Das Verhältnis der Nabengeschwindigkeit zur Windleistung in der Rotorfläche und mögliche Auswirkung auf das Leistungsverhalten von Windkraftanlagen

J. Friedrich, FB Geowissenschaften, Westfälische Wilhelms-Universität Münster
Mai 2003

1 Einleitung

Die Entwicklung immer größerer Windkraftanlagen wirft die Frage auf, inwiefern die Nabenwindgeschwindigkeit noch das Geschwindigkeitsfeld in der gesamten Rotorfläche korrekt repräsentiert, inwiefern also weiterhin allein aus der Nabengeschwindigkeit über die Leistungskennlinie auf die Konverterleistung geschlossen werden kann. Insbesondere für Anlagenstandorte in komplexem Terrain mit stark inhomogenen Strömungsmustern ist diese Frage bislang noch offen (vgl. [16], S. 36).

Das Grundproblem besteht darin, dass die Leistungskennlinie die Konverterleistung ausschließlich in Abhängigkeit der Nabengeschwindigkeit beschreibt. Die Leistungskennlinie wird nach festgelegten Standards[1] und im Idealfall unter homogenen atmosphärischen Bedingungen aufgenommen; sie ist strenggenommen auch nur unter den Bedingungen der Vermessung gültig. So erklärt sich, dass insbesondere für Anlagenstandorte in strukturiertem Terrain zwischen der tatsächlich abgegebenen Anlagenleistung und den über Leistungskennlinie und Nabengeschwindigkeit prognostizierten Werten immer wieder Abweichungen auftreten, vgl. z. B. [18] oder [13]. Eine genauere Aufklärung dieser Zusammenhänge würde also helfen die Qualität von Ertragspronosen zu verbessern und die aus Fehlschätzungen der Anlagenleistung resultierenden Konfliktfälle zu minimieren.

Trotz des zum Teil enormen Aufwandes, der in diesem Zusammenhang betrieben wird, greifen die gängigen Erklärungsansätze (Turbulenzgrad, Betriebsführung der Anlage, etc.) in vielen Fällen nicht, vgl. [14]. Zugleich verdichten sich damit die Hinweise darauf, dass unser Bild von der Beziehung der Konverterleistung zum Windfeld noch unvollständig ist. In dieser Arbeit wird mit der Relation der Nabengeschwindigkeit zur Windflächenleistung ein grundlegender Aspekt aus diesem Problemkreis diskutiert, der bisher wenig Beachtung gefunden hat.[2]

Die Leistungsaufnahme des Rotors ist eine komplizierte Funktion des anströmenden Windfeldes $\vec{v}$ und als solche unbekannt. Klar ist aber, dass die Flächenleistung

[1] Grundlage ist i. a. die IEC-Richtlinie EN 61400-12; zusätzliche Spezifizierungen liefert MEASNET.

[2] Allerdings wurde gerade in jüngerer Zeit auf die Notwendigkeit einer solchen Untersuchung hingewiesen, vgl. etwa [14].

des Windes P in der Rotorfläche F_R

$$P(\vec{v}) = \frac{1}{2} \int\limits_{F_R} \rho \ (\vec{v} \cdot \vec{n_R})^3 \, dF. \tag{1}$$

in dieser Funktion die zentrale Rolle spielt, da sie (modulo *Betzschem Beiwert*) die maximal zur Verfügung stehende Energiemenge definiert.

Wenn hier angenommen wird, dass nur die flächennormalen Anteile des Windfeldes ($\vec{n_R}$ ist der Einheitsnormalenvektor der Konverterfläche, ρ die Luftdichte) zur Leistung beitragen, so ist darin bereits implizit eine Vorstellung vom eingesetzten Windkonvertertyp enthalten. Für den klassischen Horizontalachser stellt Definitionsgleichung (1) den plausibelsten Ansatz dar.

Eine Proportionalität von Konverterleistung und Flächenleistung kann allerdings nur in erster Näherung, und auch dann nur für den Teillastbereich, angenommen werden. In diesem Zusammenhang müssen die anlagenspezifischen Aspekte in der Energiewandlung, vgl. dazu [11], berücksichtigt werden. Neben diesen sind weitere windklimatologische Einflussgrößen zu beachten. An erster Stelle sind hier Schräganströmung und Turbulenzgrad zu nennen. Diese Aspekte des Windfeldes können in Relation zur Flächenleistung als Störkomponenten aufgefasst werden. Beispielsweise werden Schräganströmungen in erster Ordnung durch Gleichung (1) berücksichtigt.

Diese zusätzlichen Einflussfaktoren dürfen in Bezug auf das Leistungsverhalten einer Windkraftanlage grundsätzlich nicht außer Acht gelassen werden. Sie waren bereits Thema zahlreicher Veröffentlichungen (beispielsweise in der Magazinreihe des Deutschen Windenergieinstituts, DEWI, [24], [2], [5] u. a.) und sollen, ebenso wie alle nicht rein windklimatologischen Aspekte, im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden.

Die Problemstellung, die Beziehung zwischen Nabengeschwindigkeit, Leistungskennlinie und tatsächlicher Konverterleistung, reduziert sich dadurch auf das grundlegende aber bisher kaum untersuchte Verhältnis der Nabengeschwindigkeit zur Windleistung in der Rotorfläche. Dieses Verhältnis wird in dieser Arbeit für unterschiedliche Rotorradien und Nabenhöhen in unterschiedlichen Strömungssituationen analysiert. Dabei wird eine Unterscheidung von homogener Konverteranströmung (ideale Bedingungen bei der Vermessung einer Leistungskennlinie, ausschließlich vertikale Windscherung) und stark inhomogener Anströmung (reale Anlagenstandorte in komplexem Terrain) vorgenommen. Dies gestattet, die Ergebnisse im Hinblick auf einen möglichen Fehler bei der Übertragung der Leistungskennlinie vom Referenzstandort auf »kritischere« Standorte zu interpretieren.

Die Gliederung dieses Textes ist wie folgt: Zunächst wird in Abschnitt 2 die Flächenleistung unter homogenen atmosphärischen Bedingungen diskutiert und die Gültigkeit des »Standardansatzes« zur Approximation der Flächenleistung überprüft. In Abschnitt 4 wird die Flächenleistung für eine Reihe von Strömungssituationen mit stark inhomogenen Strömungsmustern betrachtet. Die zu Grunde liegenden Windfelder wurden numerisch bestimmt, s. Abschnitt 3. In Abschnitt 5 werden die Ergebnisse im Hinblick auf das Leistungsverhalten von Windkonvertern und ihre Beschreibung über die Leistungskennlinie interpretiert. Abschnitt 6 liefert eine Nachbetrachtung des methodischen Ansatzes und macht auf noch offene Fragestellungen aufmerksam.

2 Die Flächenleistung unter homogenen Bedingungen

In diesem Abschnitt wird die Windflächenleistung unter homogenen atmosphärischen Bedingungen betrachtet (vgl. dazu auch [20]). Zunächst werden die absoluten Werte der Flächenleistung dargestellt und allgemeine Zusammenhänge erklärt (Abschnitt 2.1). Die Qualität gängiger Approximationsformeln ist Thema von Abschnitt 2.2. Abschließend wird versucht einige Ergebnisse im Hinblick auf die Konverterleistung zu interpretieren (Abschnitt 2.3).

2.1 Absolutwerte der Flächenleistung

Gemäß Gleichung (1) ist die Flächenleistung P eine Funktion des anströmenden Windfeldes $\vec{v}$. Zur Beschreibung des Windprofiles im untersten Teil der atmosphärischen Grenzschicht existieren unter homogenen atmosphärischen Strömungsbedingungen mindestens zwei konkurrierende Ansätze: das logarithmische Geschwindigkeitsgesetz $v(z) = (u^*/\kappa)\ln(z/z_0)$ und die Exponentialformel $v(z) = v_{\mathrm{ref}}\,(z/z_{\mathrm{ref}})^p$ nach Hellmann.[3]

Nachfolgend werden für beide Profilarten jeweils drei Vertikalprofile betrachtet. Mit den Profilparametern $z_0 = 0.01\,\mathrm{m}$, $0.1\,\mathrm{m}$ und $1.0\,\mathrm{m}$ bzw. $p = 1/8$, $1/6$ und $1/4$ sind in etwa vergleichbare Profilsätze gegeben.[4] Diese decken jeweils das gesamte Rauigkeitsspektrum typischer Binnenlandstandorte ab. (Das z_0-Spektrum ist geringfügig größer.)

Abbildung 1 zeigt die absoluten Werte der Flächenleistung für diese Profile jeweils in Abhängigkeit von Rotordurchmesser R und Nabenhöhe z_{N}. Der Darstellungsbereich umfasst dabei das gesamte Spektrum zur Zeit denkbarer Anlagentypen: $R \leq 60\,\mathrm{m}$, $z_{\mathrm{N}} \leq 120\,\mathrm{m}$. Für den konkreten Anlagenstandort kann also im jeweiligen Graphen abgelesen werden, mit welchen Auswirkungen auf die Flächenleistung bei Variation der (möglicherweise) zur Disposition stehenden Anlagenaspekte (Rotordurchmesser und Nabenhöhe) zu rechnen ist.

Die Werte von $P(v)$ wurden gemäß Gleichung (1) numerisch bestimmt.[5] Alle Berechnungen erfolgten unter der Nebenbedingung $v(30) = 5.5\,\mathrm{m/s}$ (EEG[6]). Die in den Graphen I bis VI dargestellten Verteilungen der Flächenleistung stimmen also in $z_{\mathrm{N}} = 30\,\mathrm{m}$, $R = 0\,\mathrm{m}$ überein und können über diesen »Fixpunkt« miteinander verglichen werden. Beispielsweise kann der Einfluss der Oberflächenrauigkeit über das Vertikalprofil der Geschwindigkeit auf die Flächenleistung den Graphen I bis III (bzw. IV bis VI) entnommen werden: Wie zu erwarten nimmt die Flächenleistung

[3] Strenggenommen gelten beide Profile selbst unter der Annahme völlig homogener atmosphärischen Bedingungen mit dem Übergang zur Drehschicht nicht mehr exakt. Sie sind daher zur Darstellung des Geschwindigkeitsprofiles in der Rotorfläche bei großen Nabenhöhen vielleicht schon kritisch, vgl. z. B. [9]. Dieser Aspekt sollte also in Anbetracht stetig wachsender Anlagengrößen Gegenstand weiterer Untersuchungen sein, siehe dazu auch Abschnitt 6.1.

[4] Ein Vergleich der beiden Profilarten muss sich sinnvollerweise auf ein bestimmtes Höhenintervall beziehen, vgl. [4]. Die Parameter z_0 und p wurden hier so gewählt, dass eine Übereinstimmung der Profile in erster Linie für den Bereich größerer Nabenhöhen gilt.

[5] Genaugenommen wird hier die entsprechende skalare Formulierung von Gleichung (1) verwendet: $P(v) = \frac{1}{2}\int_{F_R} \rho\, v^3\, dF$. Außerdem wurde vereinfachend $\rho = 1.225\,\mathrm{kg/m^3} = \mathrm{konst.}$ angenommen.

[6] Eine Forderung des *Erneuerbare-Energien-Gesetzes*: durch die Bedingung $v(30) = 5.5\,\mathrm{m/s}$ werden die Leistungsangaben zu unterschiedlichen Windkonvertern vergleichbar.

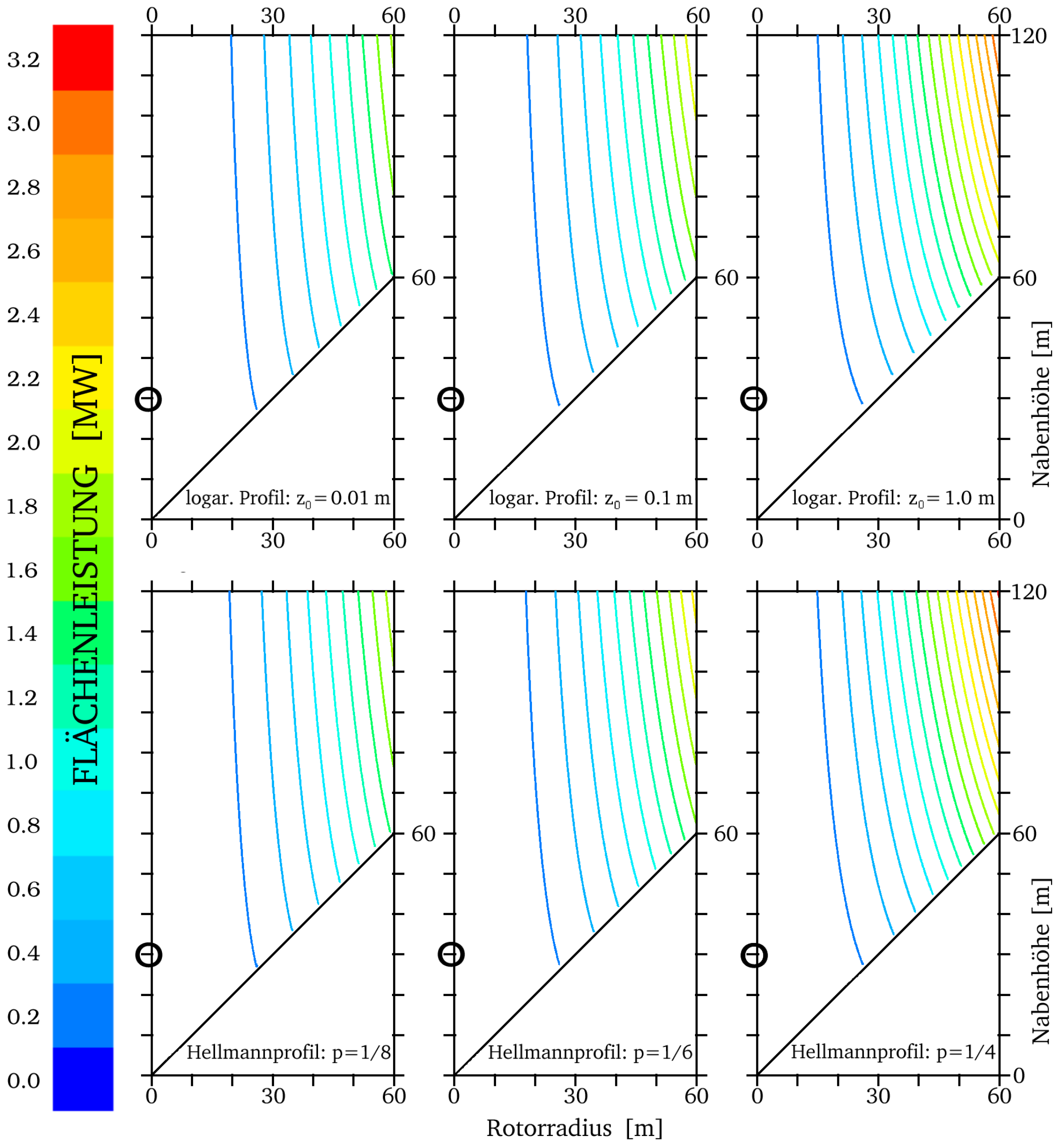

Abbildung 1: Absolute Flächenleistung P unter homogenen atmosphärischen Bedingungen als Funktion von Rotorradius R und Nabenhöhe z_N für unterschiedliche Vertikalprofile der mittleren Geschwindigkeit (Nebenbedingungen: $v(30) = 5.5\,\mathrm{m/s}$, $\rho = 1.225\,\mathrm{kg/m^3}$).

mit Nabenhöhe und Rotorradius zu, wobei für größere Rauigkeiten eine stärkere Zunahme mit beiden Parametern resultiert (jedenfalls für Konverterflächen oberhalb von 30 m entsprechend der Nebenbedingung).

Für einen konkreten Anlagenstandort ist i. a. unbekannt, welcher Profiltyp (log. oder exp.) das mittlere Geschwindigkeitsprofil besser beschreibt.[3] Der Vergleich der der Flächenleistungsverteilungen in Abbildung 1 für die beiden Profilsätze verdeutlicht, dass eine Entscheidung für eine der Profilarten nicht zu grundsätzlich unterschiedlichen Bewertungen der Flächenleistung führen wird.

Unterstellt man eine Proportionalität zwischen Windflächenleistung und der abgegebenen Konverterleistung (was in erster Näherung jedenfalls für den Teillastbereich angenommen werden darf) kann über den Einfluss von Nabenhöhe, Rotorradius und Rauigkeit auf die Anlagenleistung spekuliert werden. Beispielsweise macht Abbildung 1 die bekannte Tatsache anschaulich, dass es bei großen Nabenhöhen wenig attraktiv ist, die Nabenhöhe noch weiter zu erhöhen. Deutliche Leistungszuwächse sind hier nur noch durch größere Rotorflächen zu erzielen.

Durch die Graphen in Abbildung 1 lassen sich vor allem grundsätzliche funktionale Abhängigkeiten der Flächenleistung von den genannten Faktoren erklären. Zur exakten quantitativen Bestimmung der Flächenleistung ist eine solche Darstellung kaum geeignet. Ein einfacher und zugleich sehr genauer Zugang wird sich im Folgenden ergeben.

