

Wo weht der Wind?

BERECHNUNG DER WINDVERHÄLTNISS

IM UMFELD VON WINDKRAFTANLAGEN

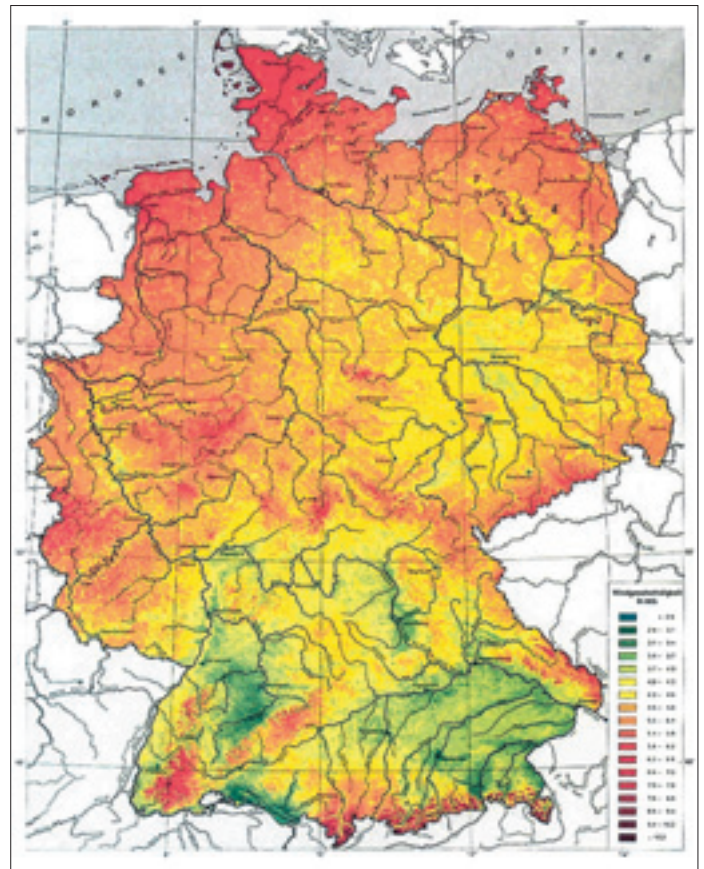
Damit sich das Aufstellen einer Windkraftanlage lohnt, muss vorher klar sein, wie stark und wie gleichmäßig der Wind am geplanten Standort weht. Das kann durch langjährige Messungen erfolgen oder mit Hilfe einer speziellen Software, die alle nötigen Daten zu einem Simulationsmodell vereint. Das Institut für Meteorologie und Klimatologie arbeitet mit diesen Simulationen.

Einleitung

Die globale Jahresmitteltemperatur in Bodennähe ist seit 1860 um etwa 0,6 Kelvin (K) angestiegen. Neben der natürlichen Variabilität des Klimas ist aber auch davon auszugehen, dass insbesondere die Temperaturerhöhung in den vergangenen Dekaden durch eine Zunahme anthropogener Luftbeimengungen verursacht worden ist. Um dieser Entwicklung entgegen zu wirken, wurden im Kyoto-Protokoll Reduktionsziele bei der Emission von Treibhausgasen festgeschrieben.

Einschränkungen bei der Verbrennung fossiler Energieträger bei gleichzeitiger intensiverer Nutzung regenerativer Energiequellen birgt ein großes Einsparpotenzial, insbesondere bei CO₂. Zu den regenerativen Energiequellen zählt auch die Windenergie, bei der mechanische und elektrische Energie gewonnen werden kann.

Die der Luftströmung entziehbare kinetische Energie wächst mit der dritten Potenz der Windgeschwindigkeit. Aus diesem Grunde sind Gebiete mit hoher Windgeschwindigkeit bevorzugte Standorte für Windkraftanlagen. Dieser Zusammenhang wird anhand des Vergleichs der geographischen Verteilung der Windkraftanlagen in Deutschland und der dazugehörigen Verteilung der mittleren Windgeschwindigkeit deutlich (Abbildung 1).



