

WINDPOTENTIALBESTIMMUNG IN KOMPLEXEM GELÄNDE MIT DEM NUMERISCHEN
STRÖMUNGSMODELL AIOLOS
OPTIMIERUNG DES VERFAHRENS IN BEZUG AUF RAUHIGKEITS- UND
STABILITÄTSEINFLÜSSE

Uli Focken, Detlev Heinemann, Hans Peter Waldl

*Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, Fachbereich Physik, Abteilung Energie und Halbleiterforschung,
26111 Oldenburg, Fax: 0441/798-3326, email: office@ehf.uni-oldenburg.de, www.physik.uni-oldenburg.de/ehf*

Zusammenfassung

Das Verfahren des Europäischen Windatlases hat sich für die Windpotentialbestimmung in ebenem Gelände seit Jahren bewährt. Trotz vielfältiger Bemühungen ist es noch nicht gelungen ein Standardverfahren zur Windpotentialbestimmung in komplexem Gelände zu entwickeln. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Modifikation des Initialwindfeldes des massenkonsistenten Strömungsmodells Aiolos hinsichtlich der Betrachtung von Rauigkeitssprüngen und des Einflusses thermischer Schichtung vorgenommen. Für zwei Standorte im Erzgebirge wurden Potentialbestimmungen unter Verwendung der alten und der neuen Initialisierung durchgeführt und mit Meßdaten verglichen.

1 Einleitung

Mesoskalige massenkonsistente Strömungsmodelle werden schon seit längerem für die Windpotentialbestimmung in komplexem Gelände verwendet. Aufgrund des einfachen Ansatzes, zur Modellierung der Strömung nur die Kontinuitätsgleichung heranzuziehen, ergeben sich im Vergleich zu Modellen auf Basis des vollständigen Satzes der strömungsmechanischen Grundgleichungen viel kürzere Rechenzeiten. Andererseits ist das Modell dadurch nicht in der Lage, komplexere Phänomene, wie Turbulenzgenerierung oder die Auswirkungen von Wärmeflüssen zu modellieren.

Im Rahmen dieser Arbeit ist die Initialisierung des Modells Aiolos, welches aus dem bekannten massenkonsistenten Modell NOABL hervorgegangen ist, hinsichtlich des Einflusses von Rauigkeitswechseln der Erdoberfläche und thermischer Schichtung der Atmosphäre auf das Windprofil verändert worden. Diese Modelle wurden weitestgehend vom Europäischen Windatlas übernommen, der sich für die Vorhersage von Windpotentialen in flachem Gelände bewährt hat.

2 Initialisierung des Modells

Zur Strömungssimulation wird die Atmosphäre des betrachteten Gebietes in ein Gitter mit $x \times y \times z$ Zellen eingeteilt. In Aiolos werden aquidistante horizontale Gitterabstände benutzt. Die z -Koordinate wird in eine orographiefolgende Koordinate σ transformiert, um die Randbedingung zu erfüllen, daß die Geländeoberfläche die untere Begrenzung des Modellgitters darstellt. Außerdem nehmen die Abstände der Schichten in Bodennähe ab, um hier eine größere Auflösung zu erreichen. Aiolos geht von einer hydrostatischen Atmosphäre aus. Daraus folgert, daß die Dichte in jeder Zelle während einer Simulation konstant bleibt.

Massenkonsistente Modelle setzen ein Initialwindfeld voraus, daß dann mit Hilfe der Kontinuitätsgleichung um Orographieeinflüsse korrigiert wird. Dieses Initialwindfeld muß deshalb bereits die Höhenabhängigkeit des Windes für eine ebene Fläche möglichst gut modellieren.

Die Korrektur des Initialwindfeldes beruht auf der Lösung der Kontinuitätsgleichung:

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

2.1 Initialisierung bei Aiolos

Aiolos berechnet das Initialwindfeld aus Höhenwinddaten, die beispielsweise mittels Radiosondenaufstiegen gewonnen wurden. Das vereinfachte Geostrophische Reibungsgesetz

$$u_* = \frac{0.5 G}{\ln \frac{z}{z_0}}$$

stellt dann eine Verbindung zwischen dem Geostrophischen Wind und der bodennahen Grenzschicht her. Das Windprofil für jede Gittersäule berechnet sich aus dem logarithmischen Windprofil für neutrale Schichtung mit der lokalen Rauigkeitslänge, welches für größere Höhen mit einem Polynom 3. Grades an den Geostrophischen Wind gefittet wird:

$$v = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) + 3 \cdot \left(\frac{z}{z_{MIXL}} \right)^2 - 2 \cdot \left(\frac{z}{z_{MIXL}} \right)^3$$

z_{MIXL} gibt die Höhe an, für die der Geostrophischen Windes angesetzt wird. Aufgrund dieses einfachen Modellansatzes zeigt das so berechnete Initialwindfeld bereits für ebenes Gelände starke Abweichungen zu Meßdaten. Deshalb wurden das Modell verändert und eine Berechnung des Initialwindfeldes auf Grundlage der Modelle von WAsP durchgeführt.