2.2 Approximationen

Da die Berechnung der exakten Flächenleistungswerte (Gleichung (1)) einer einfachen analytischen Behandlung nicht zugänglich ist, erfolgt diese hier numerisch. In der Regel begnügt man sich mit einfachen approximativen Formeln. Diese basieren im wesentlichen auf Annahmen über das Geschwindigkeitsprofil im Bereich der Rotorfläche.

Der meist verwendete »naive« Ansatz geht davon aus, dass die Nabengeschwindigkeit $v_{\mathrm{N}} := v(z_{\mathrm{N}})$ ($\rho_{\mathrm{N}} := \rho(z_{\mathrm{N}})$) das Windfeld in der gesamten Konverterfläche repräsentiert, so dass

$$P_{\mathrm{naiv}} := \frac{1}{2}\,\rho_{\mathrm{N}}\,v_{\mathrm{N}}^3\,F_R, \tag{2}$$

als Schätzwert für P angenommen wird. (Sofern im Folgenden inhomogene Strömungsmuster betrachtet werden, bezeichnet v_{N} die *horizontale* Komponente der Nabengeschwindigkeit und P_{naiv} wird dann dementsprechend über die Horizontalgeschwindigkeit gebildet.[7]) Für kleinere Rotorflächen ist dies sicher eine sinnvolle Annahme (vgl. dazu auch Abbildung 2).

Für große Rotorflächen wird der durch Gleichung (2) gegebene Ansatz selbst für quasi homogene Bedingungen oft in Frage gestellt, da eine solche Approximation einen möglichen Einfluss des Vertikalgradienten der Geschwindigkeit auf die Flächenleistung nicht berücksichtigt, vgl. [2]. Gelegentlich wird daher für das Vertikalprofil der Geschwindigkeit im Rotorbereich ein linearer Verlauf

$$v_{\mathrm{lin}}(z) := a\,(z - z_{\mathrm{N}}) + b,$$

angenommen, was zwar ebenfalls vereinfachend ist, oft aber die einzig sinnvolle Approximation von Winddaten aus Profilmessungen darstellt. Darüber hinaus hat dieser

[7] In Übereinstimmung mit Definitionsgleichung (1) wird hier also der Horizontalkomponente der Nabengeschwindigkeit gegenüber der Vektorkomponente der Vorzug gegeben. Dahinter verbirgt sich die Annahme, dass die Horizontalkomponente auch und gerade in komplexem Terrain die Konverterleistung besser repräsentiert. Diese Einschätzung liegt im Trend der aktuellen Diskussionen über die geeignete Beschreibung der Konverterleistung über die Leistungskennlinie und über den Charakter der zur Vermessung einzusetzenden Anemometer, vgl. [14].

Ansatz den Vorteil, dass weiterhin eine analytische Beschreibung der Flächenleistung möglich ist:

$$P(v_{\text{lin}}) = \frac{1}{2}\,\rho\, b^3\, F_R\, \left(1 + 3\left(\frac{aR}{2\,b}\right)^2\right). \tag{3}$$

Hier steht a für den Vertikalgradienten der Geschwindigkeit und b für die Geschwindigkeit, die für die Nabenhöhe angesetzt wird.[8]

Für beide Profilarten (log. und exp.) wird die Flächenleistung für den gesamten Bereich von z_{N} und R und für alle Rauigkeiten beispielsweise recht gut durch $P_1 := P(v_1)$, $v_1(z) := (\partial v/\partial z(z_{\text{N}}))(z - z_{\text{N}}) + v_{\text{N}}$ (Graphen IV und VI in Abbildung 2) und durch $P_2 := P(v_2)$, $v_2(z) := (v(z_{\text{N}}{+}R) - v(z_{\text{N}}{-}R))/2R \cdot (z - z_{\text{N}}) + v_{\text{N}}$ approximiert.[9]

In den Graphen I bis VI in Abbildung 2 kann der relative Fehler bzw. die Genauigkeit der beiden Approximationen P_{naiv} und P_1 für unterschiedliche Profilvorgaben abgelesen werden. Zunächst stellt man fest, dass die Flächenleistung durch beide Schätzgrößen generell überschätzt wird:

$$P \overset{\text{Abb. 2}}{\leq} P_{\text{naiv}} \overset{\text{Gl. (3)}}{\leq} P_1$$

Die Ungleichung impliziert, dass über die vorgestellten linearen Näherungen für beide Geschwindigkeitsprofile (log. und exp.) keine Verbesserung in der Approximation der Flächenleistung erzielt werden kann.[10] Unter homogenen Bedingungen ist die durch (2) gegebene einfache Approximation für beide Profilarten genauer. Dies gilt für alle Rotorlängen, Nabenhöhen und Rauigkeiten.

In Abbildung 2 ist weiter auffallend, dass die Güte aller Approximationen P_{Approx} ($P_{\text{Approx}} := P_{\text{naiv}}, P_1$) jedenfalls augenscheinlich in sehr guter Näherung eine Funktion des Quotienten z_{N}/R ist: $[P/P_{\text{Approx}}] = f(z_{\text{N}}/R)$. Vergleicht man f für die verschiedenen Profiltypen und Rauigkeiten (Graphen I bis VI), zeigen sich deutliche Diskrepanzen nur für sehr kleine Argumente $z_{\text{N}}/R \approx 1$. Für $z_{\text{N}} \gtrsim 2R$ ist f dagegen nahezu universell gültig.

Das erlaubt eine einheitliche Charakterisierung der Approximationsansätze für das gesamte Spektrum realer Anlagentypen: Für realistische Nabenhöhen in Relation zur Rotorblattlänge (etwa $z_{\text{N}} \gtrsim 2R$) liegt der Approximationsfehler für beide Profilarten (log. und exp.) und für alle Rauigkeiten um 1.0 Prozent ($0.985 \lesssim P/P_{\text{Approx}} \lesssim$

[8] Hier sind unterschiedliche Wahlen von a und b denkbar. Beispielsweise sind durch $a_1 = \frac{\partial v}{\partial z}(z_{\text{N}})$ und $a_2 = \frac{v(z_{\text{N}}+R)-v(z_{\text{N}}-R)}{2R}$ sowie $b_1 = v_{\text{N}}$ und $b_2 = \frac{v(z_{\text{N}}+R)+v(z_{\text{N}}-R)}{2}$ plausible Wahlen der Koeffizienten gegeben, über die sich obere und untere Schranken von v und damit P konstruieren lassen. Alle vier Näherungen v_{lin} ergeben über Gleichung (3) recht gute Approximation der Flächenleistung, sofern z_{N} hinreichend groß ist (etwa $z_{\text{N}} \gtrsim 2R$). Für deutlich kleinere Nabenhöhen sind die Approximationen für $b = b_2$ allerdings kaum noch zu gebrauchen, während die durch $b = b_1$ gegebenen (diese liefern unter homogenen atmosphärischen Bedingungen obere Schranken) dagegen noch durchweg gut sind.

[9] Die Aussage in [8] bzgl. P_1 und P_2 muss revidiert werden: P_1 stellt für beide Profilarten (log. und exp.) die geringfügig bessere Approximation dar, wobei die durchweg nur sehr geringen Unterschiede zwischen P_1 und P_2 allerdings erst bei minimalen Nabenhöhen ($z_{\text{N}} \approx R$) sichtbar werden.

[10] Dieses auf den ersten Blick vielleicht überraschende Resultat erklärt sich, wenn man in Gleichung (1) die entsprechenden Taylorentwicklungen zu $v^3(z) = ((u^*/\kappa)\ln(z/z_0))^3$ bzw. $v^3(z) = (v_{\text{ref}}\,(z/z_{\text{ref}})^p)^3$ einsetzt und die Korrekturterme bis zur zweiten Fehlerordnung diskutiert.

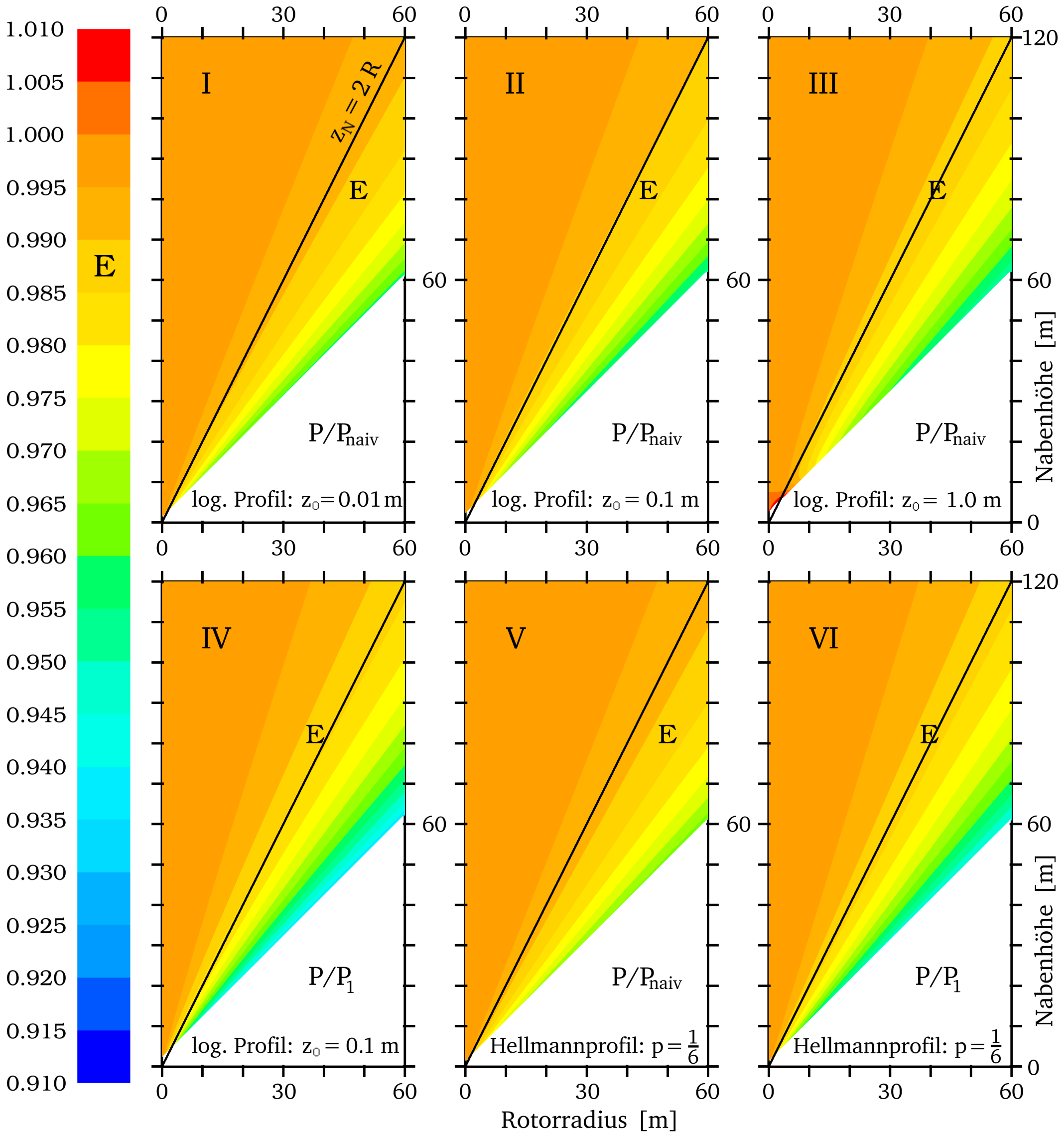

Abbildung 2: Normierte Flächenleistung unter homogenen atmosphärischen Bedingungen als Funktion von Rotorradius und Nabenhöhe für unterschiedliche Vertikalprofile der mittleren Geschwindigkeit. (Die Farbskalierung wurde hier in Konsistenz zu allen weiteren Darstellungen der normierten Flächenleistung gewählt.)

0.995). Speziell für P_{naiv} zeigt sich (Graphen I bis III) für kleine bis mittlere Rauigkeiten und $z_{\text{N}} \gtrsim 2R$ ein Fehler von kaum 1.0 Prozent, für große Rauigkeiten liegt der Fehler nur geringfügig darüber.

Fazit Welches Geschwindigkeitsprofil (log. oder exp.) man im homogenen Fall annimmt, ist für alle grundsätzlichen Betrachtungen wohl unerheblich.

Sollen dagegen zum vorgegebenen Profiltyp absolute Flächenleistungswerte bestimmt werden, ist über die Formeln (2) bzw. (3) – sofern nur die Nabengeschwindigkeit gegeben ist – für jede beliebige Kombination aus Rotorlänge und Nabenhöhe eine einfache und zugleich bis auf wenige Promille genaue Bestimmung der absoluten Flächenleistungswerte möglich. Dazu korrigiert man die Werte aus diesen Formeln über Abbildung 2.

Daneben bleibt festzuhalten, dass eine Schätzung der Flächenleistung, sofern keine genaueren Informationen über das Geschwindigkeitsprofil vorliegen, über Gleichung (2) erfolgen kann. Diese simple Approximation ist für das gesamte Rauigkeitsspektrum nahezu gleichmäßig gut und stellt auch noch für große Rotordurchmesser den besten Ansatz dar.[11] Es ist daher plausibel bei der entsprechenden Diskussion inhomogener Strömungsmuster (Abschnitt 4) eine Normierung der Flächenleistung über P_{naiv} vorzunehmen.

2.3 Interpretation der Ergebnisse im Hinblick auf die Konverterleistung

Welche Interpretationen lässt das skizzierte Verhalten der Flächenleistung im Hinblick auf die abgegebene Konverterleistung zu? – Während eine umfassende Diskussion dieser Frage den Schlussabschnitten 5 und 6 vorbehalten bleibt, sollen hier lediglich zwei Aspekte herausgegriffen werden: der Einfluss der Bodenrauigkeit auf die Anlagenleistung und die Repräsentativität der Ergebnisse.

Der Einfluss der Oberflächenrauigkeit auf die Anlagenleistung Es wurde gezeigt, dass die Güte der Approximationen für das gesamte betrachtete Rauigkeitsspektrum nahezu identisch ist. Dies kann für einen festen Anlagentyp – also feste Nabenhöhe und festen Rotordurchmesser – auch wie folgt interpretiert werden: Die Oberflächenrauigkeit hat über das *mittlere* Vertikalprofil der Geschwindigkeit keinen nennenswerten Einfluss auf P/P_{naiv} und damit auf die Beziehung zwischen Flächenleistung P und Nabengeschwindigkeit $v_{\text{N}} = \sqrt[3]{2\,\rho_{\text{N}}\,P_{\text{naiv}}}$.

Man könnte also annehmen die Oberflächenrauigkeit der Lokalität spiele für die Vermessung der Leistungskennlinie keine Rolle. Tatsächlich ergab eine umfassende unter Federführung des RISØ durchgeführte Studie (vgl. [14]), dass für einen gegebenen Anlagentyp bereits bei vergleichsweise flachem Terrain mit einer statistischen Variation (Standardabweichung) der Leistungskurve von 2 – 3 Prozentpunkten zu rechnen ist.

Der offensichtlichste Erklärungsansatz für diese Diskrepanz zwischen einer standortabhängigen Leistungskurve und der nahezu rauigkeitsunabhängigen normierten Flächenleistung ist der, dass eine Proportionalität zwischen der Leistung des mittleren Windfeldes in der Rotorfläche und der abgegebenen Konverterleistung ($P(\vec{v}) \sim P_{el}$) eben nicht exakt gilt, sondern nur in erster Näherung: Die Rotorleistung ist zwar im wesentlichen eine Funktion des mittleren Windfeldes sie ist aber auch abhängig vom Turbulenzgrad.[12] (Dieser muss daher bei der Vermessung der Leistungskenn-

[11] Letzteres gilt zumindest für solche Nabenhöhen, in denen die angesetzten Geschwindigkeitsprofile (log. oder exp.) noch in guter Näherung gelten, vgl. Fußnote 3.

[12] Für den Einfluss des Turbulenzgrades auf die Anlagenleistung wird häufig folgende Näherung angegeben (vgl. etwa [2]):

$$\overline{P(v)} = P(\overline{v})(1 + 3I^2).$$

linie nach IEC-Richtlinie EN 61400-12 mit erfasst werden. – Im Gegensatz dazu wird in dieser Untersuchung mit der Flächenleistung nur ein Aspekt des mittleren Windfeldes isoliert von allen weiteren leistungsrelevanten Eigenschaften der Konverteranströmung betrachtet.)

Der Turbulenzgrad ist grobgesprochen abhängig von allen möglichen klimatologischen Randbedingungen, variiert also mit dem Anlagenstandort und hängt insbesondere auch von der Bodenrauigkeit ab. Nach diesem Erklärungsansatz wirkt die Oberflächenrauigkeit auf die Anlagenleistung also nicht über das mittlere Windfeld bzw. die Flächenleistung sondern in erster Linie über die Turbulenzintensität.

Berücksichtigt man aber, dass die atmosphärische Grenzschicht auch im Mittel fast nie »perfekt« homogen ist, liefert die Diskussion der Flächenleistung für strukturiertes Terrain (Abschnitt 4.5) Anhaltspunkte dafür, dass die Ursachen für die Schwankungen der Leistungskennlinie zumindest z. T. auch im mittleren Windfeld liegen könnten.

