entwickelt, das die Flexibilität der Stromnachfrage, die Erzeugungscharakteristik der Windenergie und das traditionelle Stromerzeugungssystem abbilden kann. Als neuer Ansatz wird dabei das Zusammenspiel der Regelenergievorhaltung der Stromerzeuger und der Einsatz eines Lastmanagements bei den Stromverbrauchern innerhalb eines Modells simuliert.

Lastverlagerungspotenziale wurden in allen Bereichen der Stromnachfrage identifiziert. Dabei stehen in Deutschland ca. 3 GW in der Industrie, weitere 3 GW im GHD-Sektor und weitere 4 GW im Haushaltsbereich im Mittel zur Verfügung. Darüber hinaus existieren außertemperaturabhängige Potenziale bei Klimatisierungsanwendungen von über 5 GW und bei Nachtspeicherheizungen von bis zu 18 GW. Ökonomisch attraktiv

sind vor allem Anwendungen im Industriebereich sowie Kälteanwendungen im Lebensmittelhandel.

Bei niedrigen Penetrationsraten der Windenergie (< 5 % des Stromverbrauchs) liegen die zusätzlichen Kosten für die erzeugungsseitige Regelung des deutschen Stromnetzes bei ca. 2,3 Euro/MWh entsprechend 25 Mio. Euro und steigen bei hohen Penetrationsraten (18 % des Stromverbrauchs) auf 4,8 Euro/MWh (entsprechend 475 Mio. Euro) bzw. (bei 22 % Penetrationsrate) auf 5,5 Euro/MWh (entsprechend 675 Mio. Euro) in 2020. Im Jahr 2006 lag der Stromanteil aus Windenergie in Deutschland bei ca. 6 %.

Der Einsatz der Lastmanagementpotenziale bei den Stromverbrauchern kann diese erzeugungsseitigen Kosten um bis zu 20 % auf 380 bzw. 560 Mio. Euro pro Jahr reduzieren. Die anlegbaren Kosten für die Lastmanagementpotenziale liegen damit bei 10 bis 20 Euro pro kW und Jahr. Im Industriebereich wurden die Kosten für eine Aktivierung von Lastmanagement (z. B. bei der Chlor-, Aluminium- und Elektrostahlindustrie) auf unter 4 Euro pro kW geschätzt, so dass hier ein Großteil der Potenziale wirtschaftlich betrieben werden kann.

Verbesserte Windleistungsprognosen können die zusätzlichen Kosten der erzeugungsseitigen Regelung auf unter 2 Euro/MWh reduzieren. Der Einsatz der Lastmanagementpotenziale bei den Stromanwendern führt zu einer weiteren Reduzierung auf unter 1 Euro/MWh.

Insgesamt bestätigen die Analyseergebnisse die Ausgangshypothese der Dissertation. Der Einsatz heutiger Informations- und Kommunikationstechnik im Bereich der Stromnutzung wird ein Element auf dem Weg zu einer nachhaltigen Stromwirtschaft.

management potentials can lower the supply-side costs by up to 20 % to 384 respectively 560 million Euro. The investable costs for load management thus amount to 10 to 20 Euro per kW and year. In the industrial sector, the costs for activating load management have been estimated at less than 4 Euro per kW, so that a large share of the potentials can be operated economically here. Improved wind power forecasts could reduce the additional costs to below 2 Euro/MWh. The use of load management potentials results in a further reduction to less than 1 Euro/MWh.

As a result of this thesis the importance of information and communication technology for a sustainable power system becomes clear. The usage in the electricity demand sector is a further step in this direction.