2.2 Das neue Initialwindfeld

2.2.1 Berücksichtigung der Stabilität

Das oben genannte logarithmische Windprofil gilt nur für eine neutrale Schichtung der Atmosphäre. In unseren Breiten liegt im klimatologischen Mittel jedoch eine leicht stabile Schichtung vor. Um dies zu berücksichtigen, wird das logarithmische Windprofil durch eine Stabilitätsfunktion ψ modifiziert:

$$v = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_0} - \psi \left(\frac{z}{L} \right) \right)$$

L stellt die Monin-Obukhov-Länge dar. Die Stabilitätsfunktion

$$\psi(z/L) = \begin{cases} \left(1 - 16 \frac{z}{L}\right)^{\frac{1}{4}} - 1 & \text{bei labiler Schichtung} \\ -4.7 \frac{z}{L} & \text{bei stabiler Schichtung} \end{cases}$$

wurde von [jens84] übernommen.

2.2.2 Betrachtung von Rauigkeitswechselln

In Aiolos wird nur die in einer Gittersäule vorherrschende lokale Rauigkeit, beschrieben durch die Rauigkeitslänge z_0 , zur Berechnung des Windprofils des Initialwindfelds benutzt. Dadurch haben stromaufwärts liegende Rauigkeiten keinen Einfluß auf das Profil einer Gittersäule.

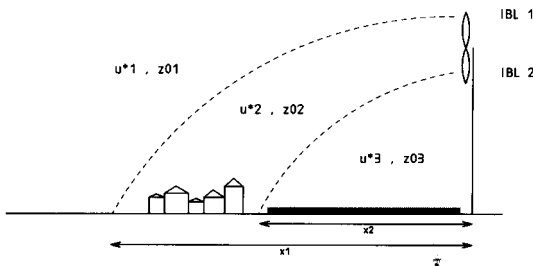


Abb. 1.: Entwicklung einer internen Grenzschicht an zwei Rauigkeitswechselln. Die charakteristischen Größen sind die Schubspannungsgeschwindigkeit u_* und die Rauigkeitslänge z_0

In Abbildung 1 sind schematisch zwei Rauigkeitswechsel dargestellt. Bei von links einströmendem Wind bilden sich zwei interne Grenzschichten (Internal Boundary Layer, IBL) aus. Oberhalb der IBL 1 bestimmt die Rauigkeit des Wassers ganz links die Windgeschwindigkeit, zwischen den IBL's, also auf Höhe der WKA wird die Windgeschwindigkeit durch die Rauigkeit der Stadt bestimmt. Erst im unteren Drittel bestimmt die vorherrschende lokale Rauigkeit die Windgeschwindigkeit. Die Höhe h der IBL errechnet sich durch

$$\frac{h}{z_{0max}} \left(\ln \left(\frac{h}{z_{0max}} \right) - 1 \right) = 0.9 \frac{x_n}{z_0}$$

z_{0max} ist die größere der beiden Rauigkeitslängen. x_n ist der Abstand des Rauigkeitssprungs vom

Standort. Diese Gleichung ist jedoch nur für geringe Entfernungen der Rauigkeitssprünge vom Standort gültig. Für größere Entfernungen wurde von [semp86] durch empirische Untersuchungen nachgewiesen, daß die Einführung von Zwischenhöhen erforderlich ist. Sie werden mit 9% und 30% angegeben. Das Gesamtprofil für zwei Rauigkeitssprünge ergibt sich zu

$$u = \begin{cases} \frac{u_{*1}}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_{01}} \right) & ; 0.3h_1 \leq z \\ u'' + (u''' - u'') \frac{\ln \left(\frac{z}{0.3 \cdot h_2} \right)}{\ln \left(\frac{0.3 \cdot h_1}{0.3 \cdot h_2} \right)} & ; 0.3h_2 \leq z < 0.3h_1 \\ u' + (u'' - u') \frac{\ln \left(\frac{z}{0.09 \cdot h_2} \right)}{\ln \left(\frac{0.3 \cdot h_2}{0.09 \cdot h_2} \right)} & ; 0.09h_2 \leq z < 0.3h_2 \\ \frac{u_{*2}}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_{03}} \right) & ; z < 0.09h_2 \end{cases}$$