Die Repräsentativität der Verteilungen im statistischen Mittel Die Interpretation der ermittelten Flächenleistungswerte bzw. Verteilungen im Hinblick auf die Energieproduktion einer Windkraftanlage steht unter einem weiteren Vorbehalt: Für die Berechnung der Flächenleistung wurden ganz spezielle atmosphärische Bedingungen eines »idealen Standortes« angesetzt: homogene Strömung, neutrale Schichtung.

Sollen die gefundenen Ergebnisse für einen Anlagentyp im Hinblick auf das Windstrompotential am Standort interpretierbar sein, müssen die angenommenen klimatologischen Bedingungen den Standort im statistischen Mittel beschreiben (vgl. dazu auch Abschnitt 6.2).

Wie sich nachrechnen lässt, sind die Quotienten P/P_{Approx} in allen Fällen und für beide Profiltypen (log. und exp.) unabhängig von der Geschwindigkeit in einer festen Referenzhöhe. Anders als in Abbildung 1 gelten die in Abbildung 2 dargestellten Werte P/P_{Approx} am betrachteten Standort also für das gesamte Spektrum von Anströmungsgeschwindigkeiten.

Jedenfalls gilt dies solange wie die Gestalt des Geschwindigkeitsprofiles am Standort unabhängig von der Bodenschubspannungsgeschwindigkeit (bzw. Referenzgeschwindigkeit) besteht: $v(z)/u^* = 1/\kappa \ln(z/z_0)$ (bzw. $v(z)/v_{\text{ref}} = (z/z_{\text{ref}})^p$). In entsprechendem Umfang sind die hier gefundenen Beziehungen zwischen P und der Schätzgröße P_{Approx} also auch im statistischen Mittel gültig.

3 Numerisch bestimmte Windfelder an Haldenstandorten

Bevor in Abschnitt 4 auf die Flächenleistung unter inhomogenen Strömungsbedingungen eingegangen wird, sollen hier kurz die zu Grunde liegenden Windfelder bzw. Strömungssituationen, das eingesetzte strömungsmechanische Rechenmodell sowie der klimatologische Modellansatz vorgestellt werden.

Dabei bezeichnet I die Turbulenzintensität und der Querstrich ein zeitliches Mittelungsintervall.

3.1 Die Modellorographien

Ziel der weiteren Untersuchung ist die Charakterisierung der Windleistung in der Rotorfläche in Relation zur Nabengeschwindigkeit für Anlagenstandorte in strukturiertem Terrain. Dabei war apriori nicht klar, ob und in welchem Umfang überhaupt Abweichungen von den homogenen Bedingungen auftreten bzw. sichtbar gemacht werden können. Um also mögliche Effekte deutlich hervortreten zu lassen, wurden die Untersuchungen an den stark gestörten Windfeldern im Bereich von Bergehalden[13] durchgeführt.

Dass hier von extrem komplexen Strömungsmustern auszugehen ist, kann aus der speziellen Haldengestalt, der großen Steilheit der Haldenböschungen (bis zum natürlichen Schüttwinkel von 40 Grad) und aus dem oft unregelmäßigen, häufig terrassierten Böschungsaufbau geschlossen werden. Weiter darf angenommen werden, dass die hier auftretenden Störungen des bodennahen Windfeldes bis in typische Nabenhöhen reichen. Letzteres wird plausibel, wenn man beispielsweise die Dimensionen der Halden des Steinkohlenbergbaus im Ruhrgebiet betrachtet. Hier sind Schütthöhen von 60 m und mehr keine Seltenheit, s. [21]. Auf der anderen Seite bestätigen die durchgeführten Modellrechnungen gängige Faustformeln, nach denen Störungen des Windfeldes am Hindernis auch noch in zwei- bis dreifacher Hindernishöhe spürbar sind, vgl. Abbildung 5.

Im Rahmen eines Dissertationsvorhabens im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Münster[14] wurden die Strömungsverhältnisse an den verschiedenen Haldenstandorten numerisch bestimmt. Dabei stand die Aufklärung der lokalen Windverhältnisse im Hinblick auf eine mögliche Windkraftnutzung im Vordergrund. Eine große Zahl der im Rahmen dieses Projektes gewonnenen Datensätze wurde zur Analyse der Flächenleistung herangezogen. Im Folgenden werden die Ergebnisse für eine Auswahl von drei Strömungssituationen präsentiert:

- die zweidimensionale Überströmung einer etwa dammartigen Erhebung[15], s. Abb. 3,
- die dreidimensionale Umströmung eines »Tafelberges«[16], s. Abb. 6 und

[13]Berge = bergmännisch für taubes, nicht verwertbares Gestein. Eine gute facettenreiche Abhandlung über die Bergehalden des Steinkohlenbergbaus im Ruhrgebiet ist [21].

[14]Die Forschungsgruppe Windenergie am Institut für Landschaftsökologie unter Prof. Werner befasste sich ebenso wie das am Institut ansässige IWR (Internationale Wirtschaftsforum für regenerative Energien) etwa ab Mitte der 90-er Jahre mit unterschiedlichen Aspekten der Windkraftnutzung an Haldenstandorten.

[15]Die Geometrie des zweidimensionalen, im wesentlichen glockenkurvenartigen Hindernisses, $h(x) = \max(42.5 \cdot \exp(-25\,(x/300)^{5/2})) - 2.5,\, 0)$, ist dem Querschnitt großer Spitzkegelhalden (1. Haldengeneration des Steinkohlenbergbaus im Ruhrgebiet) oder wallartigen Schüttungen ähnlich.

[16]Für die Hindernisgeometrie im Modell

$$h(r) = \begin{cases} 60.0 & r \in [0, 150] \\ 60 - \frac{1}{2}(r - 150) & r \in]150, 260] \\ \max\left(60 - \frac{1}{2}(r - 150), 0\right) - \left(\frac{r-270}{10}\right)^2 + 1 & r \in]260, 280] \\ 0 & r > 280 \end{cases}$$

wurde ein ellipsensymmetrischer Grundriss ($r = \sqrt{((x - x_0)/2)^2 + (y - y_0)^2)}$) angesetzt. In ihrer Dimensionierung ist die Modellhalde damit insgesamt ein typischer Vertreter der zweiten Halden-

- die dreidimensionale Umströmung der realen Bergehalde »Brinkfortsheide«[17] bei Marl, s. Abb. 4.

Für die beiden dreidimensionalen Hindernisüberströmungen wird nachfolgend jeweils nur eine Anströmungsrichtung betrachtet. Die Ergebnisse können aber als durchaus typisch für die allgemeine Situation angesehen werden.

3.2 Das numerische Strömungsmodell FLUENT

Grundlage einer fundierten Analyse der Flächenleistung ist die exakte hochauflösende Bestimmung der Windfelder. Gerade für die Aufklärung der komplexen Strömungsmuster am Hindernis (Strömungsablösungen) in der atmosphärischen Grenzschicht sind die Anforderungen an das eingesetzte Rechenmodell enorm.[34]

Die numerischen Modellrechnungen erfolgten mit der CFD-Software FLUENT, s. [7], in der Version eines Finite-Volumen-Verfahrens. FLUENT ist im Hinblick auf windkraftrelevante Fragestellungen vor allem auch für die Anwendung in komplexem Terrain prädestiniert.[18] Kennzeichnend sind u. a.:

- eine vollständige Modellphysik (bzw. die Lösung der vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen),

- elaborierte Turbulenzmodelle[19], die es erlauben, auch komplexere Strömungsvorgänge (beispielsweise Strömungsablösungen am Hindernis) korrekt zu erfassen,

- gut justierbare *Wandfunktionen* zur Modellierung der Oberflächenrauigkeiten,

- körperangepasste vollständig krummlinige Gitter, die ohne die bei herkömmlichen mesoskaligen Modellen üblichen Restriktionen orographiefolgender Koordinaten (vgl. [12]) auskommen, was nicht zuletzt die Modellierung in sehr steilem Terrain ermöglicht. Zugleich kann so im Hindernisbereich ein extrem hochauflösendes Rechengitter realisiert werden, s. Abbildung 3.

generation des Steinkohlenbergbaus im Ruhrgebiet (sogenannte »Tafelberge«): Höhe 60 m, Haldengrundfläche 47.5 ha, Ausdehnung der Plateaufläche 300 m bzw. 600 m, minimale Böschungsneigung 1 : 4, maximale Böschungsneigung 1 : 2.

[17] Es handelt sich um einen Übergangstyp zwischen terrassiertem »Tafelberg« und sogenanntem Landschaftsbauwerk (3. Haldengeneration), Höhe 67 m über Umgebungsniveau, Gesamtgrundfläche 124 ha, maximale Böschungsneigung 1 : 2.5.

[18] Dies gilt insbesondere für FLUENT in der Version des Finite-Elemente-Verfahrens (zu einigen Anwendungen auf Fragestellungen der Windkraftnutzung vgl. [6]). Ein Blick auf [6] bzw. [10] lohnt auch deshalb, weil die dort präsentierten Abbildungen die Berechnung der Windleistung in der Konverterfläche auf Basis von FLUENT besonders anschaulich machen.

[19] Neben dem RNG-k-ϵ-Modell (vgl. [23]), einer Weiterentwicklung bzw. Variante des k-ϵ-Zweigleichungsmodells, steht in der eingesetzten FLUENT-Version ein Reynoldsstressmodell zur Verfügung, dass aufgrund seiner höheren Schließung für die Strömungsmodellierung bei komplexen Berandungen als noch stärker einzustufen ist.

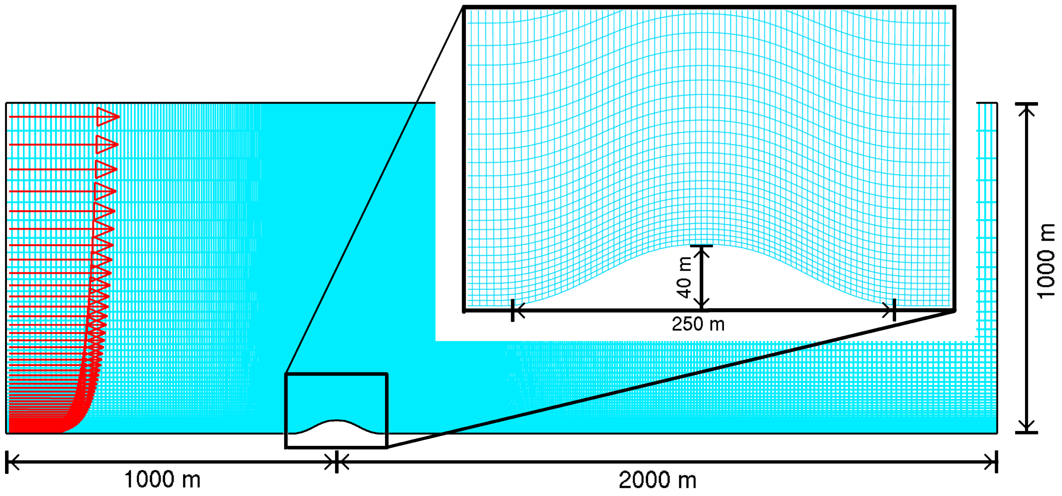

Abbildung 3: Modellbereich und Gitter für die Dammüberströmung

3.3 Klimatologischer Modellansatz

Der strömungsmechanische, aus klimatologischer Sicht mikroskalige Modellansatz mit FLUENT wird am Beispiel der zweidimensionalen Dammüberströmung skizziert. Abbildung 3 zeigt den Modellbereich und das Rechengitter.

Die Formulierung der Anströmungsprofile $(\vec{v}; k; \epsilon)(z)$ am Einströmungsrand geht von einer luvseitig ungestörten (also homogenen) Anströmung im Gleichgewichtszustand aus. Hier werden neben dem Vertikalprofil der Horizontalgeschwindigkeit die zugehörigen Profile von turbulenter kinetischer Energie k und Dissipationsrate ϵ vorgegeben. Das atmosphärische Vertikalprofil der Luftdichte $\rho = \rho(z)$ wird für den gesamten Modellbereich fixiert ($1.225\,\mathrm{kg/m^3}$ am Boden).

Für nicht ganz windschwache Bedingungen sind die Strukturen des bodennahen Windfeldes in erster Linie reliefinduziert und dominieren einen möglichen Schichtungseinfluss auf das Strömungsmuster. Die Modellrechnungen dürfen daher von neutraler Schichtung ausgehen, vgl. auch Abschnitt 4.2.

Die Oberflächenrauigkeiten im Modellbereich entsprechen bei den beiden »künstlichen Modellhalden« (»Damm« und »Tafelberg«) den effektiven Rauigkeitslängen z_0^{eff}, mit denen die Anströmungsprofile gebildet werden. Davon ausgenommen ist der unmittelbare Hindernisbereich. Hier liegt der Rauigkeitswert bei $z_0 \approx 0.19\,\mathrm{m}$. Für »Brinkfortsheide« orientieren sich alle Vorgaben an den realen Verhältnissen[20], s. Abbildung 4.

[20]Orographie und Topographie: Stand etwa Anfang der 90-er Jahre.

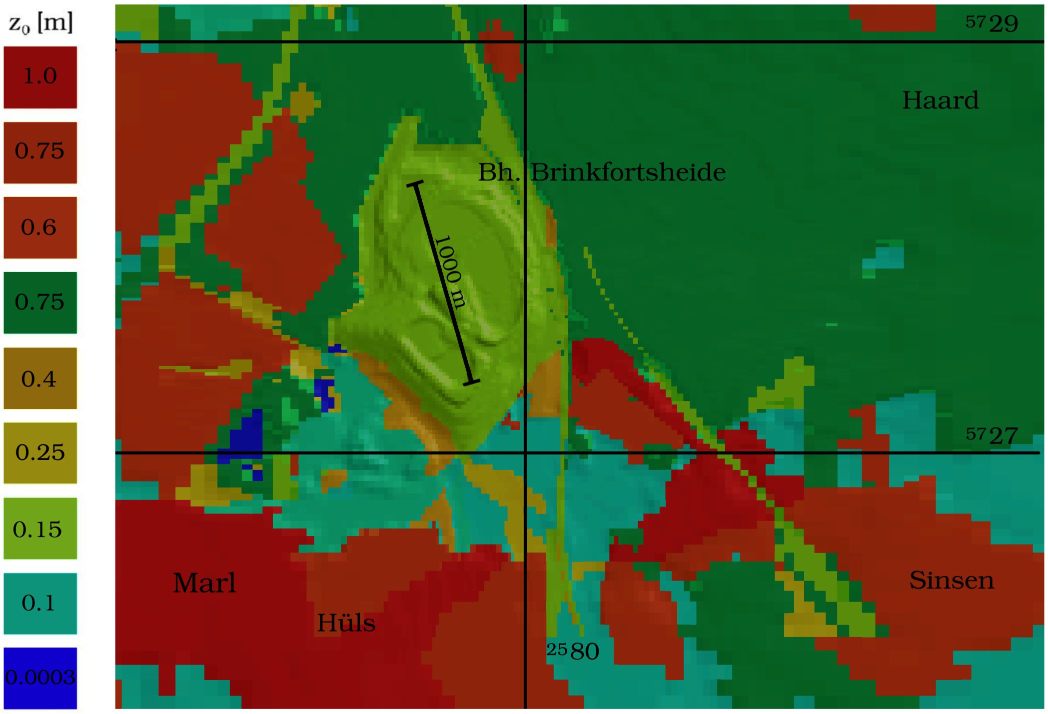

Abbildung 4: Topographie von Halde Brinkfortsheide und Umgebung im Rechenmodell (Detailausschnitt)

Für die Modellierung der zweidimensionalen Überströmung des Dammes konnte im Bereich des Hindernisses eine Gitterauflösung von etwa 5 m realisiert werden, siehe Detailausschnitt in Abbildung 3. Für die beiden dreidimensionalen Hindernisse »Tafelberg« und »Brinkfortsheide« lag der horizontale Maschenabstand im Hindernisbereich allerdings mit knapp über 10 m bzw. etwa 15 m deutlich darüber. (Dieser Aspekt ist im Hinblick auf die Genauigkeit in der Bestimmung der Flächenleistung Gegenstand weiterer Erörterungen, vgl. Abschnitt 6.1.)

3.4 Die Windfelder

Das Verhalten der normierten Flächenleistung am Hindernis erklärt sich aus der Struktur der Windfelder. Eine gewisse Vorstellung vom Strömungsmuster an Bergehalden sollen die Abbildungen 5 und 6 vermitteln.

Abbildung 5 zeigt die Vertikalprofile der horizontalen Geschwindigkeitskomponente bei Überströmung des Dammes. Diese machen den Speedup über dem Hindernis deutlich. Die leichte Rotorströmung mit einer Ausdehnung von wenigen Dekametern in Strömungsrichtung und kaum über 10 m Höhe am leeseitigen Haldenfuß lässt sich hier nur erahnen.

In Abbildung 6 werden die Isolinien des normierten[21] Geschwindigkeitsbetrages für die Überströmung des »Tafelberges« dargestellt. Deren Drängung über den Pla-

[21]Die Normierung erfolgt über die Bodenschubspannungsgeschwindigkeit der ungestörten Anströmung.

