

Energiemeteorologie – Das fluktuierende Angebot aus Wind- und Sonnenenergie berechenbar machen

Dr. Detlev Heinemann
Universität Oldenburg
detlev.heinemann@
uni-oldenburg.de

Carsten Hoyer-Klick
DLR
carsten.hoyer@dlr.de

Dr. Bernhard Lange
ISET
blange@iset.uni-kassel.de

Einleitung

Die rasante Entwicklung der erneuerbaren Energien hat einen bislang eher verborgenen Einfluss auf die Energieversorgung zu Tage treten lassen: Wetter und Klima bestimmen wegen des räumlich und zeitlich schwankenden Angebots der neuen „Brennstoffe“ Sonne und Wind zunehmend größere Anteile am Energieangebot. Somit spielen meteorologische Informationen eine Schlüsselrolle für einen wirtschaftlichen Einsatz dieser neuen Technologien.

Die Planung künftiger Solar- und Windkraftwerke erfordert detailliertes Wissen über die potenziell verfügbare Energie an einem bestimmten Standort, der wirtschaftliche Betrieb dieser Anlagen bedarf präziser Vorhersagen über das aktuelle Energieangebot, und die Entwicklung kommender Generationen von Anlagen wird nicht ohne eine detaillierte Spezifikation der relevanten meteorologischen Bedingungen auskommen.

Diesem Bedarf an Know-how und Information stellt sich das interdisziplinäre Forschungsgebiet Energiemeteorologie. An der Schnittstelle zwischen Atmosphärenphysik und der Energiesystemforschung angesiedelt, behandelt sie grundsätzlich die vielfältigen Einflüsse von Wetter und Klima auf Umwandlung, Übertragung und Nutzung von Energie.

Merkmal der Energiemeteorologie ist die Verknüpfung von meteorologischen mit physikalisch-technischen Fragestellungen:

- Die Entwicklung neuer, angepasster Methoden und
- die Bereitstellung anwendungsspezifischer meteorologischer Information für den Energiesektor.

Energie und Wetter: meteorologische Information in der Energieversorgung

Der stark zunehmende Bedarf an meteorologischer Information in der Energieversorgung geht einher mit weiteren „informationshungrigen“ Strukturveränderungen. Entflechtung, Stromhandel, Dezentralisierung mit vielfältiger Erzeugungsstruktur, Last- und Netzmanagement stellen neue Anforderungen an die Bereitstellung und Verteilung von energiebezogener Information. In dieser Konstellation sind präzise Informationen über das Angebot von Sonnen- und Windenergie wesentliche Voraussetzungen für einen effizienten Einsatz dieser neuen Technologien.

Grundsätzlich lassen sich energiemeteorologische Methoden entsprechend der Anwendung einordnen:

- Verfahren der Ressourcenabschätzung mit ihrem Bedarf an klimatologischen Zeiträumen; hier können numerische Modelle als auch Fernerkundungsdaten heran gezogen werden.
- Dagegen verlangt der operationelle Betrieb von Energiesystemen zeitnahe Informationen aus der Atmosphäre für Vorhersage und Überwachung.
- Spezielle Informationen sind wiederum nötig, um die Technologie der Energiewandler weiter zu optimieren (hoch aufgelöste Turbulenzdaten in der Windenergie, spektral aufgelöste Solarstrahlung).
- Eine großräumig optimierte Integration verteilter Solar- und Windenergie-Kraftwerke schließlich bedarf statistischer Analysen der fluktuierenden Leistung aus den verschiedenen Quellen und Standorten.

Die Anforderungen an meteorologische Informationen sind dabei durch die Anwendungen bestimmt: räumliche Auflösung (Gebiets- oder Punktinformation), zeitliche Verfügbarkeit (z. B. Near-Real-Time für den Betrieb, Langzeitdaten für die Planung), Vorhersagen, Information zur Unsicherheit der Daten, Kopplung verschiedener Datenquellen (Satelliten- und Bodendaten, numerische Modelle).

Langzeiteinflüsse (z. B. von Vulkanausbrüchen auf die Direktstrahlung) sind ebenso Gegenstand der Energiemeteorologie wie eine Abschätzung von langfristigen klimabedingten Änderungen der Potenziale von Wind- und Solarenergie. Mögliche Veränderungen des lokalen Klimas durch die Energieerzeugung selbst (u. a. durch Reflektion an großen Solaranlagen, Reduzierung der Windgeschwindigkeit im Lee großer Windparks) zeigen einen weiteren Bedarf energiemeteorologischer Forschung auf.

