

## Entwicklung eines menügesteuerten Programmsystems zur Standortbeurteilung von Windkraftanlagen in gegliedertem Gelände

Development of a Menue Guided Programm System for Site Evaluation of Wind Energy Converters in Complex Terrain

Sperling, T.; Hänsch, R.; Kerschgens, M.  
 Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln  
 Kerpener Str. 13, 50923 Köln

### Summary

*For a reliable economic analysis of wind turbines detailed information about the wind frequency distribution is necessary. In structured terrain the topography causes a distinct enhanced spatial and temporal variability of the wind, so that it becomes more difficult to give an accurate estimation of the statistical wind distribution at the wind turbine location. Comparison with other studies as well as a model validation study show, that improved information about the wind distribution can be obtained by applying a combined dynamical-statistical method. The statistical evaluation of the three-dimensional wind fields, which are computed by a mass consistent meso-scale model, gives the wind frequency distribution, even at such locations where there are no wind measurements. The computed wind statistics form a reliable basis to derive a number of wind energy parameters, which permit to judge the preferred location of wind turbines. In order to reduce the training period when working with numerical simulation models and to enhance the application facilities of more complex computation routines, a user orientated, menue-based software program was developed.*

### 1. Einleitung

Für eine zuverlässige meteorologische Standortbeurteilung von Windkraftanlagen in gegliedertem Gelände sind detaillierte Angaben über die standortspezifische Windverteilung erforderlich. Aufgrund der geforderten Genauigkeit solcher Aussagen ergibt sich gerade im Binnenland eine hohe Anforderung an das Berechnungsverfahren, da dort oft der dominante Geländeeinfluß eine erhöhte zeitliche und räumliche Variabilität der bodennahen Windverhältnisse zur Folge hat. Werden in solchen Regionen lediglich Jahresmittelwerte zur Berechnung des Windenergiepotentials herangezogen, kann der daraus resultierende Energieertrag erhebliche Abweichungen gegenüber den gemessenen Werten aufweisen. Um eine möglichst genaue Information über die Windstärkeverteilung auch an solchen Standorten zu erhalten, an denen keine Windmessungen vorliegen, wird ein dynamisch-statistisches Verfahren eingesetzt. Durchgeführte Vergleichsstudien sowie eine Modellvalidierung zeigen die Qualität des Berechnungsverfahrens (Sperling, 1996).

Da die Handhabung dreidimensionaler atmosphärischer Strömungsmodelle vorwiegend nur für erfahrene Experten praktikabel ist, werden relativ selten numerische Modelle für die Bestimmung der Windenergie eingesetzt. Der Grund des hohen zeitlichen und fachlichen Aufwandes zur Bedienung der Modelle liegt unter anderem darin, daß die Modelle für einen weiten Einsatzbereich vorgesehen sind (z. B. Episodensimulation, klimatologische Aussagen bezüglich der räumlichen Verteilung des Windes, unterschiedliche Größen des Untersuchungsgebietes) und deshalb eine Vielzahl von Steuerparametern aufweisen. Der Anwender benötigte daher ein erhebliches Wissen über die physikalischen Prozesse der Atmosphäre bzw. die entsprechende Modellphysik, um das Modell für eine konkrete Fragestellung anzuwenden. Zudem muß man sich häufig individuell um die Visualisierung der Ausgabedaten bemühen. Die genannten Gründe verdeutlichen, daß Simulationsrechnungen zeitintensiv, fehleranfällig und teuer sind.

Um den vermehrten Einsatz von komplexen Berechnungsverfahren bei der Windpotentialbestimmung zu ermöglichen, wird am Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln ein benutzerfreundliches, menügesteuertes Softwareprogramm mit heute üblicher Fensteroberfläche entwickelt. Durch die Optimierung der einzelnen Arbeitsschritte verringert sich neben der Bearbeitungszeit zur Berechnung des Windenergiepotentials und der daraus abgeleiteten Größen auch der fachliche Aufwand zur Einarbeitung in die Bedienung eines solchen Programmsystems.