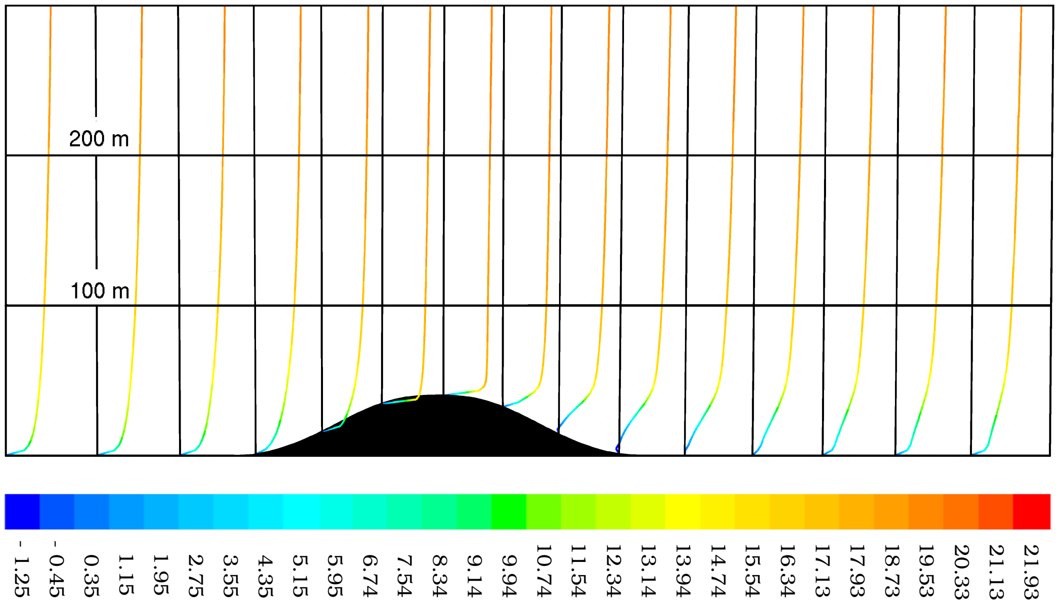

Abbildung 5: Vertikalprofile der normierten Horizontalgeschwindigkeit v_{hor}/u^{*}, $z_0^{\mathrm{eff}} = 0.1\,\mathrm{m}$

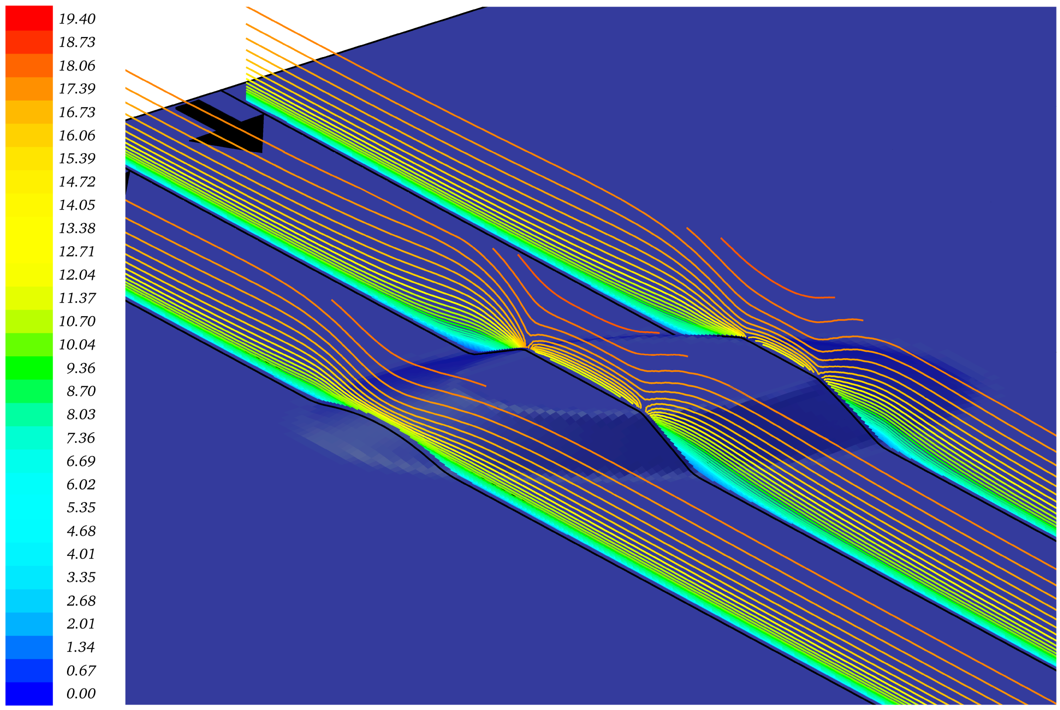

Abbildung 6: Isolinien des normierten Geschwindigkeitsbetrages $\|\vec{v}\|/u^{*}$, $z_0^{\mathrm{eff}} = 0.25\,\mathrm{m}$

teauflächen macht die Attraktivität von Haldenstandorten für die Windkraftnutzung anschaulich. Die ganze Komplexität des Haldenwindfeldes offenbart sich so allerdings nicht. Mit der Darstellung des Geschwindigkeitsbetrages wird der Anteil der Vertikalkomponenten und horizontalen Querkomponenten eher verschleiert. Auch bleiben die am »Tafelberg« (wie auch an »Brinkfortsheide«) ausgeprägten Strömungsablösungen hier unsichtbar.

4 Die normierte Flächenleistung unter inhomogenen Bedingungen

In Abschnitt 4 soll gezeigt werden, wie sich der Einfluss orographischer und topographischer Strukturen auf die relative Flächenleistung überträgt. Der Effekt extremer orographischer Bedingungen wird in den Abschnitten 4.3 und 4.4 am Beispiel der im letzten Abschnitt vorgestellten Bergehalden untersucht. Die Auswirkungen allgemeiner topographischer Strukturen auf die Flächenleistung ist Gegenstand von Abschnitt 4.5. Die Ergebnisse werden in Abschnitt 4.6 noch einmal zusammengefasst. Vorweg wird das Konzept zur Bestimmung der Flächenleistung zu gegebenem Windfeld erklärt (Abschnitt 4.1) und der Einfluss klimatologischer Randbedingungen diskutiert (Abschnitt 4.2).

4.1 Berechnung und Darstellung der normierten Flächenleistung

Für die numerisch berechneten Windfelder $\vec{v}$ wurde mit Hilfe zusätzlicher Software die räumliche Verteilung der normierten Flächenleistung $[P/P_{\text{naiv}}] = [P/P_{\text{naiv}}](R; \vec{v})$ ermittelt: Jeder Raumpunkt im Modellbereich wird als potentielle Rotornabe interpretiert. Die Ausrichtung der zugehörigen Rotorfläche wird unter folgenden Voraussetzungen aus dem lokalen Windfeld abgeleitet: Für die Rotorachse wird durchweg ein Neigungswinkel von 0 Grad angesetzt. Darüber hinaus wird eine stets korrekt arbeitende Richtungsnachführung postuliert. Die Ausrichtung der Konverterfläche wird somit allein durch die Richtung der horizontalen Geschwindigkeitskomponente im Bereich der Rotornabe bestimmt. Die Flächenleistung P ergibt sich dann entsprechend Definitionsgleichung (1) indem die Kuben der flächennormalen Komponenten des Windfeldes über die virtuelle Rotorfläche integriert werden.[22] Für diese Berechnungen kann der Rotorradius R beliebig vorgegeben werden.

Die Ergebnisse werden nachfolgend in den Abbildungen 7 bis 13 präsentiert. Bei allen Darstellungen ist zu beachten, dass P/P_{naiv} als Funktion der angesetzten Rotorblattlänge R erst für Nabenhöhen deutlich über der Blattlänge sinnvoll ist.

[22]Für alle realistischen Rotorradien, Nabenhöhen und atmosphärische Bedingungen gilt in sehr guter Näherung

$$P = \frac{1}{2} \int\limits_{F_R(z_{\mathrm{N}}, R)} \rho \, (\vec{v} \cdot \vec{n_R})^3 \, dF \cong \frac{1}{2} \, \rho(z_{\mathrm{N}}) \int\limits_{F_R(z_{\mathrm{N}}, R)} (\vec{v} \cdot \vec{n_R})^3 \, dF,$$

so dass P/P_{naiv} ohne relevanten Fehler unabhängig von der Luftdichte ρ betrachtet werden kann.

Allen Abbildungen wird eine einheitliche Skalierung zu Grunde gelegt, die so auch den Vergleich mit dem homogenen Fall (Abbildung 2) zulässt. Betrachtet man dazu beispielsweise die Flächenleistungswerte in den Abbildungen dieses Abschnitts im noch ungestörten Anströmungsbereich und die entsprechenden Werte in Abbildung 2 für gleiche Nabenhöhe, gleichen Rotorradius und gleiches Geschwindigkeitsprofil, ergibt sich ein stimmiges Bild.[23]

4.2 Einfluss klimatologischer Randbedingungen

Für das jeweils betrachtete Hindernis ist die Verteilung von P/P_{naiv} als Funktion des Windfeldes $\vec{v}$ abhängig von den klimatologischen Parametern, die die Hindernisanströmung definieren:

Einfluss der atmosphärischen Schichtung Grundsätzlich wird das Strömungsmuster in der atmosphärischen Grenzschicht – und damit erst recht am Hindernis mit dem Auftreten zusätzlicher Phänomene – durch den Schichtungszustand mit bestimmt. Soll also das gesamte Spektrum atmosphärischer Bedingungen Berücksichtigung finden, muss die »Haldenströmung« strenggenommen in Abhängigkeit der Froude-Zahlen erklärt werden.

Auf der anderen Seite gilt der Schichtungseinfluss bei Überströmung kleiner Hindernisse als vernachlässigbar.[24] Beispielsweise sind etwa nach [12] bei Hindernissen vom Haldentyp für alle realistischen bzw. statistisch relevanten atmosphärischen Schichtungszustände keine wesentlichen Unterschiede im Strömungsmuster zu erwarten.[25]

Es ist daher plausibel eine erste Untersuchung der Flächenleistung mit Blick auf die Windkraftnutzung (Bedingungen, die das statistische Mittel repräsentieren stehen im Vordergrund – windschwache Bedingungen, die mit Schichtungsextremen korreliert sind, sind kaum relevant) auf die Betrachtung neutraler atmosphärischer Schichtungszustände zu beschränken.

---

[23] Bei genauerer Betrachtung findet man in einzelnen Darstellungen leichte Abweichungen, so etwa in Abbildung 8 für $R = 10\,\text{m}$. Allerdings kann eine perfekte Übereinstimmung der hier am luvseitigen Rand genommenen Flächenleistungswerte mit den Werten aus Abschnitt 2 (exakte Berechnung) auch gar nicht erwartet werden: Erstens zeigen alle Abbildungen 7 bis 13 nur Detailausschnitte, so dass hier am luvseitigen Rand hindernisinduzierte Störungen nicht vollständig auszuschließen sind. Zweitens muss der grundlegend andere numerische Ansatz zur Berechnung der Flächenleistung berücksichtigt werden: Die Integration des Windfeldes über die einzelne Rotorfläche muss hier auf die Geschwindigkeitswerte an den Knotenpunkten und Zellzentren des Rechengitters zurückgreifen. Die Genauigkeit der Bestimmung der Flächenleistungswerte wird damit eine Funktion der Gitterfeinheit: minimaler Fehler im Bereich hoher Gitterauflösung, also in Bodennähe und im Hindernisbereich (s. Abbildung 3). Dieser Diskretisierungsfehler liegt (für den hier mit Abbildung 2 nur vergleichbaren Anströmungsbereich) in allen Fällen bei wenigen Promille und bedeutet in den Darstellungen 7 bis 13 eine Abweichung um höchstens eine Farbstufe.

[24] Das ergibt sich zum einen aus einer entsprechenden Froude-Zahl-abhängigen Charakterisierung, deckt sich aber auch mit Beobachtungen bzw. Messungen im Windkanal, vgl. [1].

[25] In [12] wird die Überströmung der Nordseeinsel Helgoland (als Hindernis in Form und Dimension mit Bergehalden vom Typ »Tafelberg« vergleichbar) auch im Hinblick auf eine mögliche Schichtungsabhängigkeit diskutiert. Danach kann angenommen werden, dass sich das Strömungsmuster für stabile Schichtungslagen (für den Bereich realistischer Froude-Zahlen bei nicht ganz windschwachen Bedingungen) kaum von dem bei neutraler Schichtung unterscheidet.

Einfluss der Anströmungsgeschwindigkeit Für den Einfluss der Anströmungsgeschwindigkeit auf das Strömungsmuster am Hindernis kann dann unter der Voraussetzung quasineutraler Bedingungen in erster Näherung »Reynolds-Ähnlichkeit« angenommen werden. Damit gilt hier, wie auch schon im homogenen Fall (Abschnitt 2.3), dass von der Anströmungsgeschwindigkeit kein relevanter Einfluss auf P/P_{naiv} ausgeht.

Einfluss der Oberflächenrauigkeit im Fetch Unter homogenen Bedingungen hatte sich nur ein sehr schwacher Einfluss der Bodenrauigkeit über das Geschwindigkeitsprofil auf die normierte Flächenleistung gezeigt (Abschnitt 2.3).

Am Hindernis hat das anströmende Vertikalprofil einen »gewissen« Effekt auf das Strömungsmuster, wenngleich das Windfeld hier in erster Linie durch die Hindernisgeometrie bestimmt wird.[26] Diesen Einfluss der Oberflächenrauigkeit im Fetch z_0^{eff} auf die normierte Flächenleistung macht der Vergleich der drei Graphen in Abbildung 7 deutlich (zur genaueren Beschreibung von Abbildung 7 s. u.). Die Unterschiede in P/P_{naiv} liegen beispielsweise in einer Höhe von 75 m über Grund in einer Größenordnung von fast durchweg unter einem Prozent – für 100 m über Grund bei maximal 0.5 Prozent. Sie liegen damit klar über der Differenz im homogenen Fall (Graphen I bis III in Abbildung 2, etwa 0.5 bzw. 0.25 Prozent). Diese Effekte sind damit aber bezogen auf die Themenstellung eher von untergeordneter Bedeutung (wie im folgenden noch deutlich werden wird).

Die hier für die zweidimensionale Dammüberströmung für eine Rotorlänge von $R = 40$ m gefundene relativ schwache Abhängigkeit der Flächenleistung von der Rauigkeit im Fetch konnte auch für andere Haldentypen und Rotorblattlängen gezeigt werden (hier nicht dargestellt). Es bedeutet also keine wesentliche Einschränkung, wenn die Anströmungsprofile bei den nachfolgend diskutierten Fällen durchweg über in etwa mittlere Rauigkeiten z_0^{eff} gebildet werden.

Fazit Selbst wenn für die nachfolgende Analyse der Flächenleistung recht spezielle atmosphärische Randbedingungen zu Grunde gelegt werden, darf dennoch angenommen werden, dass die ermittelten Verteilungen von P/P_{naiv} für ein größeres Spektrum atmosphärischer Zustände repräsentativ sind (jeweils bezogen auf eine feste Anströmungsrichtung). Dementsprechend kann darüber spekuliert werden, in wie weit die berechneten Verteilungen für den konkreten Standort auch noch im statistischen Mittel Gültigkeit besitzen, vgl. dazu auch Abschnitt 6.2.

4.3 Die Flächenleistung am zweidimensionalen Hindernis

Der Einfluss orographischer Strukturen auf die relative Flächenleistung wird in diesem und im folgenden Unterabschnitt am Beispiel der Hindernisüberströmungen erklärt. Es wird gezeigt wie sich ausgehend von den homogenen Bedingungen der Anströmung Störungen im Windfeld im Verhältnis von P zu P_{naiv} niederschlagen. Dabei

[26] Stark vereinfachend! – Wie in weiteren Untersuchungen gezeigt werden konnte, spielt bei Hindernissen vom Haldentyp die Oberflächenrauigkeit im Haldenbereich (in Verbindung mit dem Auftreten von Strömungsablösungen) häufig eine weit wichtigere Rolle für das Strömungsmuster als die Rauigkeit im Fetch.

