

Energiemeteorologie

Detlev Heinemann, Jürgen Parisi, Hans-Peter Waldl und Hans Georg Beyer

Die meteorologischen Randbedingungen der Energieversorgung gewinnen gegenwärtig mit steigendem Tempo an Bedeutung: Mit außerordentlich hohen relativen Wachstumsraten werden erneuerbare Energien in die Stromversorgungsstrukturen integriert, so daß nicht nur die Nutzung elektrischer Energie, sondern verstärkt auch ihre Erzeugung durch das Wettergeschehen beeinflusst wird. Dies verlangt nach neuen Methoden, die den vielfältigen Einfluß der Meteorologie auf die Energieerzeugung aus diesen Quellen beschreiben und meteorologische mit physikalisch-technischen Fragestellungen verknüpfen. So sind für einen wirtschaftlichen Einsatz von Wind- und Solarenergie detaillierte Kenntnisse der grundsätzlich verfügbaren Ressourcen nötig, aber auch verlässliche kurzfristige Vorhersagen der entsprechenden Energieflüsse sind häufig ein „Muß“ für eine erfolgreiche Anwendung. Diesen vielfältigen neuen Aufgaben widmet sich die Energiemeteorologie.

In bestimmten Versorgungsgebieten betragen mittlere, von Windenergieanlagen bereitgestellte Anteile an der Netzleistung bereits heute deutlich über 10 % (Schleswig-Holstein: 13 %). Situationen mit einer Windstromproduktion, die die jeweilige Netzlast gar übersteigt, treten schon heute vermehrt auf. Die geplante Errichtung solarthermischer Kraftwerke in sonnenreicheren Regionen könnte dort in kurzer Zeit zu vergleichbaren Situationen führen. Realistische Abschätzungen zukünftiger Anteile erneuerbarer Energien an der Stromversorgung der Industrieländer gehen von 30 – 50 % nach dem Jahr 2020 aus. Diese Zahlen zeigen die Tendenz zu einer zukünftig wesentlich stärkeren Einbindung erneuerbarer Energien in die Energieversorgung.

Die Energiemeteorologie, ein neues angewandtes Forschungsgebiet, untersucht und beschreibt den unmittelbaren Einfluß atmosphäri-

scher Vorgänge auf die Energieerzeugung aus erneuerbaren Quellen. Im einzelnen sind ihre Aufgaben:

- ▶ Beschreibung des lokalen/regionalen Potentials erneuerbarer Energiequellen („resource assessment“) und Entwicklung von Methoden hierzu,
- ▶ Erfassung und Modellierung der räumlichen und zeitlichen Variabilität dieser Energieflüsse,
- ▶ Vorhersage der kurzfristigen Leistungsabgabe von Wind- und Sonnenenergiesystemen und Entwicklung von Modellen hierzu,
- ▶ Integration der meteorologischen Randbedingungen in Modelle zur Analyse des Betriebsverhaltens erneuerbarer Energiesysteme.

Bei diesen Aufgaben ist die Energiemeteorologie – ähnlich z. B. der Klimaforschung – von einer starken Verknüpfung von physikalischen und meteorologischen Methoden geprägt. Zur Bearbeitung der vielfältigen komplexen Fragestellungen lassen sich dabei insbesondere auch moderne physikalische Verfahren, z. B. aus der Nichtlinearen Dynamik, der Statistischen Physik oder der Turbulenzforschung [1], mit Erfolg einsetzen und weiterentwickeln. Zusätzlich erfordert die Einbeziehung der Energiewandlungssysteme in die Untersuchungen sowie die Komplexität der anstehenden Optimierungsaufgaben hier interdisziplinäres Zusammenwirken mit Ingenieurwissenschaften und Informatik.

Im folgenden werden einige aktuelle Beispiele aus dem Forschungsgebiet Energiemeteorologie vorgestellt.