Der Meteorologie kommt bei der Beurteilung eines Standorts hinsichtlich seiner Eignung für eine Windkraftanlage eine zentrale Aufgabe zu. Einer falschen Vorhersage des Windes folgt unweigerlich ein viel größerer Fehler bei der Ertragsprognose.

Das am geplanten Standort verfügbare Windangebot kann in idealer Weise durch Windmessungen ermittelt werden. Allerdings müssen solche Messungen direkt am Standort (der im Planungsstadium häufig noch nicht exakt festliegt) und in Nabenhöhe durchgeführt werden und der Messzeitraum muss mindestens ein Jahr oder länger betragen. Da solche Beobachtungen vor Ort sehr zeit- und kostenintensiv sind, werden üblicherweise alternative Methoden angewendet.

Das gängigste Verfahren ist die Übertragung von langjährigen Messungen des Deutschen Wetterdienstes in zehn Meter über Grund von benachbarten Beobachtungsstationen. Da Wind eine räumlich und zeitlich sehr stark variierende meteorologische Größe ist, kann eine solche Übertragung auch von unmittelbar benachbarten Standorten mit großen Fehlern verbunden sein.

Die Unsicherheiten kommen dadurch zustande, dass der Wind sehr stark von der Oberflächenbeschaffenheit und dem Relief geprägt wird und daher lokale Besonderheiten aufweist, die nicht auf die Nachbarschaft übertragen werden können. Weiterhin muss der Wind von der Beobachtungshöhe zehn Metern auf eine Nabenhöhe von typischerweise 80 bis 100 Metern extrapoliert werden. Die derzeit verwendeten Extrapolationskurven (das logarithmische Windprofil) dürfen aber in komplexem Gelände nicht zur Anwendung gebracht werden und gelten auch nur für Höhen bis etwa 20 Meter (nachts) und 100 Meter (tagsüber).

2. Das numerische Simulationsmodell

Neben Messungen bietet die Anwendung von meteorologischen numerischen Simulationsmodellen die Möglichkeit, die lokalen Windverhältnisse unter Umgehung der oben genannten Schwierigkeiten mit großer Präzision zu bestimmen.

Numerische Simulationsmodelle werden in sehr vielen Gebieten der Meteorologie eingesetzt und die resultierenden Ergebnisse liefern wichtige Basisinformationen für viele Lebensbereiche.

Die Wettervorhersage für die nächsten ein bis fünf Tage wird fast ausschließlich von solchen komplexen und umfangreichen Computermodellen erstellt. Auch die Erkenntnisse zu den möglichen Veränderungen unseres globalen Klimas in den nächsten Jahrzehnten resultieren aus diesen Rechnungen. Und schließlich werden Modelle ähnlichen Typs, so genannte Mikro- und Mesoskalen-Modelle, auch dazu verwendet, die lokalen und die regionalen Verteilungen der meteorologischen Variablen zu berechnen.

Alle diese Computermodelle für die verschiedenen Skalen basieren auf dem gleichen mathematisch-physikalischen Grundgerüst. Lediglich im Detail finden sich skalenspezifische Unterschiede. Dieses Grundgerüst besteht aus den Gleichungen für die Impulserhaltung (Navier-Stokes Bewegungsgleichung), der Massenerhaltung (Kontinuitätsgleichung) und der Energieerhaltung (1. Hauptsatz der Thermodynamik).

Je nach Problemstellung kann dieses Grundgerüst noch erweitert werden, um beispielsweise die Effekte von Niederschlag zu berücksichtigen. In diesem Falle müssen weitere Bilanzgleichungen für Wolkenwasser, Regenwasser und feste Niederschlagspartikel integriert werden.

Die zur Berechnung des Windangebotes für Windkraftanlagen in stark strukturiertem Gelände zum Einsatz kommenden Mesoskalen-Modelle wurden in den vergangenen Jahrzehnten bis zur Anwendungsreife entwickelt.