Beispiele aus der Sonnen- und Windenergie

Fernerkundung der Solarstrahlung

Satellitendaten sind für Meteorologie und Klimatologie neben Bodendaten die wesentliche Informationsquelle. So liefern sie auch für die Bestimmung der Strahlungsbilanz in der Atmosphäre die entscheidenden Daten. Über die gemessene Rückstreuung der solaren Einstrahlung am Oberrand der Atmosphäre und der Anwendung der Prinzipien des Strahlungstransportes lässt sich grundsätzlich die Strahlungsflussdichte am Erdboden berechnen. Die hierzu erforderliche genaue Kenntnis über Zusammensetzung und Zustand der Atmosphäre macht weitere Satellitendaten, aber auch Annahmen und Vereinfachungen zur „Modellphysik“ nötig. Mit diesen Verfahren gelingt es, aus den Daten geostationärer Satelliten Abschätzungen des Solarenergieangebotes am Erdboden zu machen, deren Genauigkeit z. B. für Monatsmittelwerte mit Bodenmessungen vergleichbar ist. Die räumliche Auflösung der Satelliteninformation (typisch: 5 km) ist jedoch der der Bodenmessnetze weit überlegen.

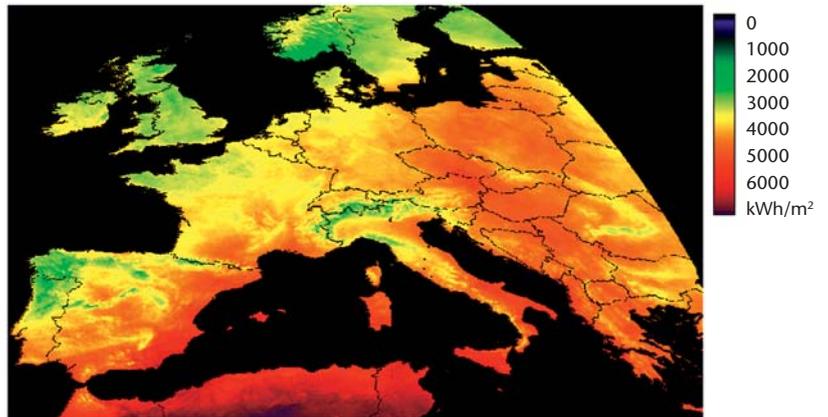


Abbildung 1
Solarstrahlungskarte
für Europa (April 2005)

Quelle:
Universität Oldenburg

Neueste Verfahren wie das HELIOSAT-3 Verfahren¹ nutzen Daten der neuen Generation geostationärer Satelliten (ab METEOSAT-8) mit deutlich erhöhter spektraler Auflösung, die neben der Rückstreuung im sichtbaren Spektralbereich durch geeignete Infrarot-Kanäle vielfältige weitere Information – insbesondere über die Bewölkung – bereit stellen und ein genaueres Bild der Atmosphäre liefern. Dieser Zuwachs an Information ist verbunden mit einer gegenüber den Vorgängersatelliten verdoppelten räumlichen und zeitlichen Auflösung. Dies sind gute Voraussetzungen, um vielfältige, für die Anwendungen wichtige Solarstrahlungsinformationen zu gewinnen.

Satellitendaten in der Solarenergie

Eine nahe liegende Anwendung von satellitenbasierten Solarstrahlungsdaten sind Kartierungen des Solarenergiepotenzials (*Abb. 1*)