mit

$$u' = \frac{u_{*3}}{\kappa} \ln \left(\frac{0.09 \cdot h_2}{z_{03}} \right)$$

$$u'' = \frac{u_{*2}}{\kappa} \ln \left(\frac{0.3 \cdot h_2}{z_{02}} \right)$$

$$u''' = \frac{u_{*1}}{\kappa} \ln \left(\frac{0.3 \cdot h_1}{z_{01}} \right)$$

u_* ist die Schubspannungsgeschwindigkeit und κ die von Kármán - Konstante.

Für die Betrachtung von Rauigkeitssprüngen wird die Umgebung eines Standortes in 12 Sektoren zu je 30 Grad eingeteilt. Im Gegensatz zu WAsP, wo nur ein Punkt betrachtet wird, ist es bei Aiolos nicht möglich die Rauigkeitssprünge für 10000 Gitterpunkte aus einer Topographischen Karte zu bestimmen. Deswegen haben wir einen Algorithmus entwickelt, der aus einem Gitter von Rauigkeitswerten ein Gitter von Rauigkeitsrosen errechnet.

2.3 Das numerische Verfahren

Ausgehend von dem Initialwindfeld \vec{v}_0 wird ein Korrekturwindfeld \vec{v}_k errechnet, welches die notwendige Korrektur zur Minimierung der lokalen Divergenz definiert.

Das Korrekturwindfeld bei Aiolos ist so geartet, daß das Initialwindfeld in seinen charakteristischen Eigenschaften unverändert bleibt. Vor allem soll die Wirbelstärke des Initialwindfeldes erhalten bleiben

$$\nabla \times \vec{v}_k = 0.$$

Damit ist es möglich, das Korrekturwindfeld aus einem Geschwindigkeitspotential Φ abzuleiten

$$u_k = \tau_h \frac{\partial \Phi}{\partial x}, \quad v_k = \tau_h \frac{\partial \Phi}{\partial y}, \quad w_k = \tau_v \frac{\partial \Phi}{\partial z}.$$

Die Transmissionskoeffizienten τ_h und τ_v bestimmen dabei das Verhältnis zwischen Um- und Überströmung von Hügeln. Sie sind im allgemeinen abhängig von der thermischen Schichtung der Atmosphäre. Für konstante Dichte lautet die Kontinuitätsgleichung:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

Nach Einsetzen der vorherigen Gleichung ergibt sich die zu lösende Poissongleichung zu

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\tau_h \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\tau_h \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\tau_v \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) = - \left(\frac{\partial u_0}{\partial x} + \frac{\partial v_0}{\partial y} + \frac{\partial w_0}{\partial z} \right).$$

Diese Gleichung muß nach der Diskretisierung iterativ gelöst werden. Dazu wird das Successive - Overrelaxation - Verfahren benutzt. Siehe dazu [Müller96], [tracy78] und [steff91].

3 Ergebnisse

In Abbildung 2 ist die Rauigkeit des Rechengebietes von Ragewitz zu sehen. Dargestellt ist die Rauigkeitslänge z_0 , die von 0.05 für Ackerflächen, die dieses Gebiet bestimmen, bis 0.6 für eine Stadt im Osten variiert. Außerdem sind noch zwei Waldstücke und mehrere Dörfer zu erkennen. Für einen Geostrophischen Wind von 15 m/s aus Nordwesten ergibt sich das in Abbildung 3 dargestellte Ergebniswindfeld für eine Ebene. Dargestellt ist die horizontale Windgeschwindigkeit in 36 m Höhe. Es ist zu erkennen, daß die Windgeschwindigkeiten nicht direkt an Punkten hoher Rauigkeit, sondern erst im Windschatten stromabwärts erniedrigt sind. Besonders deutlich zu sehen ist dieser Effekt bei der Stadt im Osten wie auch bei den kleinen Dörfern im Nordwesten.

Im weiteren wird auch die Orographie des Gebietes betrachtet, die in Abbildung 4 dargestellt ist. Das Gelände variiert von 120 m in einem Flußtal bis zu 240 m auf zwei nahe beieinander liegenden Hügeln. Die mittlerer jährliche Windgeschwindigkeit wird aus der Berechnung von 40 Windklassen mit je 12 Sektoren und Wichtung nach der Häufigkeit des Geostrophischen Windes errechnet und ist in Abbildung 5 zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, daß für größere Höhen höherer Windgeschwindigkeiten simuliert werden. Darüberhinaus werden durch große Höhengradienten höhere Geschwindigkeiten hervorgerufen, was daran zu erkennen ist, daß auf den zwei Ausläufern des Hügels im Nordwesten höhere Windgeschwindigkeiten als auf dem Haupthügel simuliert werden.