## 2. Berechnungsverfahren

Um den erhöhten Anforderungen an die Standortbeurteilung von Windkraftanlagen in gegliedertem Gelände gerecht zu werden, wurde ein dynamisch-statistisches Verfahren entwickelt. Das zugrundeliegende Berechnungsverfahren gliedert sich in drei Schritte: Der **dynamische Teil** basiert auf der **Simulation von dreidimensionalen Windfeldern** mit dem numerischen, massenkonsistenten Strömungsmodell **MCF (Mass Consistent Flow - Model, Steffany 1991)**. Hierbei wird ein dreidimensionales Rechengitter mit einer typischen horizontalen Auflösung zwischen 100 und 500 Meter über ein üblicherweise 10 bis 30 Kilometer großes Modellgebiet gelegt, wobei das Kataster für jede Gitterbox am Boden Informationen über die Rauigkeitslänge und die Orographie enthalten muß. In der Vertikalen werden orographiefolgende Koordinaten verwendet. Die vertikalen Abstände der insgesamt etwa 15 Rechenschichten fallen dabei zum Boden hin deutlich geringer aus als in größeren Höhen. Dies führt zu einer höheren Auflösung in Bodennähe, wo die vertikale Änderung der Windgeschwindigkeit in der Regel am stärksten ist. Die zugrundeliegende Modellphysik stellt sicher, daß die physikalischen Antriebsmechanismen des Windfeldes innerhalb der planetaren Grenzschicht schon bei der Initialisierung des Windfeldes berücksichtigt werden. Dazu wird die Modellatmosphäre von MCF in zwei Bereiche aufgeteilt. Im unteren Bereich, innerhalb der sogenannten Prandtl-Schicht, wird das vertikale Windprofil entsprechend eines stabilitätsabhängigen linear-logarithmischen Ansatzes initialisiert. In der darüberliegenden, bis zur Modellobergrenze von etwa 1000 Meter reichenden Ekman-Schicht wird das Windprofil durch die Ekmanspirale vorgegeben. Dabei bestimmen die Antriebsgrößen atmosphärische Schichtungsstabilität, Bodenrauigkeit und geostrophischer Wind die Windzunahme mit der Höhe. Neben der Einbeziehung der atmosphärischen Stabilität bei der Erstellung des Initialwindfeldes geht diese Information in anderer Form auch bei der Simulation des an die Topographie angepaßten divergenzfreien Windfeldes ein. Hierzu werden Transmissionskoeffizienten ermittelt, die den in der Atmosphäre zu beobachtenden Effekt berücksichtigen, daß mit zunehmender thermischer Stabilität eine stärker werdende Leitwirkung der Orographie auf das bodennahe Windfeld auftritt.

Der **statistische Teil** des Berechnungsverfahrens beinhaltet die Ermittlung der **flächendeckenden Windklimatologie**, d. h. der Häufigkeitsverteilungen von Windstärke und -richtung an allen Gitterpunkten des Modellgebietes. Hierzu wird das **Windklimatologieverfahren Wikli (Brücher 1993)** angewandt, bei dem zunächst mit einer Vielzahl von Windfeldsimulationen mit MCF die in der realen Atmosphäre auftretenden Strömungsverhältnisse repräsentativ abgedeckt werden. Aus den vorliegenden dreidimensionalen Windfeldern kann eine lineare Abbildung zwischen Höhen- und Bodenwinden hergestellt werden. Da dieser lineare Zusammenhang von der umgebenden Topographie abhängt, muß für jeden Gitterpunkt eine spezifische Abbildungsmatrix erstellt werden. Daraufhin kann mit Hilfe einer gemessenen Bodenwindverteilung und der für den Meßstandort gültigen Abbildungsmatrix eine synthetische Höhenwindrose erzeugt werden (Abb. 1). Die so erzeugte Höhenwindrose beinhaltet die Wichtung der Simulationsergebnisse bezüglich der tatsächlichen Auftrittshäufigkeit der einzelnen atmosphärischen Verhältnisse. Ausgehend von der synthetischen Höhenwindrose lassen sich dann mit Hilfe der

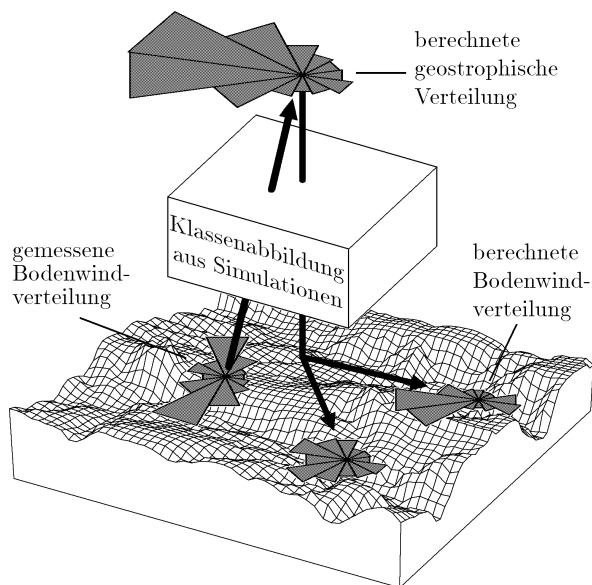


Abb.1: Schematische Darstellung einer flächendeckenden Windklimatologie-Berechnung.