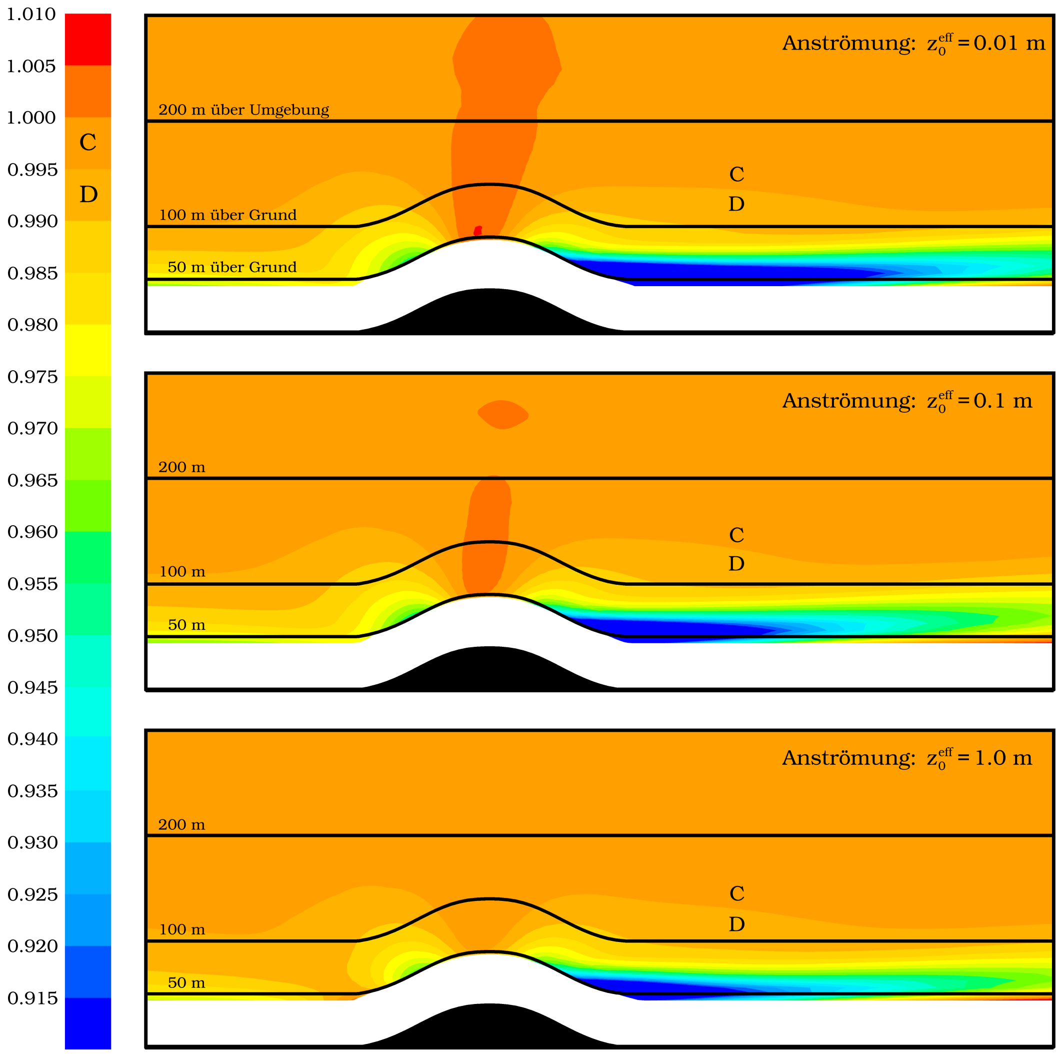

Abbildung 7: Einfluss der Oberflächenrauigkeit z_0^{eff} über das Anströmungsprofil auf die normierte Flächenleistung P/P_{naiv} für Rotorradius $R = 40\,\text{m}$ (Detailausschnitt)

lassen sich wesentliche Aspekte oder Phänomene bereits am zweidimensionalen Fall verdeutlichen (Abbildungen 7 und 8).

Besonders gut nachvollziehbar ist das Verhalten von P/P_{naiv} im Leebereich von Hindernissen. Liegt die Rotornabe im »Windschatten«, während der obere Teil der Rotorfläche »frei« angeströmt wird, wird die Flächenleistung über die Nabengeschwindigkeit (bzw. P_{naiv}) systematisch unterschätzt ($P/P_{\text{naiv}} > 1.0$). Liegt die Nabe knapp über der Nachlaufzone wird die Flächenleistung überschätzt ($P/P_{\text{naiv}} < 1.0$).

Treten darüber hinaus am Hindernis Strömungsablösungen mit einer vertikalen Ausdehnung in der Größenordnung der Rotorfläche auf, kann P/P_{naiv} hier (im Fall $P_{\text{naiv}} \approx 0$) nahezu beliebige Werte (auch negative, s. Gleichung (1)) annehmen. Die ganze Bandbreite wird von der hier zu Grunde liegenden Skalierung ($0.91 < P/P_{\text{naiv}} < 1.01$) allerdings nicht erfasst. Eine genauere Analyse des von Strömungsablösungen betroffenen Nachlaufbereiches ist mit Blick auf die Windkraftnutzung vielleicht auch nicht notwendig, da eine Anlagenplatzierung hier aufgrund der reduzierten mittleren Geschwindigkeiten ohnehin auszuschließen ist.

In den übrigen Bereichen kann das Verhalten von P/P_{naiv} nur bei genauer Kenntnis der lokalen Eigenschaften des Geschwindigkeitsfeldes erklärt werden. Gemäß Definitionsgleichung (1) und der angenommenen strikt vertikalen Ausrichtung der Rotorflächen (s. Abschnitt 4.1) müssen dazu die flächennormalen Anteile der horizontalen Geschwindigkeitskomponenten betrachtet werden. Für den hier diskutierten zweidimensionalen Fall lässt sich die Flächenleistung also bereits vollständig aus den Vertikalprofilen von Abbildung 5 ableiten.

Einfluss der Rotorblattlänge auf die normierte Flächenleistung Der Aufschwung der Windkraftnutzung ist gekennzeichnet von einer Tendenz zu immer größeren Windkonvertern; und es ist vielleicht die interessanteste Frage in dieser Untersuchung, wie sich die zunehmende Rotorgröße im Hinblick auf die Repräsentativität der Nabengeschwindigkeit auswirkt.

Abbildung 8 zeigt am Beispiel der Dammüberströmung den Effekt der Blattlänge auf P/P_{naiv} parallel zur historischen und zukünftigen Entwicklung. Erwartungsgemäß werden die Abweichungen zwischen der exakten Flächenleistung P und der Approximation über die Nabengeschwindigkeit P_{naiv} bei gleicher Nabenhöhe für große Rotoren maximal. Betrachtet man hier beispielsweise einen festen Punkt (als Rotornabe), zeigt sich bei Variation der Rotorblattlänge eine Spanne für P/P_{naiv} von z. T. über 8 Prozentpunkten. (An einigen Stellen im Nachlaufbereich ist diese Bandbreite auch noch deutlich größer, was durch die hier gewählte Skala allerdings nicht wiedergegeben wird, s. o.)

Eine solche Interpretation von Abbildung 8 wäre allerdings bezogen auf die Windkraftnutzung bzw. im Hinblick auf reale Anlagentypen wenig sinnvoll. Eine Anlagenplatzierung etwa am Haldenfuß verbietet sich, und die Nabenhöhe muss stets in Relation zum Rotorradius gesehen werden. Nimmt man also beispielsweise einen Anlagenstandort zumindest in halber Hindernishöhe (oder in sehr großer Entfernung vom Hindernis) an und betrachtet den Einfluss des Rotorradius wie auch schon in Abschnitt 2.2 unter der Nebenbedingung $z_{\text{N}} \gtrsim 2R$, so macht Abbildung 8 folgendes deutlich: Die Flächenleistung wird jetzt über P_{naiv} für alle Rotorblattlängen um kaum mehr als 3 Prozentpunkte überschätzt.

Die Unterschiede bei einer Variation der Blattlänge um 20 m (bei festem Standort und fester Nabenhöhe) liegen nun nur noch im Promillebereich. Auch für die kommende Anlagengeneration mit Rotorradien um 50 m sind also in diesem Zusammenhang keine entscheidenden Änderungen zu erwarten.

4.4 Die Flächenleistung an dreidimensionalen Hindernissen

Anhand der beiden dreidimensionalen Strömungshindernisse »Tafelberg« und »Brinkfortsheide« soll gezeigt werden, mit welcher Wirkung auf die Flächenleistung zu rechnen ist, wenn im Strömungsbild zusätzlich zu Horizontal- und Vertikalkomponenten Querkomponenten auftreten. Die Abbildungen 7 bis 13 geben zusammengenommen eine räumliche Vorstellung vom Effekt auf P/P_{naiv}. Speziell Abbildung 9 macht deut-

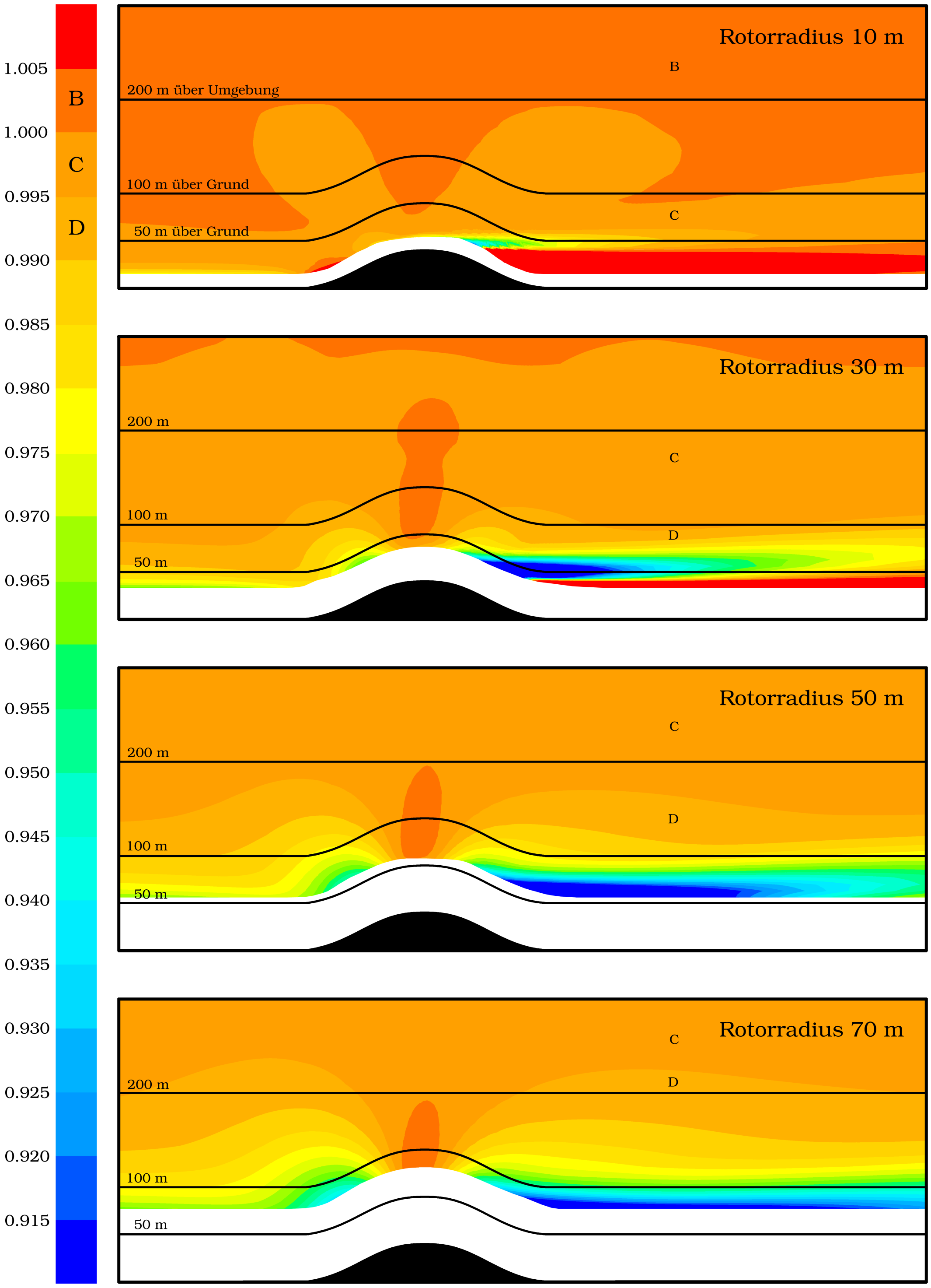

Abbildung 8: Einfluss des Rotorradius auf die normierte Flächenleistung P/P_{naiv} bei Überströmung eines etwa dammartigen Hindernisses ($z_0^{\text{eff}} = 0.1$ m, Detailausschnitt)

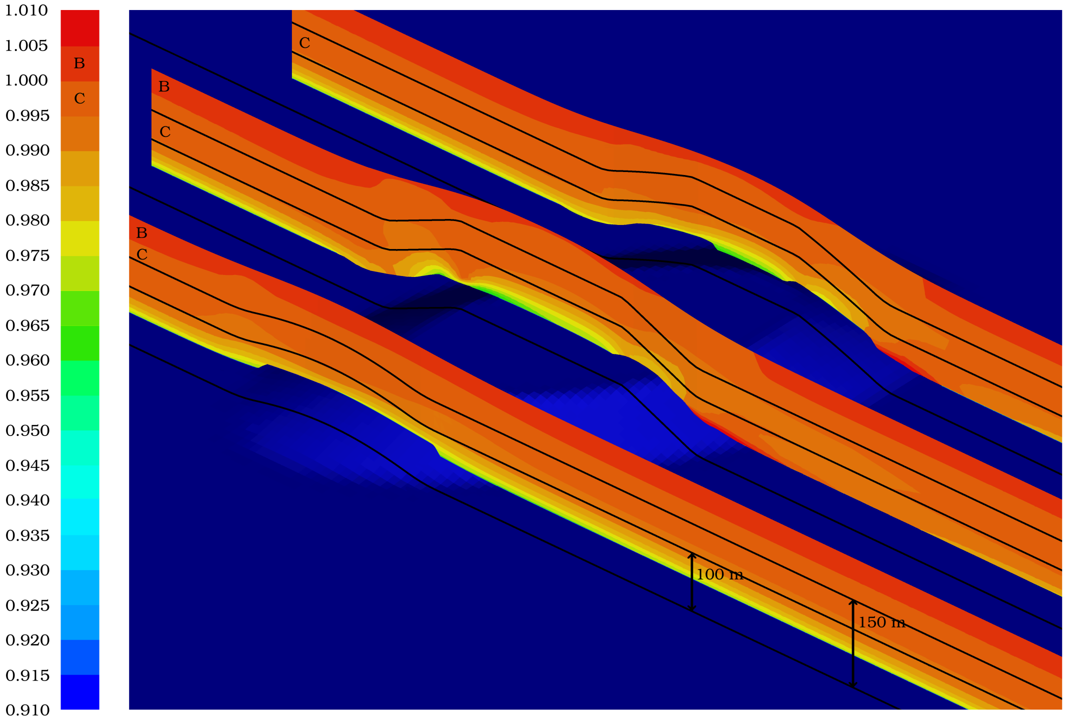

Abbildung 9: Normierte Flächenleistung P/P_{naiv} am »Tafelberg« (Detailausschnitt) für Rotorradius $R = 40\,\mathrm{m}$, Anströmung wie in Abbildung 6 ($z_0^{\mathrm{eff}} = 0.25\,\mathrm{m}$)

lich, bis in welche Höhen über den verschiedenen Bereichen des Hindernisses Auswirkungen auf die relative Flächenleistung spürbar sind.

Die hier in unterschiedlichen (jeweils in Anströmungsrichtung ausgerichteten) Ebenen dargestellte Flächenleistung erlaubt zudem den direkten Vergleich mit dem zweidimensionalen Fall: Offenbar sind weder grundsätzliche qualitative noch erhebliche quantitative Unterschiede zu verzeichnen.[27] Die zusätzlichen Inhomogenitäten der Strömung am dreidimensionalen Hindernis haben also keinen ersichtlichen leistungsrelevanten Effekt. Offenbar treten selbst bei einer großen Rotorfläche von 80 m Durchmesser an keiner Stelle im (dreidimensionalen) Haldenwindfeld nennenswerte horizontale Richtungsdivergenzen auf. Solche hindernisinduzierten Störungen im mittleren Windfeld sind also insgesamt zu schwach bzw. sie reichen bei den hier betrachteten Strömungssituationen nicht in relevantem Ausmaß bis zu den Konverterflächen hinauf. Dies würde die häufig gemachte Beobachtung bestätigen, nach der kleinere Hindernisse in der atmosphärischen Grenzschicht quantitativ *über*strömt werden.

Mit Blick auf die Windkraftnutzung ist es vielleicht auch interessant, von fester Nabenhöhe und festem Rotorradius auszugehen, um so für den konkreten Anlagentyp die Auswirkungen einer Standortwahl auf die Flächenleistung zu veranschaulichen: Abbildungen 10 bis 13.

[27] Natürlich müsste ein korrekter Vergleich die Verhältnisse am gleichen Hindernisquerschnitt betrachten.