Besonders in Deutschland wurde auf diesem Gebiet Pionierarbeit geleistet und einige Arbeitsgruppen können auf die weltweit längsten Erfahrungen auf diesem Gebiet verweisen.

Auch am Institut für Meteorologie und Klimatologie der Universität Hannover werden seit Jahren mehrere solcher Mikro- und Mesoskalen-Modelle zur Bearbeitung umweltmeteorologischer Fragestellungen eingesetzt.

Die Berechnung der Windfelder für die nähere und weitere Umgebung einer Windkraftanlage erfolgt mit dem dreidimensionalen, nicht-hydrostatischen Mesoskalen-Modell FITNAH. Es ist speziell für topographisch gegliederte Untersuchungsgebiete mit sehr kleinen horizontalen Maschenweiten (= räumliche Auflösung) konzipiert. In Abhängigkeit von der Komplexität des Geländes werden typischerweise Maschenweiten zwischen 25 und 500 Metern verwendet.

Das Modell ist in der Lage, die Besonderheiten einer Landschaft hinsichtlich der Reliefformen (Orographie) und der Landnutzung auf die Verteilung der meteorologischen Variablen zu berücksichtigen. So wird beispielsweise die typische starke Verzögerung des bodennahen Windes im Bereich von Wäldern und von Siedlungen genauso berechnet wie die Erhöhung der Windgeschwindigkeit über Kuppen und Bergrücken sowie die Verstärkung der Böigkeit des Windes über sehr rauhem Untergrund (Wälder, Siedlungen).

Abbildung 1
Räumliche Verteilung von Windkraftanlagen (rechts) und Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in 50 m über Grund (links). Rot: hohe Windgeschwindigkeit, grün: niedrige Windgeschwindigkeit

Datenbasis: Deutscher Wetterdienst DWD, K6, April 1991; Ingenieur-Werkstatt Energietechnik, Stand 31.12.1999; Kreise, Stand 1.1.1996

Neben der Landschaft (Orographie, Landnutzung) werden für die verschiedenen Rechnungen noch Informationen hinsichtlich der großräumigen, synoptischen Wetterlagen benötigt, für die die lokalen Windverhältnisse am Standort berechnet werden sollen. Dabei findet die Richtung und die Windgeschwindigkeit der Strömung in der freien Atmosphäre (geostrophischer Wind, Höhenwind) genauso Eingang in die Simulation wie die charakteristischen Eigenschaften der Luftmasse (zum Beispiel vertikale Temperaturverteilung).

1. Mit welcher Windstatistik kann man am geplanten Standort rechnen?
2. Ist der vorgesehene Standort optimal ausgesucht?
3. Gibt es Wechselwirkungen zwischen einzelnen Anlagen eines Windparks?

Für die Berechnung des zu erwartenden Energieertrags einer Windkraftanlage wird eine zweiparametrische Windstatistik in Nabenhöhe benötigt, aus der ersichtlich wird, wie häufig am Standort eine bestimmte Windgeschwindigkeit aus einer bestimmten Windrichtung vorkommt. Für

Wintermonaten und niedrigeren Werten im Sommer. Weiterhin sind auch die starken Veränderungen von Jahr zu Jahr zu erkennen.

Neben den mittleren Windverhältnissen sind auch die kurzzeitigen Fluktuationen, die turbulenten Schwankungen, von Bedeutung. Da die Rechnungen mit einer zeitlichen Auflösung von etwa einer Minute durchgeführt wurden, kann aus den Ergebnissen auch ein Turbulenzspektrum berechnet werden.