Satellitenbilder und Sonnenenergie

Die erhöhte Nachfrage nach genaueren Informationen über die zeitliche und räumliche Struktur der Sonneneinstrahlung hat sich parallel in der Klimaforschung (die Sonnenstrahlung ist die wesentliche die Energiebilanz der Erde bestimmende Größe) und in der Sonnenenergienutzung entwickelt. Die Dichte des bodengestützten Meßnetzes ist jedoch weiterhin äußerst

gering und die zeitliche Auflösung der Daten unzureichend. Gleichzeitig mit dem wachsenden Interesse an diesen Daten haben sich Meteorologie-Satelliten als Meßplattformen etabliert und liefern nun gerade für die Bestimmung der Strahlungsbilanz in der Atmosphäre wertvolle Daten.

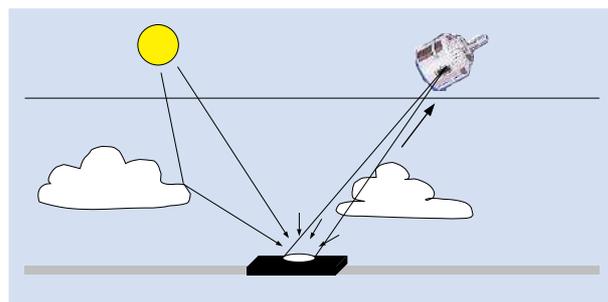


Abb. 1: Die am Ort eines Satelliten gemessene kurzwellige Strahlungsflußdichte ($\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1}$) wird durch die von Atmosphäre, Wolken und Boden reflektierte Strahlung bestimmt. Für die Nutzung der Sonnenenergie ist dagegen die hemisphärisch integrierte Strahlungsflußdichte am Erdboden (Wm^{-2}) von Interesse.

Aus den Satellitendaten läßt sich die Strahlungsflußdichte am Erdboden über die Strahlungsbilanz gewinnen [2] (Abb. 1). Für eine planparallele, horizontal homogene Atmosphäre ergibt sich die Einstrahlung am Boden aus dem einfachen Zusammenhang:

$$F = \frac{F^\downarrow - F^\uparrow - F_a}{1 - \rho}$$

Hierbei sind F^\downarrow die extraterrestrische Strahlung am Oberrand der Atmosphäre, F^\uparrow die vom System Erde/Atmosphäre zurückgestreute Strahlung und F_a die in der Atmosphäre absorbierte Strahlung, ρ ist die Reflektivität der Erdoberfläche. Mit den Methoden der Strahlungstransferrechnung läßt sich prinzipiell die Wechselwirkung von Strahlung mit den Bestandteilen der Atmosphäre (Luftmoleküle, Aerosole, Wolken) explizit berechnen. Die genaue Kenntnis über Zusammensetzung und Zustand der Atmosphäre in allen Höhen würde es also erlauben, die am Erdboden auftreffende Sonnenstrahlung exakt zu beschreiben. Diese Informationen sind jedoch nur teilweise verfügbar, so

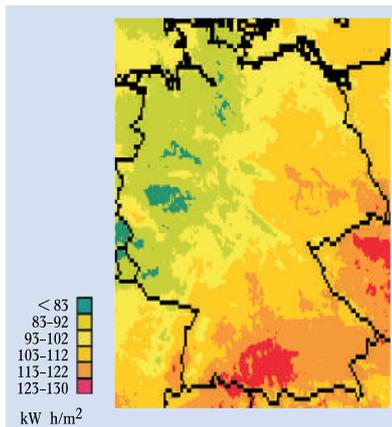
Dr. Detlev Heinemann, Prof. Dr. Jürgen Parisi, Dr. Hans-Peter Waldl, Fachbereich Physik, Abteilung Energie- und Halbleiterforschung, Universität Oldenburg, D-26111 Oldenburg; Prof. Dr. Hans Georg Beyer, Fachhochschule Magdeburg, D-39104 Magdeburg

Tabelle: Kenndaten des Satelliten METEOSAT 7

geostationär	35 800 km Höhe
räumliche Auflösung	max. $2,5 \times 2,5 \text{ km}^2$
Zeitauflösung	30 min
Signalauflösung	8 bit
Spektralbereiche	0,5 - 0,9 μm (VIS) 5,7 - 7,1 μm (WV) 10,5 - 11,5 μm (IR)

daß Annahmen und Vereinfachungen zur „Modellphysik“ gemacht werden müssen. Hier reicht das Spektrum von einfachen statistischen Regressionsverfahren bis zum Einsatz von Strahlungstransfermodellen, in denen wesentliche Prozesse parametrisiert werden. Mit diesen Verfahren gelingt es nun, aus den Daten geostationärer Satelliten (siehe Tabelle) Abschätzungen des Solarenergieangebotes am Erdboden zu machen [3], deren Genauigkeit z. B. für Monatsmittelwerte mit konventionellen Bodenmessungen