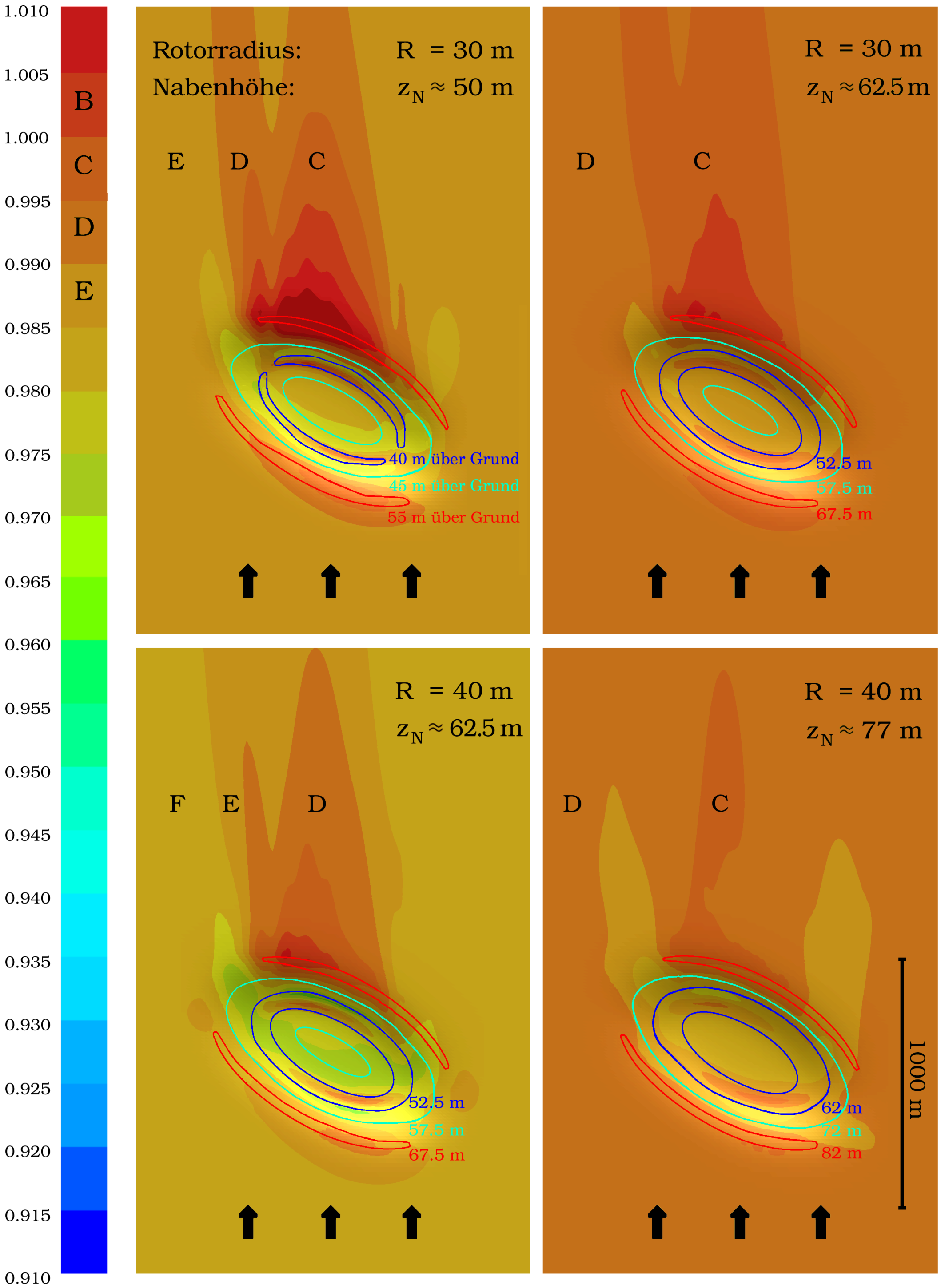

Abbildung 10: Normierte Flächenleistung P/P_{naiv} am »Tafelberg« (Detailausschnitt) für verschiedene Rotorradien und Nabenhöhen (Anströmung $z_0^{\mathrm{eff}} = 0.25\,\mathrm{m}$)

In Graph I in Abbildung 10 ist die normierte Flächenleistung für $R = 30\,\mathrm{m}$ am »Tafelberg« auf einer festen Knotenebene des Rechengitters in einer Höhe von

$z_N \approx 50$ m über Grund dargestellt. Lediglich im unmittelbaren Hindernisbereich weicht die Höhe der Mannigfaltigkeit durch die hier auftretende Verzerrung des körperangepassten Gitters von diesem mittleren Wert ab. Die eingezeichneten »Höhenlinien« erklären die vertikalen Abweichungen und machen zugleich die Lage des Hindernisses deutlich. Entsprechend sind die Graphen II bis IV zu verstehen. (Die Rotorradien und mittleren Nabenhöhen zu den dargestellten Verteilungen entnimmt man den Abbildungen.) Der »Tafelberg« induziert beispielsweise für $R = 30$ m in einer Höhe von etwa 50 m (bzw. etwa 62.5 m) über Grund eine Bandbreite der normierten Flächenleistung von über 4.5 (bzw. etwa 3.0) Prozent, s. Graph I (bzw. Graph II). Für $R = 40$ m und die mittleren Nabenhöhen von etwa 62.5 m bzw. etwa 77 m liegt diese bei 4.0 bzw. 2.5 Prozent (Graphen III und IV).

Diese Zahlen sowie der Vergleich der vier Graphen in Abbildung 10 insgesamt verdeutlichen hier noch einmal für den dreidimensionalen Fall das Zusammenspiel der beiden Parameter Rotorlänge und Nabenhöhe im Hinblick auf die Flächenleistung.

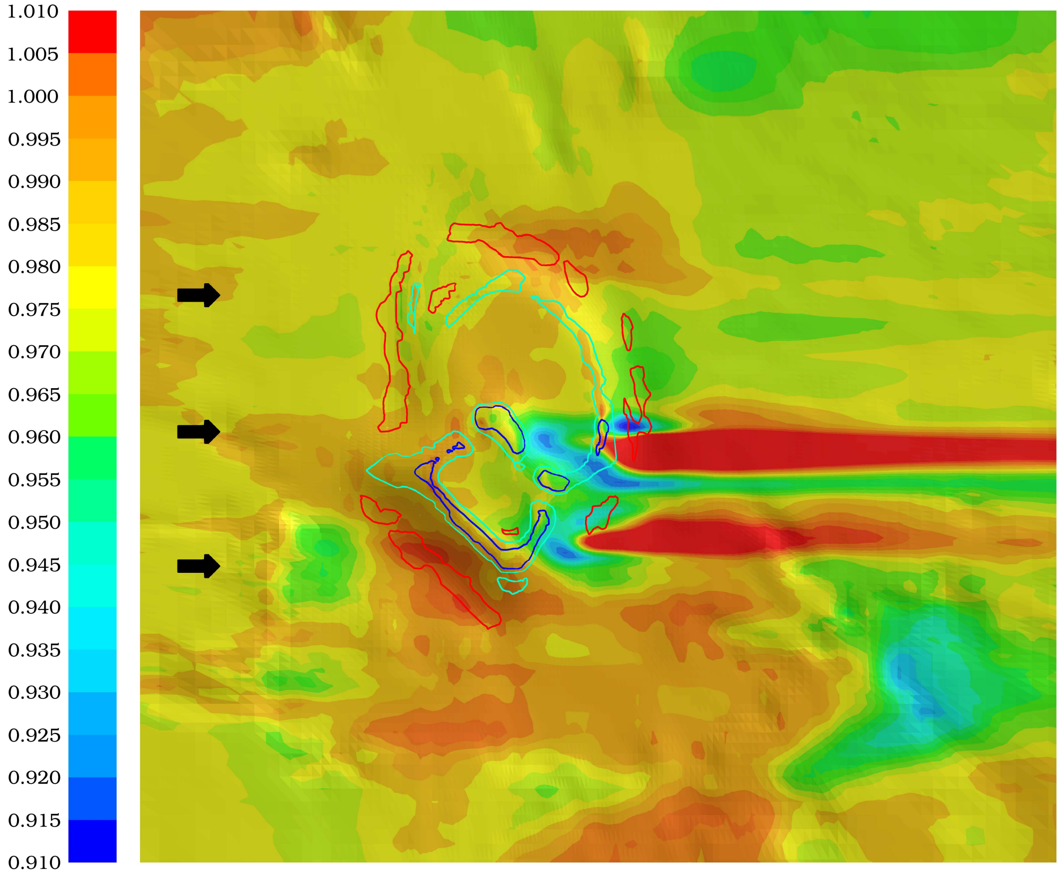

Abbildung 11: Normierte Flächenleistung P/P_{naiv} im Bereich der Bergehalde Brinkfortsheide (Detailausschnitt) für Rotorradius $R = 40$ m in etwa 58 m über Grund. Zu den »Höhenlinien« (blau 48 m, grün 53 m, rot 63 m jeweils über Grund) s. Text.

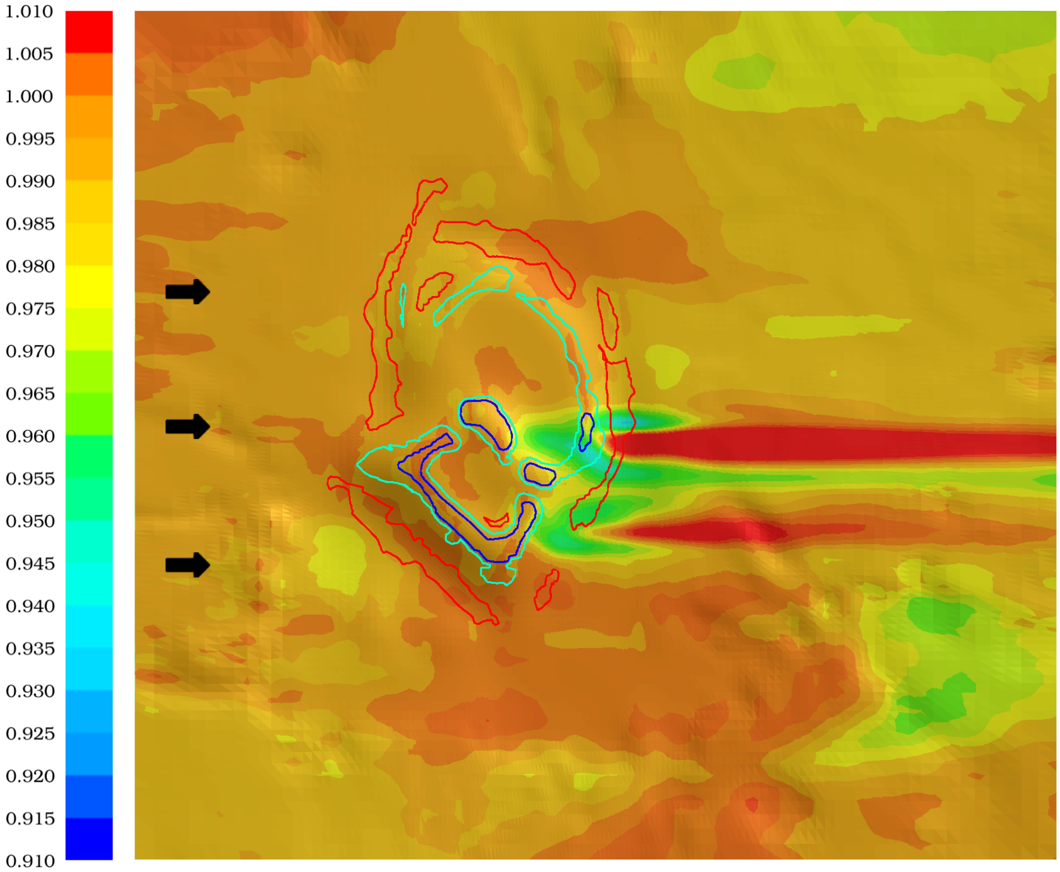

Abbildung 12: Normierte Flächenleistung P/P_{naiv} im Bereich der Bergehalde Brinkfortsheide (Detailausschnitt) für Rotorradius $R = 40$ m in etwa 71 m über Grund. Zu den »Höhenlinien« (blau 61 m, grün 66 m, rot 76 m jeweils über Grund) s. Text.

4.5 Die Verteilung von P/P_{naiv} bei strukturiertem Terrain

Es ist sicher plausibel anzunehmen, dass die an großen Halden gefundenen Effekte auf die normierte Flächenleistung an den meisten Binnenlandstandorten (mit in der Regel deutlich weniger komplexen Strömungsmustern) schwächer ausfallen werden. Um diese Hypothese zu überprüfen, wurde P/P_{naiv} für den realen Haldenstandort Brinkfortsheide bei Marl (Abschnitt 3.1) berechnet. Die Ergebnisse werden in den Abbildungen 11 bis 13 jeweils für feste Nabenhöhe und festen Rotorradius also wie in Abbildung 10 dargestellt. Dadurch lassen sich die Verhältnisse im Haldenbereich und für das vom Hindernis nicht direkt beeinflusste weitere Umfeld[28] unmittelbar miteinander vergleichen:

Wie zu erwarten gehen extremale Werte von P/P_{naiv} auf den Einfluss des Hindernisses zurück. Das eigentlich bemerkenswerte der Ergebnisse ist aber, welche enorme Wirkung auf die relative Flächenleistung in typischen Nabenhöhen auch noch abseits des Hindernisses bei nur noch sehr schwach strukturierter Orographie zu finden ist.[29]

[28] orographisch schwach strukturiertes Terrain mit Rauigkeitswechseln, vgl. Abbildung 4

[29] Um in etwa abzuschätzen, welche Bereiche hier vom Hindernis nicht mehr beeinflusst sind,

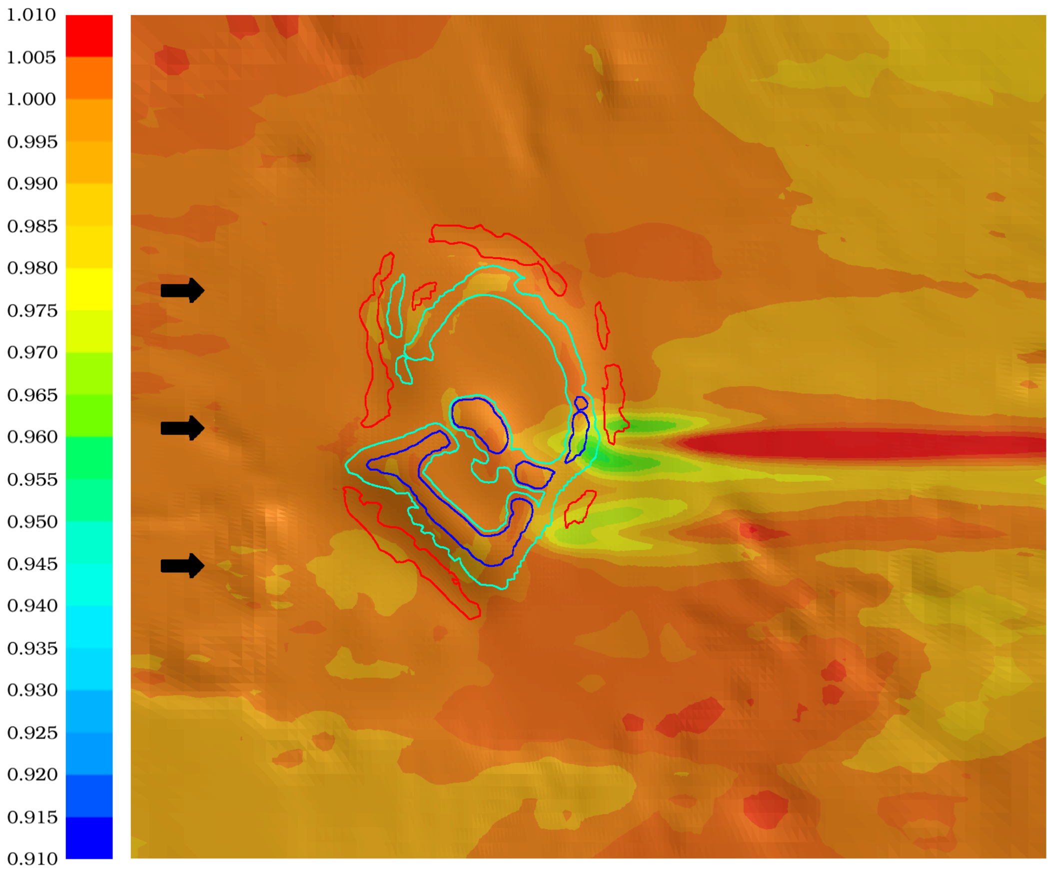

Abbildung 13: Normierte Flächenleistung P/P_{naiv} im Bereich der Bergehalde Brinkfortsheide (Detailausschnitt) für Rotorradius $R = 40$ m in etwa 87.5 m über Grund. Zu den »Höhenlinien« (blau 77.5 m, grün 82.5 m, rot 92.5 m jeweils ü. G.) s. Text.

Hier besitzt P/P_{naiv} in den Nabenhöhen $z_{\text{N}} = 58$ m, 71 m bzw. 87.5 m für einen Rotorradius von $R = 40$ m eine Bandbreite von etwa 4.5, 3.5 und 2.5 Prozentpunkten. Die Spanne nimmt also wie auch schon in den vorangegangenen Beispielen mit der Nabenhöhe recht rasch ab.

4.6 Zusammenfassung

Für die betrachteten Strömungssituationen zeigt die normierte Flächenleistung P/P_{naiv} insgesamt ein stimmiges Bild, das darüber hinaus im Anströmungsbereich korrekt an den homogenen Fall (Abschnitt 2) anschließt. Auch das Verhalten für sehr große Nabenhöhen ist plausibel: Bei den hier betrachteten Hindernissen oder topographischen Strukturen verschwinden die induzierten Einflüsse auf P/P_{naiv} je nach Rotordurchmesser oberhalb von 100 – 150 m über Grund fast vollständig ($P/P_{\text{naiv}} \approx 0.99 - 1.00$).

Extremale Werte von P/P_{naiv} findet man in Bodennähe im unmittelbaren Hindernisbereich. Vor allem im Nachlaufgebiet insbesondere in Verbindung mit dem

vergleiche man mit Abbildung 10.