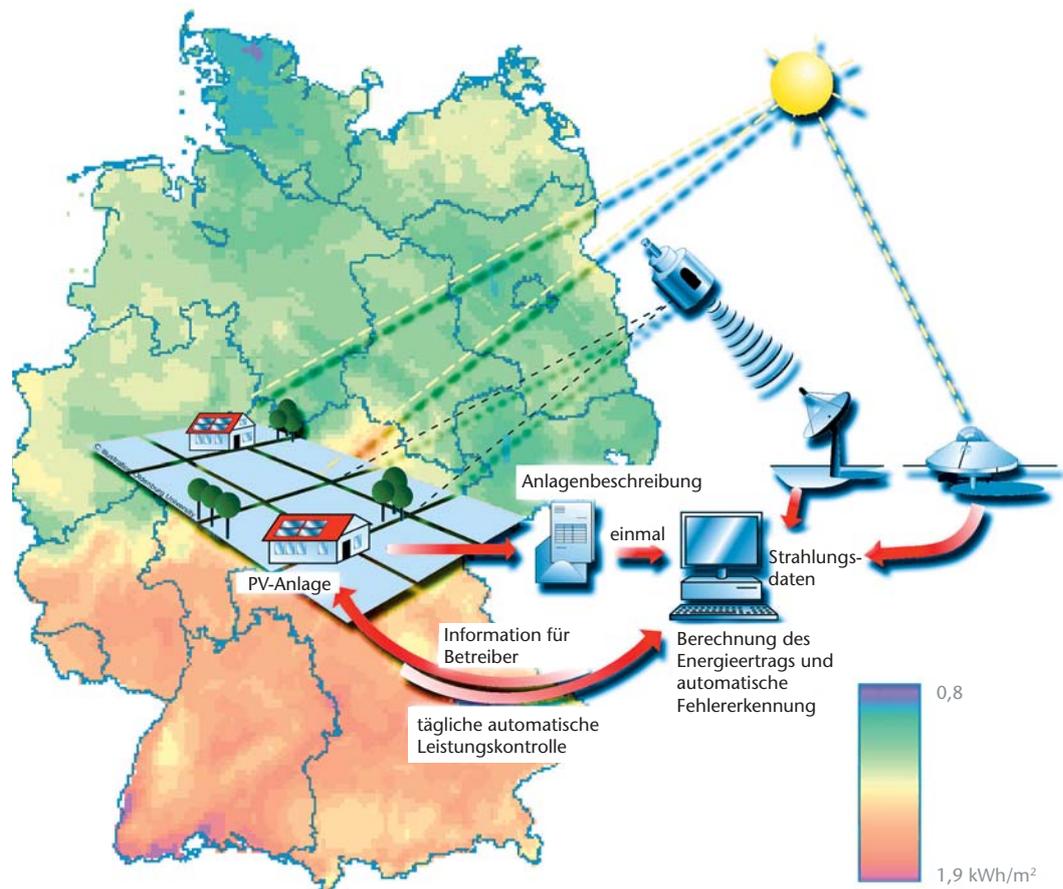
Die hohe räumliche Auflösung liefert Datenprodukte, zum Beispiel für die sonnenreichen Länder Afrikas, in denen verlässliche Bodenmessdaten meist nicht existieren.

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.

¹ Verfahren zur Berechnung der solaren Einstrahlung am Erdboden aus Satellitendaten.

Abbildung 2
Schema der Ertrags-
überwachung von
Photovoltaikanlagen
(PVSAT)

Quelle:
Universität Oldenburg



Zusammen mit kleinskalig verfügbaren Bodenmessungen lässt sich auf diese Weise ein umfassendes Bild der statistischen Eigenschaften der Solarstrahlung gewinnen. Satellitendaten dienen auch zur Sicherstellung eines dauerhaft effizienten Betriebs von Solaranlagen (PVSAT²).

Auf der Grundlage dieser Daten wird die Solarstrahlung auf die Solarmodule in zum Beispiel stündlicher Auflösung bestimmt. Mit den einmalig bestimmten Anlagendaten, wie Geometrie, Modultyp und Wechselrichter wird die entsprechende Anlagenleistung simuliert. Ein automatisierter Vergleich mit dem jeweiligen Ertrag gibt Auskunft über die Qualität des Anlagenverhaltens und über einen Fehlererkennungsalgorithmus über Ursachen einer möglichen Abweichung (Abb. 2).

Hochaufgelöste Solarstrahlungsdaten vom Satellit sind die Grundlage für so genannte GIS³ Standortanalysen. Dabei erhält man Informationen über das Strahlungsmikroklima, die zusammen mit Infrastrukturdaten, geografischer und ökonomischer Daten zu einer umfassenden Darstellung der technischen und ökonomischen Performance von zum Beispiel solarthermischen Kraftwerken verwendet werden (STEPS⁴). Dies ist eine wichtige Voraussetzung für eine systematische Projektentwicklung und Standortwahl für größere Solarkraftwerksprojekte.

Vorhersage von Wind- und Sonnenenergie

Die zeitliche Verfügbarkeit von Energie ist ein wesentlicher wertbestimmender Faktor. Die schwankenden Beiträge aus Wind- und Sonnenenergie erfordern daher Maßnahmen, diese Unsicherheiten grundsätzlich zu reduzieren, indem präzise Informationen über die zu erwartende Erzeugung – anwendungsabhängig in unter-

² Das PVSAT-(PhotoVoltaicSATellite-)Verfahren ermöglicht eine Berechnung der Energieerträge von netzgekoppelten PV-Anlagen auf der Basis von Satellitendaten.
³ GIS – geographisches Informationssystem
⁴ STEPS – Evaluation System for Solar Thermal Power Stations

schiedlichen räumlichen und zeitlichen Skalen – bereit gestellt wird.