Abb. 2: Beispiel einer Karte der horizontalen Globalstrahlungssumme für Deutschland, April 1998. Die Daten mit einer räumlichen Auflösung von $3 \times 5 \text{ km}$ wurden aus dem Meteosat-Rückstreuungssignal gewonnen.



vergleichbar ist (Abb. 2). Von künftigen Satellitengenerationen können neben einer höheren räumlichen und zeitlichen Auflösung vor allem zusätzliche Informationen zu wesentlichen Größen (Aerosole, Wolken) erwartet werden.

Satellitendaten erlauben es, das regionale Sonnenenergiepotential abzuschätzen, z. B. für die sonnenreichen Länder Afrikas, in denen verlässliche Bodenmeßdaten oft gar nicht existieren. Diese Datenquelle erlaubt darüber hinaus die Untersuchung der räumlich/zeitlichen Variabilität der Solarstrahlung in bisher nicht zugänglichem Maße, die für eine statistische Betrachtung der gleichzeitigen Erzeugung in räumlich verteilten, vernetzten Systemen notwendig ist. Gemeinsam mit bodengestützten Messungen in kleine-

ren räumlichen und zeitlichen Skalen läßt sich auf diese Weise ein umfassendes Bild der statistischen Eigenschaften der Solarstrahlung gewinnen.

Windenergie

Die wirtschaftliche Nutzung von Windenergie setzt naturgemäß die detaillierte Kenntnis der zu erwartenden Energieerträge voraus. Diese hängen von den lokalen und regionalen klimatologischen Verhältnissen ab. Als Planungsgrundlage für Windkraftanlagen dienen Untersuchungen des regionalen Windenergiepotentials sowie Analysen von Einzelstandorten. Die hierzu eingesetzten Methoden basieren durchweg auf strömungsmechanischen und meteorologischen Ansätzen.

Ist das betrachtete Gelände einfach im strömungsphysikalischen Sinn, wie dies z. B. in den meisten Gegenden der norddeutschen Tiefebene der Fall ist, können etablierte Standardverfahren wie das Europäische Windatlasverfahren zur Potentialbestimmung eingesetzt werden [4]. Diese beruhen auf praxisbewährten kinematischen Überlegungen zur vertikalen Struktur der bodennahen Grenzschicht. Zunehmend wird jedoch die Windenergienutzung im Binnenland, vor allem in den Mittelgebirgen, bedeutend. Hier ist der Einfluß der zum Teil sehr stark gegliederten Geländeformen auf die Windströmung zu berücksichtigen. Auch europaweit sind die Regionen mit hohem Windenergiepotential oft gebirgig. Zur detaillierten Modellierung der Strömungsverhältnisse an diesen potentiellen Standorten werden in der Regel speziell angepaßte, mesoskalige meteorologische Modelle verwendet, die seit längerem im

Rahmen der Vorhersagemodelle der Wetterdienste und für die Berechnungen von Schadstoffausbreitungen zum Einsatz kommen [5]. Rechnungen dieser Art können über Nesting-Ansätze, dem „Ineinanderschachteln“ von Modellen auf unterschiedlich parametrisierten Skalen, räumliche Auflösungen von 100 m und feiner aufweisen. Abb. 3 zeigt Ergebnisse einer mesoskaligen Strömungsmodellierung für eine gebirgige Insel. Im Bereich der Windenergienutzung werden an die Genauigkeit dieser Verfahren völlig neue Anforderungen gestellt. So wird in der Regel eine Unsicherheit der Windgeschwindigkeitsabschätzung in der Größenordnung von 5 - 10 % gerade noch für akzeptabel gehalten. Darüber hinaus wird die durch numerische Modelle unternommene Abschätzung des Strömungsverhaltens durch die tatsächliche Installation von Windkraftanlagen an der (auch ökonomischen) Realität geprüft. Diese Genauigkeit ist mit den heute verfügbaren Strömungsmodellen noch nicht ohne weiteres zu erreichen, ist aber ein realistisches Ziel für verbesserte Ansätze.