Fig. 1: Diagram of an exhaustive wind climatology calculation

vorher berechneten Abbildungsmatrizen die Bodenwindverteilungen an allen Geländepunkten des Simulationsgebietes bestimmen (Brücher et al., 1994). Die Voraussetzung für die Ermittlung einer realitätsnahen Windklimatologie ist mindestens eine von subskaligen Effekten weitgehend unbeeinflusste Bodenwindmessung aus dem Modellgebiet, die Daten über einen klimatologisch repräsentativen Zeitraum von mehreren Jahren enthalten sollte. Die Einbeziehung mehrerer Meßstatistiken in das Berech-

nungsverfahren ist möglich und führt zu einer besseren Absicherung der Ergebnisse. Aus der resultierenden flächendeckenden Windklimatologie lassen sich anschließend im **Windenergieteil** mit dem **Windenergieprogramm Wien** (Hänsch 1997) eine Vielzahl von windenergierelevanten Größen – u. a. Windleistungsdichte und Weibullparameter – für beliebige Höhen über Grund berechnen. Des Weiteren ist es unter Einbeziehung einer Leistungskennlinie von einer spezifischen Windkraftanlage möglich, für beliebige Standorte im Modellgebiet Prognosen über die jährlich zu erwartenden Energieerträge zu erhalten. Mit diesen Informationen können die aus meteorologischer Sicht optimalen Anlagenstandorte bestimmt werden.

### 3. Die menügesteuerte Oberfläche und die graphischen Darstellungen

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde an der Universität zu Köln das benutzerfreundliche, menügesteuerte Softwareprogramm *Wien (Windenergie) für Windows* entwickelt, das für die Steuerung des gesamten Programmablaufes von der Aufbereitung und Vorgabe der notwendigen Eingabedaten bis zur detaillierten graphischen Darstellung der berechneten windenergetischen Kenngrößen zuständig ist. Der Vorteil der Menüsteuerung besteht darin, daß die Erstellung von Eingabedaten – wie dem topographischen Kataster sowie der Aufbereitung von gemessenen Windstatistiken – weitgehend automatisiert durchgeführt werden kann. Darüber hinaus wird die Bedienung der Modelle sowie die Verwaltung der Modellausgabedatensätze vereinfacht. Durch die Implementierung einer direkten menübasierten Visualisierung der Simulationsergebnisse wird zudem der zeitliche Aufwand für die graphische Aufbereitung erheblich reduziert. Im einzelnen wird die Programmsteuerung in die Menüpunkte **Datei**, **Berechnungen** und **Ergebnisse** unterteilt.

#### 3.1 Dateimenü



Hier können die Vorgabewerte für die Windklimatologiebestimmung – wie zum Beispiel das gewünschte Berechnungsniveau über Grund und die Koordinaten von in Betracht gezogenen Windkraftanlagen-Standorten – editiert und die benötigten Eingabedaten aufbereitet werden. Die erforderlichen Windmeßdaten lassen sich dabei aus Statistiken vom Deutschen Wetterdienst DWD oder anderen Institutionen auswählen und in das für die Windklimatologieberechnung benötigte Format konvertieren. Ein weiterer Menüpunkt dient zur Auswahl bzw. visuellen Erstellung des topographischen Katasters aus einem umfangreichen Datensatz. Des Weiteren können vom Datei-Fenster aus die erforderlichen MCF-Simulationsparameter (*Hauptklassen*) automatisch erstellt werden.

#### 3.2 Berechnungsmenü



In diesem Untermenü wird das dynamisch-statistische Berechnungsverfahren gestartet. Es beinhaltet die Durchführung der Windfeldsimulationen mit MCF, die statistische Bestimmung der flächendeckenden Windklimatologie mit Wiki und die Berechnung der windenergetischen Kenngrößen. Dabei besteht die Möglichkeit, sowohl die Programmschritte einzeln ausführen zu lassen – was später unter anderem eine erneute Prognose der Jahresenergieerträge für einen anderen Anlagentyp ermöglicht – als auch alle Berechnungsschritte mit einem Aufruf zu starten.