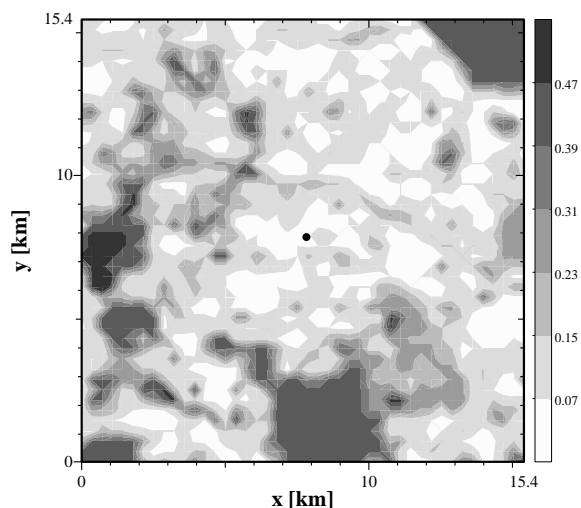


Abb. 2.: Karte der Rauigkeitslängen z_0 [m] für das Rechengebiet um Ragewitz.

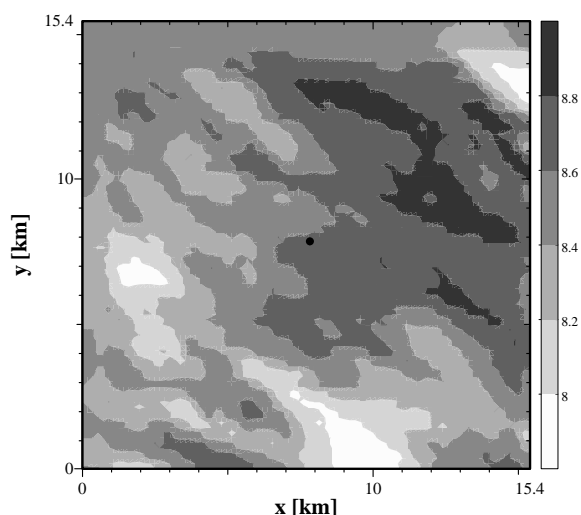


Abb. 3.: Horizontales Geschwindigkeitsfeld in 36m Höhe [m/s]. Geostrophischer Wind aus Nordwesten.

Seit 1992 steht in der Mitte des betrachteten Gebietes ein Meßmast. Mit altem und neuem Initialwindfeld wurde für diesen Punkt das Windpotential simuliert und mit Meßdaten verglichen. Im folgenden wird von der neuen Windgeschwindigkeit für die mit dem neuen Initialwindfeld simulierte Windgeschwindigkeit und entsprechend von der alten Windgeschwindigkeit gesprochen. In Tabelle 1 ist zu se-

	k	v [m/s]	P [W/m ²]
alte Initialisierung	1.77	5.59	234
neue Initialisierung	1.84	6.34	322
Meßwerte	2.08	6.41	295

Tab. 1.: Ergebnisse für den Standort Ragewitz .

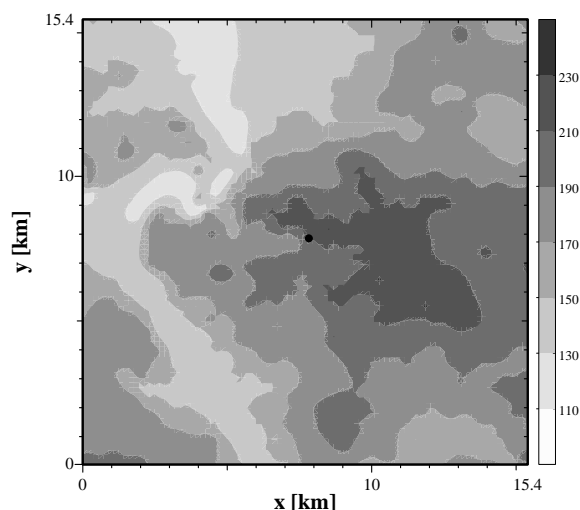


Abb. 4.: Orographische Struktur [Höhe in m über NN] von Ragwitz.