Auftreten von Strömungsablösungen variiert P/P_{naiv} hier auf engstem Raum extrem stark.

Einer Interpretation der Verteilung von P/P_{naiv} im Hinblick auf die Windkraftnutzung müssen realistische Nabenhöhen (in Relation zum Rotorradius, etwa $z_{\mathrm{N}} \gtrsim 2R$) und »sinnvolle« Anlagenstandorte, s. o., zu Grunde gelegt werden. Für die hier betrachteten Strömungssituationen ergibt sich dann folgendes Bild: Die Flächenleistung wird über P_{naiv} nur an wenigen exponierten Stellen des Haldenwindfeldes unterschätzt, wobei die Abweichungen dann kaum 0.5 Prozent ausmachen. Typischerweise wird die Flächenleistung P durch die Schätzgröße P_{naiv} im inhomogenen Windfeld überschätzt. Diese Tendenz ist völlig plausibel, da die Strömung nun anders als unter homogenen Bedingungen nicht mehr in der gesamten Konverterfläche flächennormal gleichgerichtet ist. Hier ist vor allem die Größenordnung dieses Effektes interessant: Für realistische Anlagentypen ($z_{\mathrm{N}} \gtrsim 2R$) und »sinnvolle« Anlagenstandorte kann man von Werten bis etwa 3.5 Prozent ausgehen. Darüber hinaus deuten etliche Ergebnisse auch aus weiteren Untersuchungen darauf hin, dass bereits über orographisch kaum strukturiertem Terrain Werte um 2.5 Prozent möglich sind.

5 Interpretationen

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Windleistung bezogen auf Konverterflächen für unterschiedliche Strömungssituationen analysiert. Zu diesem Zweck wurde abgesehen von Abschnitt 2.1 (hier wurden absolute Werte der Flächenleistung präsentiert) stets der Quotient P durch P_{naiv} betrachtet. Indirekt wird durch P/P_{naiv} das Verhältnis der Flächenleistung zur Nabengeschwindigkeit $v_{\mathrm{N}} = \sqrt[3]{2\,\rho_{\mathrm{N}}\,P_{\mathrm{naiv}}}$ beschrieben. Das erlaubt die Resultate der Abschnitte 2 und 4 im Hinblick auf die Eingangsfrage, die Repräsentativität der Nabengeschwindigkeit für die Flächenleistung zu interpretieren (Abschnitt 5.1). In Abschnitt 5.2 werden diese Ergebnisse auf die Beziehung zwischen Nabengeschwindigkeit und abgegebener Konverterleistung übertragen. Dadurch lassen sich einige Phänomene im Leistungsverhalten von Windkraftanlagen erklären und mögliche Fehlerquellen bei der Charakterisierung der Anlagenleistung über die Leistungskennlinie identifizieren.

5.1 Die Repräsentativität der Nabengeschwindigkeit für die Windflächenleistung

Ein Interpretationsansatz für die in unterschiedlichen Strömungssituationen gefundenen Zahlenwerte bzw. Verteilungen von P/P_{naiv} ergibt sich über den Vergleich des inhomogenen Falls mit dem homogenen. (Letzterer definiert ja für $z_0 = 0.1$ m den Referenzstandort, auf den Angaben zur Konverterleistung typischerweise bezogen werden.)

Unter homogenen Strömungsbedingungen wird die exakte Flächenleistung P durch die Approximation über die Nabengeschwindigkeit (P_{naiv}) durchweg (für alle Rauigkeiten und $z_{\mathrm{N}} \approx 2R$) um etwa 1 Prozent überschätzt, s. Abschnitt 2.2. Wie im letzten Abschnitt gezeigt wurde, liegt diese Differenz in strukturiertem Terrain, sinnvolle Anlagenstandorte und Nabenhöhen vorausgesetzt, eher um bei 2.5 bis 3.5 Prozent. Die tatsächliche Windleistung in der Rotorfläche wird hier also auf Basis der Nabengeschwindigkeit um bis zu 2.5 Prozentpunkte zu hoch eingeschätzt. Diese Abschätzung gilt unter der Voraussetzung sinnvoller Nabenhöhen ($z_{\mathrm{N}} \approx 2R$) auch noch für die kommende Konverterklasse mit Rotorblattlängen um 50 m, s. auch [8]. Die Unterschiede zur vorigen bzw. aktuellen Anlagengeneration mit Rotorradien von 30 bzw. 40 m liegen für P/P_{naiv} im Bereich weniger Promille, in jedem Fall aber deutlich unter einem Prozent. Sie sind also vernachlässigbar.

Fazit Sofern man bereit ist, Fehler von bis zu 2.5 Prozentpunkten zu tolerieren, kann die zentrale Fragestellung dieser Arbeit folgendermaßen beantwortet werden: Die Nabengeschwindigkeit repräsentiert die »Leistung des Windes in der Konverterfläche«[30] noch so gut, dass sie als einzige Information über das mittlere Geschwindigkeitsfeld zur Leistungsschätzung ausreicht. Dies gilt auch noch für große Rotorradien, und auch noch bei inhomogener Strömung in komplexem Terrain.

Darüber hinaus deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Relation zwischen Nabengeschwindigkeit und Flächenleistung generell durch eine gewisse Unschärfe gekennzeichnet ist, die bereits bei schwach bis mäßig strukturiertem Terrain 3 bis 4 Prozentpunkte[31] betragen kann. Diese Abschätzung gilt, wie auch weitere hier nicht dargestellte Rechnungen belegen, für $z_{\mathrm{N}} \approx 2R$ weitgehend unabhängig vom Rotordurchmesser Anlage.

5.2 Interpretation der Ergebnisse im Hinblick auf das Leistungsverhalten von Windkraftanlagen

Überträgt sich das soeben skizzierte Verhältnis der Nabengeschwindigkeit zur Windflächenleistung entsprechend auf die Beziehung zwischen Nabengeschwindigkeit und Konverterleistung, lässt dies weitere Interpretationen hinsichtlich der Anlagenleistung zu:

Das Konzept der Leistungskennlinie muss (auch für größere Konverter) nicht grundsätzlich in Frage gestellt werden. Diese Bewertung wird plausibel, wenn man sich generelle Fehler von Ertragsschätzungen vor Augen führt. Beispielsweise liegt die Unsicherheit einer Prognose der mittleren jährlichen Energielieferung auf Basis einer standortnahen Windmessung bei komplexem Terrain größenordnungsmäßig bei 10 Prozent. Hier summieren sich Fehler beim Micrositing, beim »Hochrechnen« auf das mittlere Normaljahr, etc.

Sofern angenommen werden darf, dass die in den Abbildungen 11 bis 13 dargestellten Verteilungen für mäßig strukturiertes Terrain typisch sind und eine Streuung von kaum 2 Prozent[31] für die allgemeine Situation einen realistischen Wert darstellt, wird man eine Standortentscheidung weiterhin unabhängig von den lokalen Maxima der relativen Flächenleistung treffen können. Dann bleiben alle klassischen Standortkriterien auch noch für große Konverter maßgebend.

[30] entsprechend Gleichung (1), präziser: »Leistung der flächennormalen Komponenten des Windfeldes in der Konverterfläche«

[31] $0.97 \lesssim P/P_{\mathrm{naiv}} \lesssim 1.005$

Auf der anderen Seite darf mit Blick auf die Problemstellung, die Beziehung zwischen Nabengeschwindigkeit, Leistungskennlinie und tatsächlicher Konverterleistung, folgendes nicht übersehen werden: Mit der hier gefundenen Variabilität der relativen Flächenleistung wurde ein Aspekt des Windfeldes identifiziert, der für das Leistungsverhalten größenordnungsmäßig einen ähnlichen Stellenwert besitzt wie beispielsweise die bereits vielfach diskutierte Turbulenzintensität.

Damit drängt sich die Frage auf, inwiefern die gefundenen Phänomene im konkreten Fall geeignet sind, Inkonsistenzen in der Konverterleistung zu begründen, die nach gängigem Schema (Turbulenzgrad, Schräganströmung, etc.) nicht erklärt werden können. Das in dieser Untersuchung gefundene Verhalten der relativen Flächenleistung ist, jedenfalls tendenziell, vor allem dazu geeignet an komplexen Standorten Minderleistungen zu begründen und besitzt in dieser Hinsicht eine sinnvolle Größenordnung ($\lesssim 2.5$ Prozent).[32]

Auch die Tatsache, dass die Unsicherheiten bei der Vermessung der Leistungskennlinie mit komplexer werdendem Terrain zunehmen (von 6 – 8 Prozent bei homogenem Terrain bis über 10 Prozent bei komplexem Terrain, vgl. [14]), lässt sich vielleicht auf das Verhalten der Flächenleistung, auf die bei komplexem Terrain zunehmende Variabilität von P/P_{naiv}, zurückführen.

Da die Flächenleistung anders als die Nabengeschwindigkeit oder der Turbulenzgrad nicht durch eine vergleichsweise einfache »Punktmessung« ermittelt werden kann, wird man die hier theoretisch bestimmte Unschärfe auch in Zukunft nicht durch Messungen vor Ort erfassen. Sollen die gefundenen Schwankungen der relativen Flächenleistung bei Ertragsprognosen dennoch berücksichtigt werden, könnte man bei Anlagenstandorten in komplexem Terrain im Sinne einer defensiven Ertragsschätzung (auf Basis der Leistungskennlinie) einen Sicherheitsabschlag von vielleicht 2 oder 2.5 Prozentpunkten machen.

Es soll an dieser Stelle nicht unterschlagen werden, dass immer wieder auch deutlich größere Diskrepanzen zwischen der tatsächlichen Konverterleistung und der theoretischen (also der über Nabengeschwindigkeit und Leistungskennlinie ermittelten) beobachtet werden.[33] In diesen Fällen taugt das gefundene Verhalten der relativen Flächenleistung als Erklärungsmuster also nur in Ausnahmefällen. Diese könnten bei extremen Standort- und damit Strömungsbedingungen wie etwa im Hindernisnachlauf gegeben sein. Unter diesen Voraussetzungen ist bemerkenswert, wie weitreichend auch massive Störungen des Verhältnisses von Flächenleistung zu Nabengeschwindigkeit sein können, vgl. Abbildung 7 und 8.

Im Umkehrschluss bedeutet das für den Versuch, Diskrepanzen zwischen tatsächlicher und theoretischer Anlagenleistung zu erklären, dass sämtliche Hindernisse zumindest von Haldengröße als potentielle Störquellen auch bei größerer Entfernung

[32][14], S. 15: »As it has been documented by InterCon there is strong statistical evidence, however, that the power curve for a given type of WTG is very constant with a typical variation of 2 – 3 % …«

[33]Diese lassen sich gut aufspüren, wenn man das in [3] beschriebene Verfahren anwendet. In diesem werden die Werte von Konverterleistung und Nabengeschwindigkeit (letztere ermittelt über das Gondelanemometer) am konkreten Standort simultan aufgezeichnet. Der Vergleich mit den entsprechenden Wertepaaren bei der Vermessung der Leistungskennlinie des gleichen Anlagentyps macht solche Fehlschätzungen deutlich.

zum Anlagenstandort in Betracht gezogen werden müssen.

Nicht in allen Fällen werden sich Inkonsistenzen in der Konverterleistung auf diese Weise über die Flächenleistung erklären lassen. In diesem Zusammenhang dürfen andere mögliche Ursachen nicht übersehen werden. Zu berücksichtigen sind neben weiteren windklimatologischen Aspekten, vor allem auch anlagentechnische Gründe wie zum Beispiel eine schlecht justierte Richtungsnachführung.

6 Schlussbemerkungen

Die Ergebnisse dieser ersten Untersuchung der Flächenleistung auch für inhomogene Strömungsbedingungen sind insgesamt vielversprechend. So konnte gezeigt werden, dass das Verhalten der Flächenleistung prinzipiell geeignet ist einige bisher noch offene Fragen hinsichtlich des Leistungsverhaltens von Windkraftanlagen und ihrer Beschreibung über die Leistungskennlinie zu beantworten.

Allerdings waren hier Schwankungen der normierten Flächenleistung von kaum ein paar Prozentpunkten ausschlaggebend – Grund also den rein numerischen Ansatz im Hinblick auf mögliche Fehler einer Revision zu unterziehen (Abschnitt 6.1).

Abschnitt 6.2 gibt einen Überblick über Fragestellungen, die im Zusammenhang mit der Problemstellung noch diskutiert werden müssen (und Gegenstand weiterer Untersuchungen sein könnten). Diese Zusammenstellung macht zugleich deutlich, unter welchen Vorbehalten die Aussagen im letzten Abschnitt gelten und dass die Aufklärung der Dreiecksbeziehung zwischen Windfeld, Leistungskennlinie und Konverterleistung noch am Anfang steht.

6.1 Nachbetrachtung des methodischen Ansatzes

Zur genauen Bestimmung des Windfeldes und damit der Flächenleistung in der gesamten Rotorfläche ist eine »flächendeckende« messtechnische Erfassung vor Ort schwierig bzw. (z. B. über Sodarmessungen) zumindest extrem aufwendig. Hier bietet sich die Anwendung hochauflösender numerischer Verfahren an.

Die eingesetzte Software zur Ermittlung der Flächenleistung zu einem als numerischem Datensatz gegebenem Windfeld $\vec{v}_{i,j,k}$ kommt ohne Vereinfachungen aus. Sie ist exakt, sofern man vom unvermeidlichen Diskretisierungsfehler bei der Integration von $\vec{v}_{i,j,k}$ gemäß Gleichung (1) absieht, s. u.

Methodische Schwächen der Untersuchung sind demnach im wesentlichen in der Berechnung der Windfelder zu suchen.[34] In dem hier gewählten mikroskaligen Ansatz auf Basis der CFD-Software FLUENT (vgl. Abschnitte 3.2 und 3.3) sind zwei potentielle Schwachpunkte zu erörtern: die Gitterauflösung und die Formulierung der Anströmungsbedingungen.

Auflösung des Rechengitters Die berechneten Verteilungen der Flächenleistung sind auf zweierlei Weisen Funktionen der Auflösung des Rechengitters: Die Gitterfeinheit bestimmt die Qualität der numerischen Lösung des strömungsmechanischen

[34]Die Frage nach der »richtigen« numerischen Modellierung lokaler Windfelder im Hinblick auf die Problemstellungen der Windkraftnutzung ist als Gegenstand der aktuellen Forschung, vgl. [17], noch nicht abschließend beantwortet.

Gleichungssystems und sie bestimmt über die Diskretisierung der Rotorfläche F_R die Genauigkeit der Integration von Gleichung (1).

Ab welcher Auflösung des Rechengitters die numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen als gitterunabhängig angesehen wird, kann nicht allgemein beantwortet werden sondern hängt stets von der Art der strömungsmechanischen Problemstellung ab. In dieser Untersuchung sollten am Beispiel deutlich inhomogener atmosphärischer Strömungen in erster Linie grundsätzliche Aspekte der Flächenleistung aufgezeigt werden. Ob die gewählten Gitterauflösungen tatsächlich geeignet waren alle Details der betrachteten Haldenwindfelder korrekt darzustellen, kann bezweifelt werden, muss aber vielleicht auch nicht abschließend entschieden werden.[35]

Der Diskretisierungsfehler bei der Berechnung der Flächenleistungswerte über Gleichung (1) hängt ebenfalls von der Auflösung des Rechengitters ab (vgl. Abschnitt 4.1, Fußnote 23). Klar ist, dass die Maschenweite d in diesem Zusammenhang in einem sinnvollen Verhältnis zum Rotorradius R stehen muss: $d \ll R$.

Eine Vorstellung von der Größenordnung des resultierenden Fehlers für die gegebenen Gitter bzw. Verteilungen $\vec{v}_{i,j,k}$ liefert der Vergleich der Flächenleistungswerte am luvseitigen Rand mit den entsprechenden exakten Werten für homogene Bedingungen (Abschnitt 2). Die Abweichungen betragen wenige Promille (s. Fußnote 23).

Erste Sensitivitätsstudien deuten darauf hin, dass diese numerische Unschärfe für alle betrachteten Rotorradien R auch im Innern der Strömungsgebiete einen realistischen Wert darstellt. In diesem Fall wäre die gewählte Gitterauflösung für die Berechnung der Flächenleistung als Fehlerquelle vernachlässigbar.

Die Formulierung der Modellrandbedingungen Ein zentrales Problem mikroskaligen Modellierens liegt in der Formulierung der oberen Modellrandbedingungen. Während die »wahre« Anströmung unter realen atmosphärischen Bedingungen grundsätzlich nur über einen »genesteten« Modellansatz zu verwirklichen ist, geht diese hier von homogenen Bedingungen im Gleichgewichtszustand aus (vgl. Abschnitt 3.3). An den Einströmungsrändern wurde entsprechend der Annahme einer Prandtlschicht ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil vorgegeben. Damit beschreiben die Vertikalprofile die realen Verhältnisse unter homogenen Bedingungen aber nur asymptotisch (für $z \searrow 0$) korrekt.

Der gewählte Modellansatz steht dadurch in einem gewissen Widerspruch zu den Berechnungen in [9]. Nach [9] liegen die Nabenhöhen großer Windkonverter im Jahresmittel eher selten ganz innerhalb der Prandtlschicht und zumeist vollständig darüber. Die grundlegende Diskussion der homogenen planetarischen Grenzschicht beispielsweise in [22] macht diese Ergebnisse plausibel.