Weiterentwicklungen der vorhandenen strömungsmechanischen Modelle konzentrieren sich auf die Wahl der Modellparameter, der Turbulenzmodellierung, der Rechenzeitoptimierung und des „Nestings“ von Modellrechnungen mit verschiedenen horizontalen Auflösungen.

Ist ein günstiger Standort z. B. für einen geplanten Windpark gefunden, muß als nächstes die Anordnung der Anlagen auf dem vorgegebenen Areal ausgewählt werden. Dabei müssen Abschattungseffekte berücksichtigt werden, hervorgerufen durch die Beeinflus-

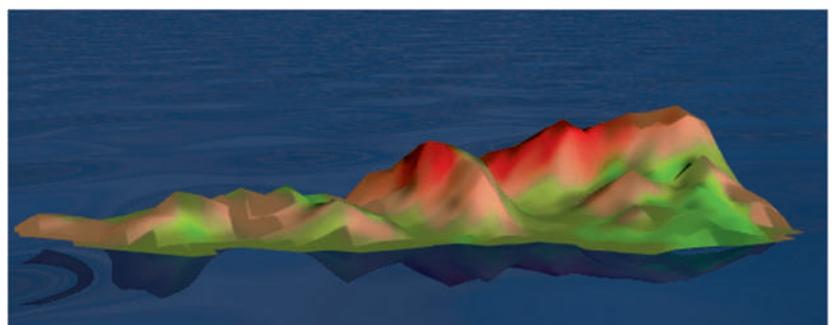


Abb. 3: Visualisierung des Windenergiepotentials für eine gebirgige Mittelmeerinsel. Als Ergebnis der mesoskaligen Strömungsmodellierung ist die mittlere jährliche Windgeschwindigkeit, die von grün nach rot

zunimmt, dargestellt. Die Strömungssimulation beruht auf den langjährigen Verteilungen von Windgeschwindigkeit und Windrichtung der überregionalen Höhenwindströmung.

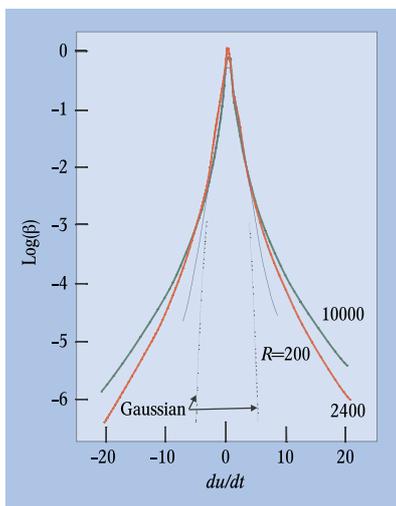


Abb. 4: Logarithmus der Wahrscheinlichkeitsdichte β der Geschwindigkeitsgradienten du/dt in Strömungsrichtung. Die Wahrscheinlichkeitsdichte ist mit der Standardabweichung normiert, der Geschwindigkeitsgradient auf den Mittelwert der Geschwindigkeit (in %) normiert. Messungen für verschiedene turbulente Reynolds-Zahlen. Mit steigender Reynolds-Zahl R nimmt die Wahrscheinlichkeit für sehr hohe und vom Betrag her sehr kleine Gradienten im Vergleich zu einer Normalverteilung zu (entnommen aus [7]).

sung der Strömung in einem Windpark durch die Einzelanlagen. Dies gelingt wiederum mit strömungsmechanischen Modellen, die jetzt jedoch aufgrund der hohen erforderlichen Auflösung (typischerweise 1–5 m) für diesen Anwendungszweck speziell angepaßt bzw. entwickelt werden. Ausgehend von der Modellierung der Wechselwirkung der Windturbinen untereinander, lassen sich für eine vorgegebene Aufstellungsfläche die Aufstellungsgeometrie des Windparks mit modernen Optimierungsalgorithmen (Evolutionstrategien, Genetische Algorithmen, ...) bestimmen.