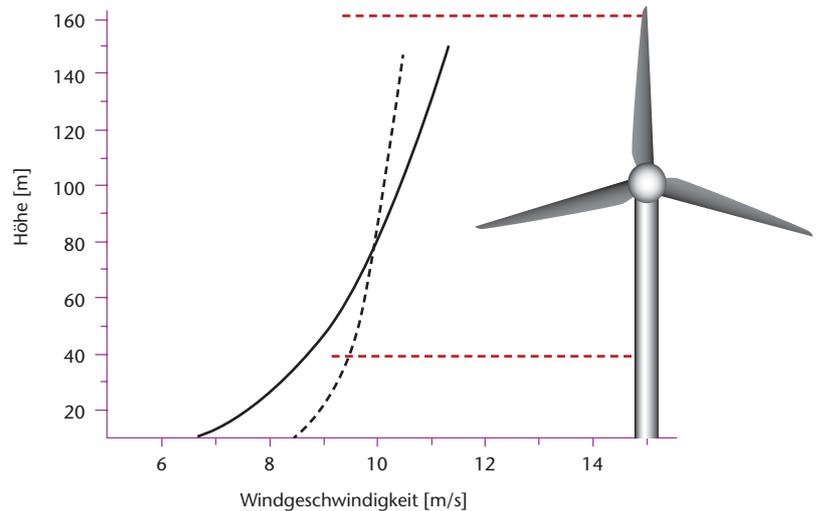
Für die Windenergie sind operationelle Vorhersagesysteme bereits im Einsatz und ermöglichen zunehmend deren effiziente Einbindung in die Stromnetze. Die enormen Zuwachsraten von Photovoltaik mit über 2 GW bislang installierter Leistung in Deutschland machen zuverlässige Vorhersageverfahren auch in diesem Bereich zu einer Notwendigkeit. Die Einstrahlungsabhängigkeit von Beleuchtung, Heizung und Kühlung im Gebäudebereich macht Vorhersageinformation auch dort zu einer zunehmend bedeutenden Größe in entsprechenden Steuerungsalgorithmen.

Wind- und Solarleistungsvorhersagen im Bereich von 1-3 Tagen basieren durchweg auf numerischen Wettervorhersagen, verwenden jedoch unterschiedliche Verfahren, die Ergebnisse dieser Wettermodelle in entsprechende Leistungen der Solar- und Windenergiesysteme zu übertragen. Dies kann durch Ausnutzung von statistischen Zusammenhängen oder auch über weitergehende physikalische Modellierungen geschehen.

Aktuelle Entwicklungen zielen auf die Bestimmung und Einbeziehung der Vorhersageunsicherheiten, die intelligente Verwendung unterschiedlicher Vorhersageinformation und von Ensemble-Vorhersagen, sowie auf die Verbesserung der Methoden zur nachträglichen Bearbeitung von Analysedaten (Post-Processing-Methoden). Im Fall der Solarstrahlung ist die Wolkenvorhersage ein Schlüssel zur Verbesserung.

Solarstrahlungsvorhersagen basieren weitestgehend auf Ansätzen zur automatisierten kleinräumigen Wetterprognose, um möglichst genau Vorhersagen „vor Ort“ liefern zu können (MOS - Model Output Statistics). Dabei werden die gewünschten Größen über statistische Regressionen aus den Ergebnissen numerischer Vorhersagemodelle und weiterer Variablen bestimmt.

Solarstrahlungsvorhersagen für kurze Zeiträume von wenigen Stunden können wiederum aus Satellitendaten gewonnen werden, indem die zeitliche Entwicklung der die Strahlung wesent-



lich bestimmenden Wolkenstrukturen extrapoliert wird. Aus dem vorhergesagten Satellitenbild kann dann mit dem HELIOSAT-3-Verfahren die Solarstrahlung berechnet werden.