Eine reale Landschaft wird charakterisiert durch ein sehr

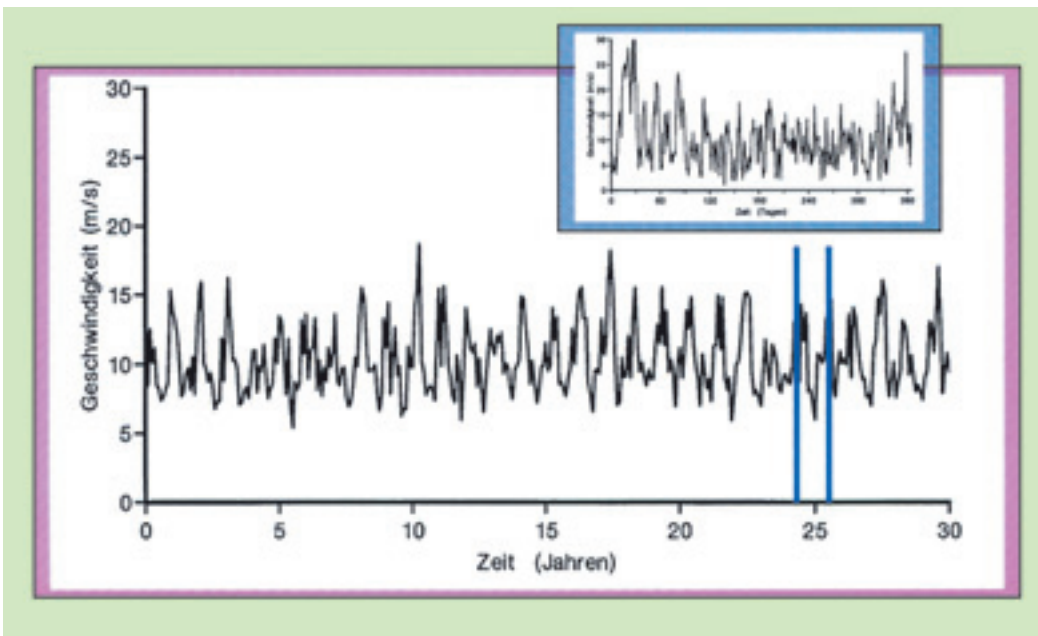
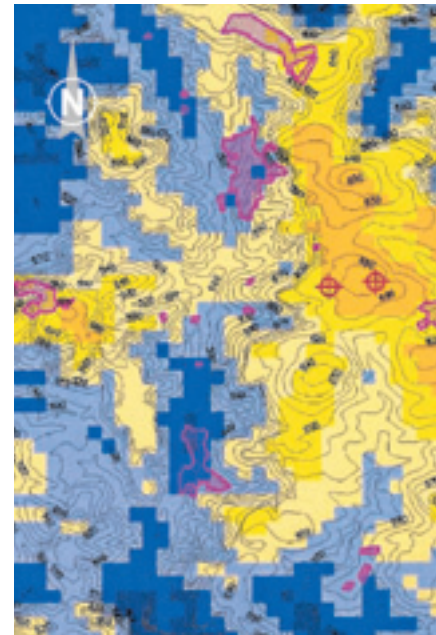


Abbildung 2 (links)
Berechnete Zeitreihe der Monatsmittel der Windgeschwindigkeit für 30 Jahre und der Tagesmittel für ein Jahr (kleiner Kasten) für eine Höhe von 100 m über Grund.

Abbildung 3 (rechts)
Räumliche Verteilung der Windgeschwindigkeit in 100 m Höhe über Grund.



Der Antrieb erfolgt bei diesem Verfahren durch die Vorgabe von wetterlagenspezifischen Größen in einer Höhe von etwa 1500 bis 2000 Metern, die für ein größeres Gebiet gültig, und vom Untergrund nicht mehr beeinflusst sind.

3. Ergebnisse

Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit und der Effizienz von Windkraftanlagen stehen in Zusammenhang mit der Meteorologie mehrere Fragen im Vordergrund:

die Erstellung einer solchen Statistik werden lange Zeitreihen benötigt, die mit Hilfe numerischer meteorologischer Simulationsmodelle berechnet werden können. Angetrieben von einem zeitlich veränderlichen Höhenwind simuliert das Modell die Windverhältnisse in beliebigen Höhen über Grund auch für lange Zeitskalen.