Für die Auslegung von Windturbinen spielen allgemeine Intermitteffekte in turbulenten Strömungen eine Rolle. Aus ökonomischen Gründen ist man bemüht, die Rotoren von Windturbinen möglichst leicht auszuführen. Dazu ist eine genaue Kenntnis der räumlichen und zeitlichen Schwankungen des Windgeschwindigkeitsfeldes nötig, die als Grundlage zur Berechnung der mechanischen Belastungen und der Materialermüdung dienen. Im allgemeinen lassen sich die Häufigkeiten der turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen im Bereich der mittleren Strömungsgeschwindigkeit gut durch eine Gaußverteilung beschreiben. Eine detailliertere

Betrachtung zeigt jedoch, daß aufgrund von Intermitteffekten Extremwerte der Fluidgeschwindigkeit deutlich öfter auftreten, als man nach dieser Normalverteilung erwartet (Abb. 4) [6]. Dies hat direkte Auswirkungen auf die Auslegung der mechanischen Festigkeit der Rotoren von Windturbinen, für die gerade das Auftreten von Extremwerten der Windlasten eine wichtige Rolle spielen. Eine Untersuchung und Beschreibung dieser Intermitteffekte in Freifeldströmungen ist ein weiteres Teilgebiet der Energiemeteorologie.

Vorhersagen von Wind und Strahlung

Vorhersagen der zu erwartenden Energieflüsse aus der Solarstrahlung oder aus dem Wind sind besonders wertvoll für eine möglichst effiziente Nutzung von erneuerbaren Energien. Dadurch wird es möglich, auf die Fluktuationen des Angebots dieser beiden Energiequellen zu reagieren und so die Einbindung in die bestehende Energieversorgungsstruktur zu verbessern.

Vorhersagen der Leistung aus den installierten Windenergiekonvertern basieren auf den von den Wetterdiensten eingesetzten numerischen Wettervorhersagemodellen. Deren Ergebnisse sind hinsichtlich lokaler Einflüsse auf die Strömungsverhältnisse zu korrigieren und mit den Charakteristika der Windenergiekonverter zu ergänzen [8]. Zu berücksichtigen ist dabei wiederum die Anordnung von Windenergieanlagen in Windparks. Solche Vorhersagen der Leistung aus Windenergieanlagen lassen sich dann als notwendige Voraussetzung für eine optimale Integration der Windenergie in die Versorgungsnetze nutzen. Auf diese Weise kann der „Kapazitätskredit“, d. h. die durch Windenergie ersetzbare installierte Leistung aus konventionellen Kraftwerken, erheblich erhöht werden. Abb. 5 zeigt Vorhersageergebnisse im Vergleich zu einer gemessenen Zeitreihe der Windgeschwindigkeit. Die Übereinstimmung (besonders im Bereich der für die Energieproduktion wesentlichen Windgeschwindigkeiten) zwischen Vorhersagen und Meßwerten ist bereits vielversprechend.

Die kurzfristig zu erwartende Leistung aus installierten Photovoltaikanlagen oder solarthermischen Kraftwerken wird aus Satellitenda-

ten über ein gekoppeltes Verfahren der Solarstrahlungsbestimmung und der Vorhersage von Bewölkungsstrukturen sowie einem physikalischen Modell der jeweiligen Konverter bestimmt. Wesentliche Komponenten dieser Methode sind Klassifizierungsalgorithmen zur Beschreibung der in den Satellitenbildern enthaltenen Strukturen sowie geeignete Verfahren zur Beschreibung deren zeitlicher Entwicklung. Durch ihre Fähigkeit, beliebige funktionale Zusammenhänge in Zeitreihen wiederzugeben, liefern neuronale Netze ein für diese Aufgabe geeignetes Werkzeug. Ebenfalls untersucht werden sog. Markov Random Fields, die über die Korrelation benachbarter Bildelemente den wahrscheinlichsten nächsten Zustand (Minimum einer Energiefunktion) bestimmen. Hierzu werden stochastische Relaxationsverfahren eingesetzt.