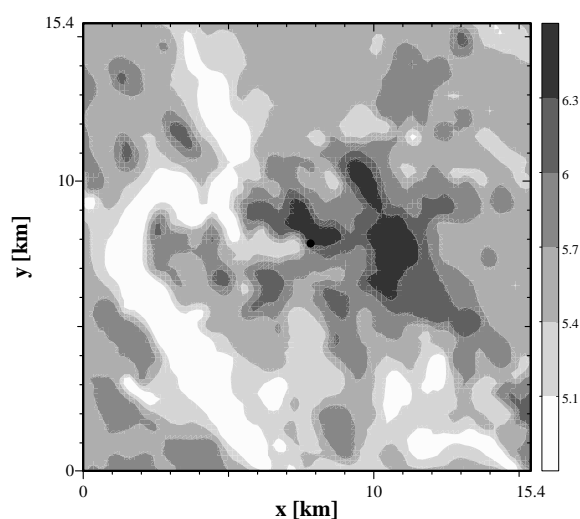


Abb. 5.: Feld der mittleren jährlichen Geschwindigkeit [m/s] von Hermsdorf in 36 Meter Höhe über Grund mit Berücksichtigung von Rauigkeit und Orographie.

hen, daß die simulierte neue mittlere jährliche Windgeschwindigkeit nur 1.1 % Abweichung gegenüber der Messung hat, gegenüber einer Abweichung der alten mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit von 12.8 %. Durch einen unterschätzten k-Wert der Weibullverteilung, der die Form der Gesamtgeschwindigkeitsverteilung wiedergibt, hängt die mittleren Leistungsdichte nicht nur von der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit ab, und liegt bei 9.5% für das neue Initialwindfeld im Gegensatz zu 20.5% für das alte Initialwindfeld.

Die gleichen Berechnungen wurden für den Standort Hermsdorf, der in den höheren Lagen des Erzgebirges liegt, durchgeführt. Hier wird das Gelände durch wesentlich höhere Steigungen und Höhenunterschie-

	k	v [m/s]	P [W/m ²]
alte Initialisierung	1.79	5.40	207
neue Initialisierung	1.84	6.16	297
Meßwerte	2.01	6.96	374

Tab. 2.: Ergebnisse für den Standort Hermsdorf

de bestimmt. Es kommt zu größeren Abweichungen bei der Simulation von mittlerer jährlicher Windgeschwindigkeit und der mittleren Leistungsdichte. Die Unterschätzung des k-Wertes ist identisch mit den in Ragwitz errechneten Werten. Weitere Rechnungen mit WAsP haben gezeigt, daß es sich hier um einen systematischen Fehler handelt, der aus einer falschen Abbildung des Höhenwindes durch das Geostrophische Reibungsgesetz resultiert.

4 Zusammenfassung

Die Verwendung eines neues Initialwindfeldes führt zu einer erheblichen Verbesserung der Vorhersage der mittleren jährlichen Windgeschwindigkeit wie der mittleren Leistungsdichte. Die noch vorhandene systematische Unterschätzung des k-Wertes könnte durch Einbeziehung von Bodenwinddaten vermieden werden. Wichtig sind weitere Simulationen, da zwei Rechnungen nur eine geringe Grundlage für eine Modellverifikation bilden.

Literatur

- [ewa90] I. Troen, E.L. Petersen: *Europäischer Windatlas*. Risø National Laboratory, Roskilde, Denmark (1990).
- [jens84] N. O. Jensen, E.L. Petersen, I. Troen: *Extrapolation of mean wind statistics with regard to wind energie applications*. World Meteorological Organisation WCP-86.85, (1984).
- [lalas85] D.P. Lalas: *Wind Energy Estimation and Siting in Complex Terrain*. International Journal of Solar Energy 1985. Vol.3 S.43 - 71
- [Müller96] Richard Müller: *Untersuchung zur Windpotentialbestimmung in gegliedertem Gelände*. Diplomarbeit, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg (1996).
- [semp86] A.M Sempreviva, I. Troen, A. Lavagnini: *Modelling of Wind Power Potential over Sardinia*. Proc. of EWEC 1986 Rome (1986).
- [steff91] F. Steffany: *Anwendung eines massenkonsistenten Strömungsmodells im 'Microscale'*. Diplomarbeit, Universität Köln (1991).
- [tracy78] R. M. Tracy, G. T. Phillips, P. C. Patnaik: *Developping a Site Selection Methodology for Wind Energie Conversion Systems*. Technical report, DOE/ET/20280-3 NTIS (1978).
- [trifo90] D.Trifonopoulos, G. Bergeles: *Wind Energy Potential over the Evia Wind Park - Greece*. Proc. of EWEC 1990, Madrid (1990).