### 3.3 Ergebnismenü

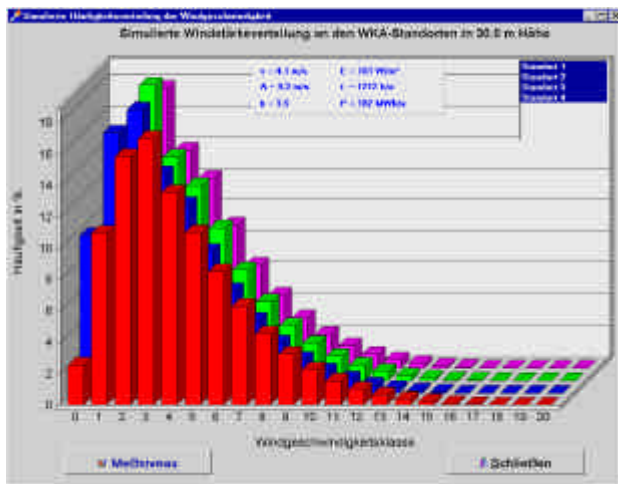
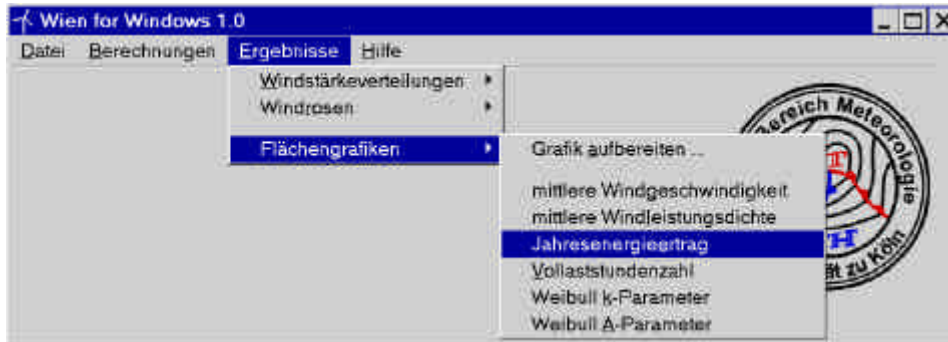


Abb. 2: Simulierte Häufigkeitsverteilungen und windenergetische Größen an verschiedenen Standorten.  
 Fig. 2: Simulated frequency distribution and wind energetic sizes at different sites

In dem Ergebnismenü stehen zahlreiche Möglichkeiten für die graphische Darstellung der Simulationsergebnisse zur Verfügung. Dazu zählen simulierte Windverteilungen mit der Illustration der verschiedenen windenergetischen Größen an ausgewählten Standorten (siehe Abb. 2) und die Anzeige von Windrosen zur Richtungsverteilung und zum Windenergiepotential (Abb. 3). Außerdem lassen sich über die Modellorographie gelegte Isolinienverteilungen aller simulierten Kenngrößen darstellen (siehe Abb. 4), wodurch eine sichere Analyse der günstigsten Geländepunkte für die Windenergienutzung möglich ist.

### 4. Geplante Weiterentwicklungen

Da die Zuverlässigkeit der Ergebnisse entscheidend von der Qualität der Eingabedaten abhängt, wird eine Aktualisierung der im Menüsystem enthaltenen Orographie- und Landnutzungsinformationen vorgenommen. In einer anschließenden Testphase soll eine weitere Optimierung bei der automatischen Erstellung der

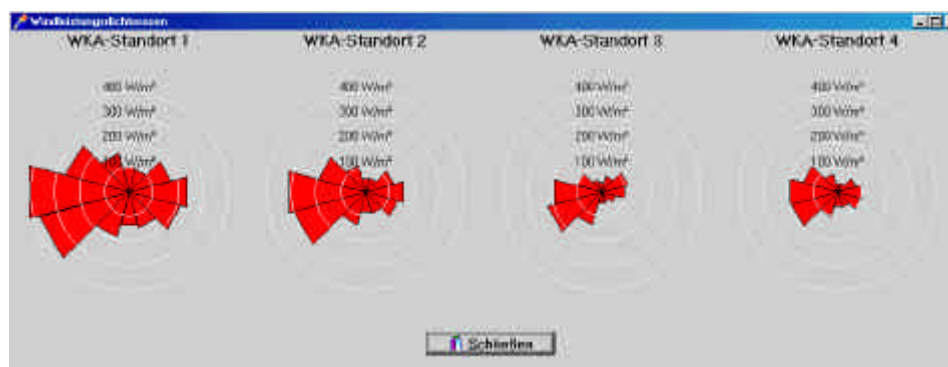


Abb. 3: Simulierte Richtungsrosen des Windenergiepotentials an verschiedenen Standorten.  
 Fig. 3: Simulated directions of wind energy potential at different sites