In der Abbildung 2 sind die Ergebnisse einer 30-Jahresintegration für einen Offshore-Standort in 100 Metern Nabenhöhe gezeigt. Man erkennt eine markante jahreszeitliche Variation mit hohen Windgeschwindigkeiten in den

heterogenes Nebeneinander unterschiedlicher Landnutzungen. Jede Nutzungsart verändert in charakteristischer Weise das Strömungsfeld über ein mehr oder minder großes Gebiet. Daneben erfolgt noch eine weitere Modifikation des Windfeldes durch die vorhandenen orographischen Strukturen. Die Effekte solcher vielfältiger individueller Einflüsse und deren Wechselwirkungen untereinander können nur mit Hilfe eines Mesoskalen-Modells hinreichend realistisch bestimmt werden.

Eine solche Untersuchung ist zwingend erforderlich, will man einen geplanten Standort

optimal in einer Landschaft positionieren.

Beispielhaft ist in der Abbildung 3 das Ergebnis einer Windfeldsimulation für ein zehn mal zehn Kilometer großes Untersuchungsgebiet wiedergegeben. Dargestellt ist das in einem 200 Meter Raster berechnete Jahresmittel der Windgeschwindigkeit in 100 Metern über Grund. Das stark gegliederte Gelände ist durch Höhen zwischen 415 und 650 Metern charakterisiert. Die Landnutzung im Umfeld ist von landwirtschaftlichen Flächen, einigen Siedlungen und

Waldarealen in den Höhenlagen geprägt.

Die Rauigkeitselemente in Kombination mit dem stark gegliederten Gelände beeinflussen die bodennahe Strömung auch im 100 Meter Niveau mehr oder minder stark. Die mittlere Windgeschwindigkeit weist daher im Untersuchungsgebiet eine hohe Variabilität auf. Sie schwankt zwischen etwas weniger als 4 m/s in den Talzügen bis etwa 6,5 m/s in den landwirtschaftlich genutzten, höher gelegenen Landschaftsstrukturen. Bewaldete Kuppenlagen im gleichen Höhenniveau weisen demgegenüber eine um etwa 0,5 m/s niedrigere Windgeschwindigkeit auf.

Auf kürzester Distanz sind Unterschiede bei der Windgeschwindigkeit von mehr als zehn Prozent möglich, was für den Ertrag eine Veränderung von 30 Prozent bedeutet – eine Wert, der häufig über die Wirtschaftlichkeit einer Anlage entscheidet.

Meist werden mehrere Einzelanlagen zu einem Windpark zusammengefasst. Für eine optimale Nutzung des vorhandenen Raumes und für Fragen der Sicherheit der Bauwerke ist es erforderlich, die Wechselwirkungen einzelner Anlagen untereinander zu untersuchen. Auch hierfür kann das meteorologische Simulationsmodell genutzt werden. Sind Nabenhöhe, Rotordurchmesser, Turmgeometrie, Rotationsgeschwindigkeit und Weiteres bekannt, können die Strömungsverhältnisse um individuelle Windkraftanlagen in einem Park berechnet werden.

lungen pro Minute dargestellt. Man erkennt deutlich, dass hinter der Anlage die Windgeschwindigkeit niedriger ist als vor der Anlage, und eine weitere im Lee gelegene Windkraftanlage wird somit einen niedrigeren Ertrag erzielen können.

Moderne meteorologische Simulationsmodelle für Anwendungen im Bereich Windenergie sind vorhanden und einsetzbar. Sie liefern alternativ oder in Ergänzung zu Windmessungen wertvolle Informationen und Erkenntnisse zu den lokalklimatischen Beson-



Prof. Dr. Günter Gross
Jahrgang 1954, ist Professor für Meteorologie am Institut für Meteorologie und Klimatologie.