Die Vorhersageverfahren erlauben einerseits Aussagen über die flächendeckende Verfügbarkeit der

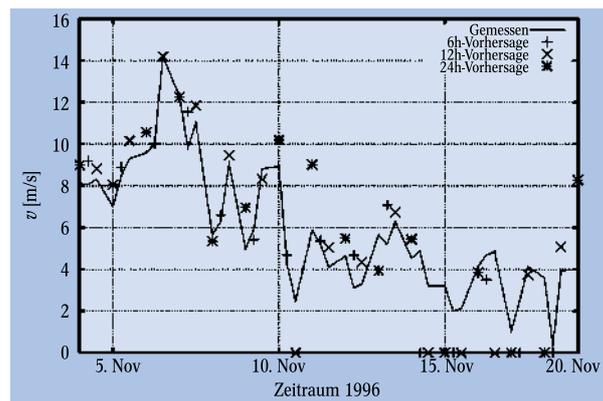


Abb. 5: Vorhersagen der Windgeschwindigkeit für verschiedene Vorhersagezeiten (12, 24 und 48 Stunden) im Vergleich mit einer gemessenen Zeitreihe (Stundenmittelwerte, durchgezogene Linie). Man kann erkennen, daß die Prognose für weite Zeiträume bereits zufriedenstellend ist. Es treten aber auch Situationen mit deutlich falschen Vorhersagen (siehe Tag 10. 11., 24h-Vorhersage) auf. Ein weiterführendes Forschungsthema ist das rechtzeitige Erkennen solcher falscher Prognosen aus Meßdaten.

Erzeugungskapazität aus Wind- und Solarenergie in einem bestimmten Versorgungsgebiet und andererseits eine Angabe der zu erwartenden Unsicherheit der Vorhersage. Mit Vorhersagen im Zeitbereich von wenigen Stunden können Energieversorgungsunternehmen deutliche Verbesserungen in der Netz- und der Laststeuerung erzielen, während ihre Kraftwerkseinsatzplanung von Vorhersagen bis zu zwei Tagen profitiert. Eine Integration von Vorhersageinformation in das Energiemanagement netzferner

Systeme mit Batteriespeichern kann mit Vorhersagen über zwei bis drei Tage die Versorgungssicherheit merklich erhöhen.

Ausblick

Die Energiemeteorologie kann über die hier berichteten Anwendungen hinaus in zahlreichen weiteren Bereichen der Energienutzung wertvolle Beiträge leisten. Die Gebäudetechnik ist ein Gebiet mit einem in dieser Hinsicht besonders hohen Potential. In Verbindung mit Simulationsmodellen für die Bereiche Energie, Tageslichtnutzung und Lüftung können die Methoden aus der Energiemeteorologie zu energetisch wesentlich effizienteren und

gleichzeitig komfortableren Gebäuden beitragen. Die Simulation von Strömungen in großen Gebäuden ist darüber hinaus ein noch wenig untersuchtes Gebiet, dessen Bearbeitung vielversprechend auf dem Weg zu energieeffizienten Gebäuden ist.

Wesentlich für dieses Forschungsgebiet ist die weitere Verstärkung der interdisziplinären Zusammenarbeit der beteiligten Forschungsbereiche. Diese sollte problemfeldorientiert sein verbunden mit einem hohen Maß an Integration von Methoden unterschiedlicher Disziplinen.

Literatur

- [1] S. Großmann, Phys. Bl., Juli/August 1995, S. 641
- [2] R. T. Pinker, R. J. Frouin, Z. Li, Remote Sens. Environ. **51**, 108 (1995)
- [3] H. G. Beyer, C. Costanzo, D. Heinemann, Sol. Energy **56**, 207 (1996)
- [4] I. Troen, E. L. Petersen, European Wind Atlas, Risø National Laboratory, Roskilde (1989)
- [5] D. P. Eppel, et al., Contrib. Atmos. Phys. **68**, 15 (1995)
- [6] R. Friedrich, J. Peinke, Phys. Rev. Lett. **78**, 863 (1997)
- [7] J. C. Wyngaard, Ann. Rev. Fluid Mech. **24**, 205 (1992)
- [8] S. J. Watson, L. Landberg, J. A. Halliday, IEE Proc. Part C, **141**, 357 (1994)