für die Windfeldsimulationen notwendigen Modelleingabeparameter erreicht werden. Hierdurch wird gewährleistet, daß das Berechnungsverfahren operationell eingesetzt werden kann und zusätzlich eine weitere Rechenzeitoptimierung erzielt wird. Nach Abschluß der geplanten Entwicklungsarbeiten kann ein flexibel einsetzbares menügesteuertes Prognosesystem zur Standortbeurteilung von Windkraftanlagen in gegliedertem Gelände einem größeren Interessentenkreis zur Verfügung gestellt werden.

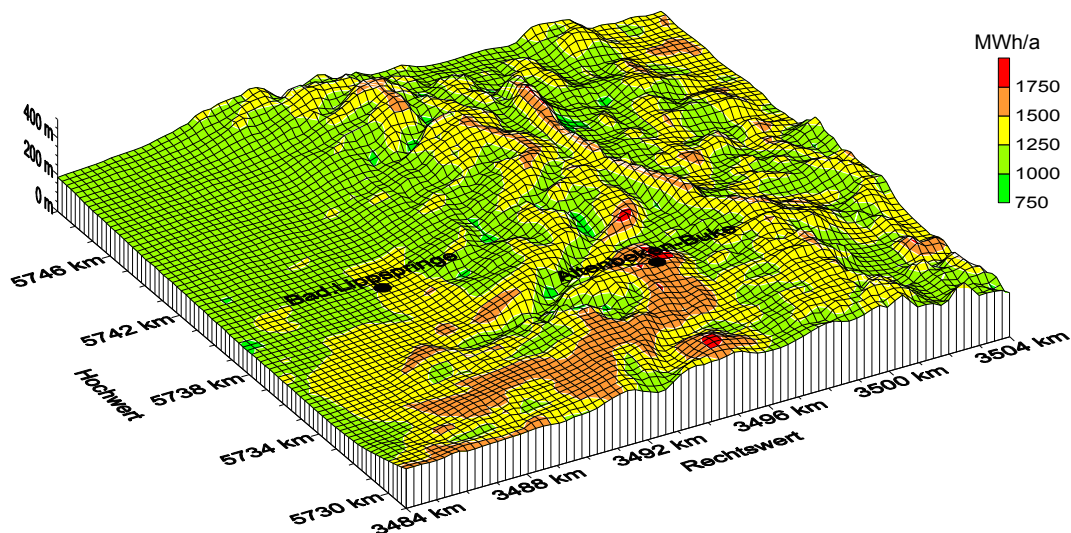


Abb. 4: Simulierter Jahresenergieertrag für eine Nordex N-54 / 1000 kW – Anlage mit 60 m Nabenhöhe für die Region nördliches Eggegebirge.

Fig. 4: Simulated annual energy yield for Nordex N-54 / 1000 kW with 60 m hub height for the region north Eggegebirge

### Danksagung

Die Entwicklung des Programmsystems wurde vom Ministerium für Schule und Weiterbildung, Wissenschaft und Forschung (MSWWF) des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert.

### 5. Literaturverzeichnis

Brücher, W., 1993: Synthetische Windklimatologien aus Bodenwindmessungen und mesoskaligen Strömungssimulationen, Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln.

Brücher, W., M. Kerschgens, F. Steffany, 1994: On the Generation of Synthetic Wind Roses in Orographically Structured Terrain, Theor. Appl. Climatol., 48, 203-207.

Hänsch, R., 1997: Dynamisch-Statistisches Verfahren zur flächendeckenden Simulation von windenergetischen Kenngrößen im strukturierten Gelände, Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln.

Sperling, T., R. Hänsch, W. Brücher, M. Kerschgens, 1996: Einsatz eines mesoskaligen Strömungsmodells zur Berechnung von flächendeckenden Windenergiepotentialen im gegliederten Gelände, Tagungsband der 3. Deutschen Windenergie-Konferenz 1996, 93-96, Wilhelmshaven.

Steffany, F., 1991: Anwendung eines massenkonsistenten Strömungsmodells im "Microscale", Diplomarbeit, Institut für Geophysik und Meteorologie, Universität zu Köln.