Offshore-Windenergie

Die Windverhältnisse in Offshore-Regionen sind weit weniger bekannt als dies für Standorte an Land mit entsprechend zahlreichen Messungen gegeben ist. Eine präzise Potenzialbestimmung für die Planung großer Offshore-Anlagenparks sowie die sichere Vorhersage der Stromerzeugung für den Betrieb sind somit sichtlich erschwert. Veränderte Turbulenzeigenschaften der Offshore-Winde erfordern ein verändertes Anlagendesign, das die veränderte mechanische Belastung der Anlagen berücksichtigt.

Atmosphärische Strömungen in der Grenzschicht über dem Meer verhalten sich abweichend von den Verhältnissen über Land. Die geringe, aber variable Rauigkeit der Wasseroberfläche mit entsprechenden Wechselwirkungen zwischen Wind und Wellen sowie die thermischen Eigenschaften des Wassers sind wesentlich dafür verantwortlich, dass vertikale Flüsse von Impuls und Wärme in der Atmosphäre über dem Wasser verändert sind und zu einem ebenfalls veränderten vertikalen Profil der Windgeschwindigkeit führen (Abb. 3).

Abbildung 3

Die Windgeschwindigkeit nimmt mit der Höhe zu und bestimmt so maßgeblich das Verhalten großer Windenergieanlagen.

Die abrupte Änderung dieser Eigenschaften entlang der Küstenlinie verursacht weitere Störungen der Strömung beim Übergang von Meer zum Land.

Wesentliche Voraussetzung für eine gesicherte Beschreibung der Windverhältnisse sind hochwertige vertikal aufgelöste Messungen. Für die Deutsche Bucht steht seit 2005 mit FINO1 eine Messplattform zur Verfügung, die diesen Ansprüchen genügt. Eine weitere Plattform ist in Vorbereitung.

Die Erweiterung existierender Ansätze auf die Windenergie, wie zum Beispiel das LIDAR-Messverfahren⁵ für eine differenziertere Erfassung des Windfeldes und die Large Eddy Simulation (LES⁶) für eine hochaufgelöste Strömungsmodellierung zum Beispiel in Windparks versprechen künftig zu einer wesentlichen Verbesserung der Kenntnisse der Windverhältnisse gerade in Offshore-Regionen beizutragen. Aktuelle Entwicklungen in der Turbulenzforschung werden ein optimiertes Design künftiger Anlagen ermöglichen.

Zusammenfassung und Ausblick

Meteorologische Randbedingungen werden künftig die Energieversorgung weitaus stärker beeinflussen als bislang. Dabei wird der zeit- und ortsgenaue Verfügbarkeit hochwertiger Information über unterschiedliche Aspekte der neuen Energien aus Sonne und Wind eine besondere Rolle für einen effizienten Einsatz dieser neuen Technologien zukommen. Neben der Bereitstellung anwendungsspezifischer Daten steht die Neu- und Weiterentwicklung von Methoden zur Integration meteorologischen und systemtechnischen Wissens im Vordergrund. Hierfür sind weitere Forschungsanstrengungen notwendig sowohl im anwendungsnahen als auch im Grundlagenbereich.

⁵ LIDAR – Light Detection and Ranging. Strömungsmessverfahren, das sich zu einem bedeutenden Verfahren in der Umwelt- und Atmosphärenforschung entwickelt hat.

⁶ LES ist ein Verfahren zur numerischen Berechnung von turbulenten Strömungen.

Literatur

E.D. Dunlop, L. Wald, M. Šúri (Eds.): Solar Energy Resource Management for Electricity Generation from Local Level to Global Scale. Nova Science Publishers, Hauppauge (2006).

A. Hammer et al.: Solar Energy Assessment Using Remote Sensing Technologies. Remote Sensing of Environment, 86, 423–432 (2003).

D. Heinemann et al.: Energiemetereologie. Physikalische Blätter, 55 (4), 47–50 (1999).

B. Lange: Offshore Wind Power Meteorology, In: J. Peinke, P. Schaumann und S. Barth (Eds.): Wind Energy - Proceedings of the Euromech Colloquium (2007).

R.W. Mueller et al.: Rethinking Satellite-based Solar Irradiance Modelling: The SOLIS Clear-sky Module. Remote Sensing of Environment, 91, 160–174 (2004).

R. Perez et al.: Solar Resource Assessment: A Review. In: J.M. Gordon (Ed.): Solar Energy - The State of the Art: ISES Position Papers. James & James, S. 497–575 (2001).

E.L. Petersen et al.: Wind Power Meteorology. Part I: Climate and Turbulence. Wind Energy, 1, 2–22 (1998), Part II: Siting and Models. Wind Energy, 1, 55–72 (1998).