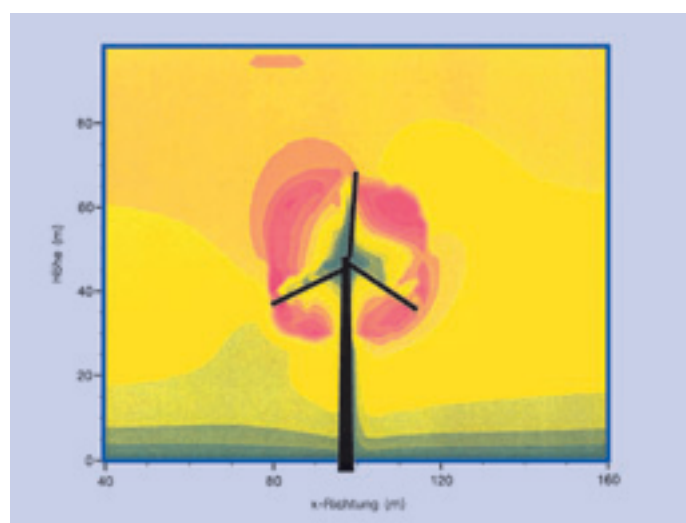
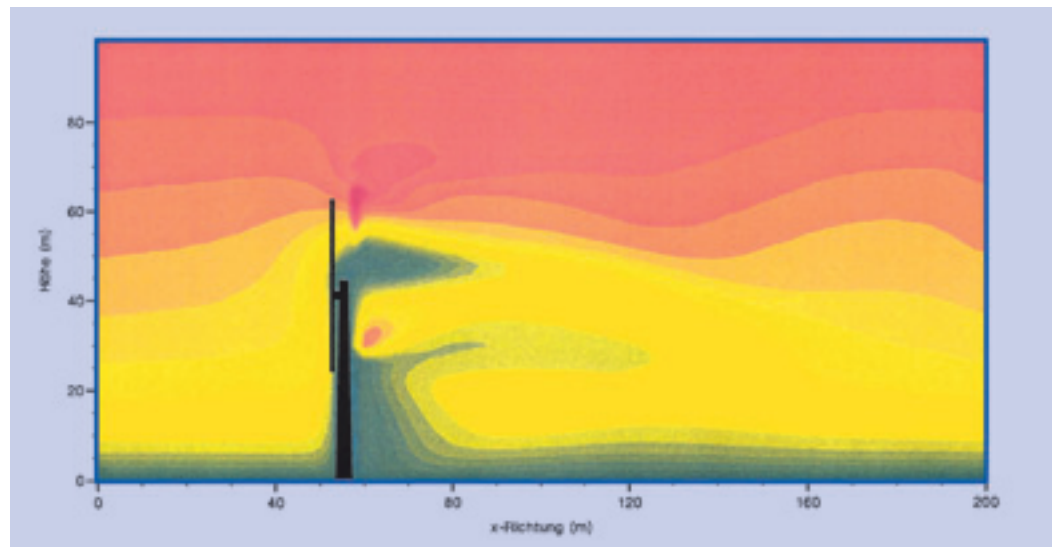
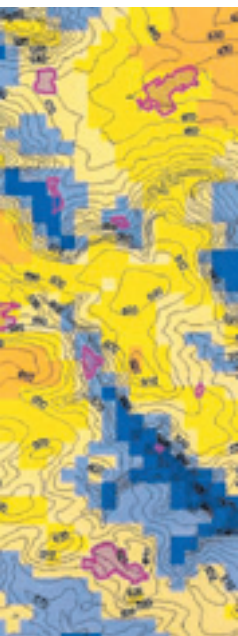


Abbildung 4
Simulierte momentane Geschwindigkeitsverteilung im Bereich einer Windkraftanlage. Seitenansicht (oben), Frontansicht (unten).
Rot: hohe Windgeschwindigkeit, grün: niedrige Windgeschwindigkeit

Beispielhaft ist in der Abbildung 4 die simulierte momentane Windgeschwindigkeit bei einer Rotationsgeschwindigkeit der Flügel von 15 Umdre-

derheiten, die es schließlich gestatten, Windkraftanlagen hinsichtlich der Energieausbeute optimal in Landschaftsräumen zu positionieren.