[35] Eine Gitterauflösung wie in Abbildung 3 gezeigt ist für die exakte Berechnung der allermeisten Windfelder in der atmosphärischen Grenzschicht im Hinblick auf typische windkraftrelevante Fragestellungen sicher hinreichend. Dies kann für die meisten Strömungssituationen wohl auch noch bei doppelter Maschenweite (diese wurde in etwa für die Modellierung der beiden dreidimensionalen Modellhalden angesetzt) angenommen werden.

Bergehalden stellen als Strömungshindernisse in der atmosphärischen Grenzschicht Extremsituationen dar. Wie in weiteren Studien gezeigt werden konnte, ist für die gewählten Gitterauflösungen beispielsweise im Bereich terrassierter Haldenböschungen eine genaue Modellierung der Strömung, der hier auftretenden Strömungsablösungen und ihrer Rückkopplung mit der Hauptströmung, nicht möglich.

Wenn aber der gewählte Ansatz für die Beschreibung des mittleren Windfeldes unter quasi homogenen atmosphärischen Bedingungen in großen Nabenhöhen (jedenfalls bei geringeren Windgeschwindigkeiten) schon kritisch ist, muss dieser Ansatz für die numerische Modellierung von Hindernisüberströmungen in der atmosphärischen Grenzschicht erst recht in Frage gestellt werden.

Aus diesem Grund wurden einige Rechnungen mit den »korrekten« (also tordierten) Anströmungsprofilen der planetarischen Grenzschicht durchgeführt. Dazu wurden die universellen Vertikalprofile der horizontalen Geschwindigkeitskomponenten nach *Wippermann* (s. wieder [22] oder [15]) angesetzt: Vorgegeben wurden $z_0^{\text{eff}} = 0.25\,\text{m}$ und $u^* \in [0.2; 0.4]\,\text{m/s}$.

Für diesen Ansatz ergibt eine erste, noch vorläufige Auswertung folgendes Bild: Abweichungen im Strömungsmuster im Vergleich mit dem »Prandtlschicht-Ansatz« werden im Hindernisbereich wie im Anströmungsbereich vornehmlich in größeren Höhen z über Grund ($z \approx$ Prandtlschichtdicke) deutlich. Die normierte Flächenleistung zeigt bei der Hindernisüberströmung unter den geänderten Randbedingungen ein qualitativ ganz ähnliches Verhalten wie in Abschnitt 4. Gleichwohl gibt es quantitative Unterschiede. Für große Nabenhöhen zeigt sich jetzt eine generelle Tendenz zu größeren P/P_{naiv}-Werten. Diese liegen nun durchweg deutlich näher bei 1.00 (und z. T. auch darüber), weichen also um über 2 Prozentpunkte von den in Abschnitt 4 dargestellten Werten ab. Offenbar wirkt sich hier bereits der abweichende Profilverlauf der Geschwindigkeit im Übergangsbereich von der Prandtlschicht zur Drehschicht aus.[36]

Dieser Effekt auf die normierte Flächenleistung betrifft in gleicher Größenordnung Anströmungsbereich wie Hindernisbereich.[37] Für die Interpretation der Verteilungen von P/P_{naiv} (vgl. Abschnitt 5.1) war aber gerade die Diskrepanz zwischen den homogenen Bedingungen am »idealen Standort« und den »gestörten« Verhältnissen sowie die Variabilität von P/P_{naiv} entscheidend. Beide Aspekte bleiben nahezu ungeändert und stellen sich gewissermaßen als von der Anströmung weitgehend unabhängige »Konstanten des Hindernisses« dar. Die in Abschnitt 5 formulierten Ergebnisse bleiben also auch noch unter den korrigierten Randbedingungen gültig.

Allerdings ist die Zahl der in diesem Zusammenhang durchgeführten Berechnungen bisher noch zu klein, als dass diese Aussagen als genügend abgesichert gelten können. Sie sind vielmehr als Arbeitshypothesen für weitere Untersuchungen auf diesem Gebiet zu verstehen.[38]

6.2 Offene Fragen

Im Rahmen dieser ersten Untersuchung der Flächenleistung mussten etliche Fragestellungen unbeantwortet bleiben. Dieser Schlussabschnitt gibt einen Überblick.

[36] Der Profilverlauf ist hier weniger konkav gekrümmt sondern annähernd linear. Der Effekt auf die Flächenleistung kann dann in erster Näherung über Formel (3) erklärt werden.

[37] Die Torsion des Windfeldes innerhalb der Rotorfläche spielt in diesem Zusammenhang erwartungsgemäß keine Rolle.

[38] Solche Untersuchungen müssen nicht auf die Betrachtungen von Hindernisüberströmungen beschränkt bleiben und könnten zudem den Einfluss der atmosphärischen Schichtung auf die Flächenleistung mit berücksichtigen.

Dabei wird vor allem deutlich, wie unvollständig das Bild von der Beziehung zwischen Windfeld und Konverterleistung trotz der insgesamt ermutigenden Ergebnisse bleibt.

In wie weit gelten die Verteilungen P/P_{naiv} im Jahresmittel? Ein zentrales Problem in der Bewertung lokaler Windklimatologien im Hinblick auf ein Windkraftprojekt liegt stets darin, Aussagen zu treffen, die das statistische Mittel für die Anlage am projektierten Standort beschreiben. Den berechneten Verteilungen der normierten Flächenleistung lagen in dieser Arbeit dagegen ganz spezielle klimatologische Bedingungen zu Grunde, von denen nur angenommen werden kann, dass diese in etwa mittlere Bedingungen repräsentieren (vgl. Abschnitt 2.3 und Abschnitt 4.2). In diesem Zusammenhang ergeben sich zwei Fragen, die weiter diskutiert werden müssen:

- In wie weit sind die gefundenen Verteilungen P/P_{naiv} für die konkrete Anlage am konkreten Standort auch noch repräsentativ, wenn alle Anströmungsrichtungen betrachtet werden?

  Die Betrachtung von lediglich einer Anströmungsrichtung stellt nur dann einen sinnvollen Ansatz dar, wenn eine Anströmungsrichtung klar dominiert. Andernfalls kann erwartet werden, dass die Varianz von P/P_{naiv} bezogen auf eine Region bei Berücksichtigung aller Anströmungsrichtungen kleiner ausfällt. – Wie groß ist dieser Effekt?

- In wie weit gelten die gefundenen Verteilungen von P/P_{naiv} auch noch, wenn alle atmosphärischen Zustände am Anlagenstandort entsprechend berücksichtigt werden?

Was sagen die hier am Beispiel ausgesuchter Strömungssituationen gefundenen Ergebnisse über andere Anlagenstandorte aus? Die für die betrachteten Bergehalden gewonnenen Ergebnisse werden qualitativ und quantitativ durch Untersuchungen an weiteren Haldenwindfeldern untermauert. Inwiefern sind die für recht spezielle Strömungssituationen gewonnenen Ergebnisse allgemeingültig bzw. auf ein größeres Spektrum von Strömungssituationen übertragbar?

Man könnte beispielsweise darüber spekulieren, ob in Berg- oder Gebirgsregionen ein noch größerer Effekt auf die normierte Flächenleistung resultiert. Dagegen spricht allerdings, dass die Voraussetzung für eine größere Differenz zwischen P und P_{naiv} eine stärkere Störung oder Inhomogenität der Horizontalkomponente der Windgeschwindigkeit über der Rotorfläche wäre. Eine solche wird aber wohl eher durch kleinskalige und zugleich extreme Reliefstrukturen hervorgerufen als durch mesoskalige.[39]

[39] Soll diese Hypothese über entsprechende Modellrechnungen überprüft werden, steht man vor dem Dilemma, dass mesoskalige Strömungsmodelle durchweg nicht die für die Berechnung der Flächenleistung zu fordernde Gitterfeinheit aufweisen. Beispielsweise ist eine horizontale Gitterauflösung von 25 m, wie dies mit dem Modell FITNAH möglich ist (vgl. [9]) nicht hinreichend, um komplexe Strömungsverhältnisse *innerhalb* einer Rotorfläche darzustellen.

Dieser Argumentation folgend würde die an großen Halden gefundene Variabilität der normierten Flächenleistung für die allermeisten Küsten- und Binnenlandstandorte eine Abschätzung »nach oben« darstellen.

Klar ist, dass für solche Aussagen weitere Untersuchungen verschiedener Strömungssituationen erfolgen müssen. Aus einem insgesamt vollständigeren Bild von der normierten Flächenleistung könnte sich eine für unterschiedliche Landschaftsräume[40] spezifische Charakterisierung ableiten lassen. Ziel wäre dem einzelnen Landschaftsraum die beiden Kenngrößen

- die mittlere normierte Flächenleistung des Landschaftsraumes und
- die Varianz der normierten Flächenleistung innerhalb des Landschaftsraums

als Funktion der Nabenhöhe zuzuordnen. (Die Abhängigkeit vom Rotorradius ist ggf. ebenfalls noch zu berücksichtigen vermutlich aber vernachlässigbar.)

Mit der mittleren normierten Flächenleistung des Landschaftsraumes ist implizit die durchschnittliche Abweichung von P/P_{naiv} vom »Referenzstandort« gegeben. Diese Größe sagt also aus, wie stark die Anlagenleistung über die Leistungskennlinie im jeweiligen Landschaftsraum im Mittel über- bzw. unterschätzt wird. Die zweite Größe gibt die für den Landschaftsraum spezifische Streuung an.

Nach den bisherigen Untersuchungsergebnissen deutet sich an, dass beide Parameter eine eindeutige Abhängigkeit vom Landschaftstyp zeigen: Die erste Kennzahl nimmt mit wachsender Komplexität leicht ab, die zweite nimmt zu.

Die Flächenleistung zusammen mit weiteren windklimatologischen Einflussgrößen der Konverterleistung – eine Einordnung Die Interpretation der Ergebnisse in Abschnitt 5.2 macht entscheidend davon Gebrauch, dass Leistungsabgabe und Flächenleistung (wie in Gleichung (1) definiert) im wesentlichen proportional sind. Tatsächlich hängt die vom Konverter abgegebene Leistung von weiteren Faktoren ab, wobei deren komplizierte Wechselwirkungen ebenfalls noch zu berücksichtigen sind. Einerseits hat man die durch die Anlage definierten Aspekte der Energiewandlung (diese sollen hier nicht weiter betrachtet werden, vgl. [11]). Auf der anderen Seite sind grundsätzlich sämtliche Eigenschaften des mittleren Windfeldes und der Windturbulenz leistungsrelevant.

Eine Charakterisierung des mittleren Windfeldes $\vec{v}$ im Hinblick auf das Leistungsverhalten von Windkraftanlagen sollte auf die einzelne Rotorfläche bezogen werden und kann dann zum Beispiel über folgende Parameter erfolgen:

- Flächenleistung (wie in Gleichung (1)),
- Grad der Inhomogenität der flächennormalen Komponenten des Windfeldes in der Rotorfläche (in erster Linie Windscherung),
- Anteil überlagerter Querkomponenten im Windfeld (Schräganströmung).

[40] Gedacht ist hier an die landschaftsräumliche Klassifizierung wie im *Windatlas*, [19], S. 20 ff.

(Die beiden ersten Aspekte beschreiben also die flächennormalen Komponenten des Windfeldes, der letzte fasst die transversalen Komponenten zusammen.)

Während die Flächenleistung das Energieangebot des Windfeldes in der Rotorfläche definiert, sind die beiden anderen Aspekte als Störkomponenten aufzufassen. An diesen drei Faktoren und am Turbulenzgrad lassen sich für identische Konverter Unterschiede in der Anlagenleistung bei gleicher Nabengeschwindigkeit, also die »Abweichungen vom Referenzstandort«, festmachen.

Eine grundlegende Untersuchung des Einflusses dieser Größen auf die Konverterleistung kann im Windkanal erfolgen. Auch lässt sich hier klären, inwieweit diese Faktoren unabhängig voneinander betrachtet werden dürfen. Auf der anderen Seite sind die Gewichte der einzelnen Faktoren unter realen atmosphärischen Bedingungen bisher nur zum Teil bekannt.

Literatur

[1] Adrian, G.: *Zur Dynamik des Windfeldes über orographisch gegliedertem Gelände*, Berichte des Deutschen Wetterdienstes 188, Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., 1994.

[2] Albers, A; Hinsch, C.: *Abhängigkeit des Leistungsverhaltens großer Windenergieanlagen von verschiedenen meteorologischen Parametern*, DEWI-Magazin Nr. 9, Wilhelmshaven, 1996, S. 40 – 49.

[3] Albers, A; Söker, H.: *Windgeschwindigkeits- und Turbulenzauswertung aus Leistungs- und Gondelanemometer-Messdaten*, DEWI-Magazin Nr. 10, Wilhelmshaven, 1997, S. 51 – 62.

[4] Christoffer, J; Ulbricht-Eissing, M.: *Die bodennahen Windverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland*, Berichte des Deutschen Wetterdienstes 147, 2. Auflage, Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., 1989.

[5] Engström, S; Ganander H; Lindström R.: *Short Term Power Variations in the Output of Windturbines*, DEWI-Magazin Nr. 19, Wilhelmshaven, 2001, S. 27 – 30.

[6] Fluentnews, Applied Computational Fluid Dynamics, Vol. XI, Heft I, 2002, S. 5ff. (s. auch http://www.fluent.com/about/news/newsletters/)

[7] FLUENT Incorporated: *FLUENT 4.4 User´s Guide*, 2. Auflage, Lebanon, NH 03766, 1997.

[8] Friedrich, J.: *Wie repräsentativ ist die Nabengeschwindigkeit noch?*, DEWI-Magazin Nr. 22, Wilhelmshaven, 2003, S. 64 – 72.

[9] Gross, G; Frey, T; Trute, P.: *Die Anwendung numerischer Simulationsmodelle zur Berechnung der lokalen Windverhältnisse in komplexem Gelände*, DEWI-Magazin Nr. 20, Wilhelmshaven, 2002, S. 28 – 36.

[10] Hahm, T; Kröning, J.: *3D-Simulation der Nachlaufströmung einer Windenergieanlage*, DEWI-Magazin Nr. 18, Wilhelmshaven, 2001, S. 29 – 34.

[11] Hau, E.: *Windkraftanlagen*, 2. Auflage, Springer, Heidelberg, 1996.

[12] Niemeier, U; Schlünzen, K. H.: *Modelling Steep Terrain Influences on Flow Patterns at the Isle of Helgoland*, Beitr. Phys. Atmosph., Vol. 66, 1993, S. 45 – 62.

[13] Pedersen, T. F; Petersen, S. M; Thomsen, K; Madson, P. H; Højstrup, J: *Loads for wind turbines in inhomogeneous terrain, Measurement report*, Risø National Laboratory, Roskilde, 1991.

[14] Pedersen, T. F; Gjerding, S; Ingham, P; Enevoldsen, P; Hansen, J. K; Jørgensen, H. K.: *Wind Turbine Power Performance Verification in Complex Terrain and Wind Farms*, Risø National Laboratory, Roskilde, 2002.

[15] Prandtl, L; Oswatitsch, K; Wieghardt, K.: *Führer durch die Strömungslehre*, 9. Auflage, Vieweg, Braunschweig, 1990.

[16] Rehfeldt, K; Gerdes, G. J; Schreiber, M.: *Weiterer Ausbau der Windenergienutzung im Hinblick auf den Klimaschutz – Teil 1*, F+E-Vorhaben 999 46 101 des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, 3. Zwischenbericht, 2001.

[17] Strack, M.: *Unsicherheit von Ertragsprognosen - Verbesserung durch Strömungssimulation?*, DEWI-Magazin Nr. 20, Wilhelmshaven, 2002, S. 68 – 70.

[18] Thomsen, K; Petersen, S. M; Sangill, O; Lading, P.: *Analysis for loads of wind turbines in inhomogeneous terrain*, Risø National Laboratory, Roskilde, 1993.

[19] Troen, I; Petersen, E., L.: *European Wind Atlas*, Risø National Laboratory, Roskilde, 1989.

[20] Uria Aguirre, I; Fernández Romero, I: *Influence of the Vertical Profile of the Horizontal Component of the Wind Speed in the Evaluation of a WTGS Energy Performance*, 6. Deutsche Windenergie-Konferenz (DEWEK), Wilhelmshaven, 23. – 24. Okt. 2002, Tagungsband, Sitzung 5: Messung und Zertifizierung, S. 9 – 12.

[21] Wiggering, H; Kerth, M.: *Bergehalden des Steinkohlenbergbaus*, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1991.

[22] Wippermann, F.: *The Planetary Boundary-Layer of the Atmosphere*, Annalen der Meteorologie 7, Deutscher Wetterdienst, Offenbach a. M., 1973.

[23] Yakhot, V; Orszag, S. A.: *Renormalization Group Analysis of Turbulence*, I. Basic Theory, J. of Sci. Comput, Band 1, Nr. 1, 1986, S. 1 – 51.

[24] Zelený, J; Foken, T.: *Leistungsuntersuchungen an einer Windkraftanlage im Gebirge*, DEWI-Magazin Nr. 7, Wilhelmshaven, 1995, S. 46 – 51.