

Wie repräsentativ ist die Nabengewindgeschwindigkeit noch?

J. Friedrich, FB Geographie, Uni Münster

1. Einleitung

Die Entwicklung immer größerer Windkraftanlagen wirft die Frage auf, inwiefern die Nabengewindgeschwindigkeit noch das Geschwindigkeitsfeld in der gesamten Rotorfläche korrekt repräsentiert, inwiefern also weiterhin allein aus der Nabengewindgeschwindigkeit 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. [4], S. 36). Das Grundproblem besteht darin, dass die Leistungskennlinie die Konverterleistung ausschließlich in Abhängigkeit der Nabengewindgeschwindigkeit beschreibt. Die Leistungskennlinie wird nach festgelegten Standards¹ 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 Nabengewindgeschwindigkeit prognostizierten Werten immer wieder Abweichungen auftreten. Diese müssen erklärt werden. 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. [3]. 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 Nabengewindgeschwindigkeit zur Windflächenleistung ein grundlegender Aspekt aus diesem Problemkreis diskutiert, der bisher wenig Beachtung gefunden hat.²

Die Leistungsaufnahme des Konverters ist eine komplizierte Funktion des anströmenden Windfeldes \vec{v} und als solche unbekannt. Klar ist aber, dass die Flächenleistung des Windes P in der Konverterfläche

$$P(\vec{v}) = \frac{1}{2} \int_{F_{\text{Rotor}}} \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}_R)^3 dF. \quad (1)$$

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 (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 [6], berücksichtigt werden. Neben diesen sind noch weitere windklimatologische Einflussgrößen zu beachten. An erster Stelle sind hier Schräganströmung und Turbulenzgrad zu nennen. Diese windklimatologischen Faktoren können in Relation zur Flächenleistung P 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 einiger Veröffentlichungen in dieser Magazinreihe, vgl. etwa [1] oder [2] und sollen, ebenso wie alle nicht rein windklimatologischen Aspekte, im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter betrachtet werden. Die Problemstellung, die Beziehung zwischen Nabengewindgeschwindigkeit, Leistungskennlinie und tatsächlicher Konverterleistung, reduziert sich dadurch auf das grundlegende aber bisher kaum untersuchte Verhältnis der Nabengewindgeschwindigkeit zur Windleistung in der Rotorfläche. Dieses Verhältnis wird in dieser Arbeit für unterschiedliche Rotorradien und Nabenhöhen in unterschiedlichen Strömungssituationen analysiert. Dabei wird eine klare Unterscheidung von homogener Konverteranströmung (ideale Bedingungen bei der Vermessung einer Leistungskennlinie, ausschließlich vertikale Windscherung) und stark inhomogener Anströmung (reale Anlagen-

¹ Grundlage ist in der Regel 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 [3].

standorte 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. Abschließend werden die Ergebnisse im Hinblick auf die weitere Anwendbarkeit bzw. Gültigkeit der Leistungskennlinie interpretiert (Abschnitt 5).³

2. Die Flächenleistung unter homogenen Bedingungen

In diesem Abschnitt sollen zunächst einige grundlegende Aspekte der Flächenleistung unter homogenen atmosphärischen Bedingungen betrachtet werden. Anschließend wird kurz auf die Qualität gängiger Approximationsformeln eingegangen. Abbildung 1 zeigt die absoluten Werte der Flächenleistung $P(v)$ unter homogenen atmosphärischen Strömungsbedingungen jeweils in Abhängigkeit von Rotordurchmesser R und Nabenhöhe z_N . Dazu wurde der numerischen Berechnung unter der Nebenbedingung $v(z) = 5.5 \text{ m/s}$ (EEG⁴) ein logarithmisches Geschwindigkeitsprofil, $v(z) = (u^*/\kappa) \ln(z/z_0)$, zu Grunde gelegt. Die drei Graphen in Abbildung 1 machen den Einfluss der Oberflächenrauigkeit über das Vertikalprofil der Geschwindigkeit auf die Flächenleistung deutlich. Wie zu erwarten nimmt die Flächenleistung mit Nabenhöhe und Rotorradius zu, wobei für größere Rauigkeiten eine stärkere Zunahme mit beiden Parametern (für Konverterflächen oberhalb von 30 m entsprechend der Nebenbedingung) resultiert.

Die dargestellten Werte sind für große Nabenhöhen selbst unter der akademischen Annahme völlig homogener Bedingungen kritisch, da das logarithmische Windprofil in größeren Höhen nicht mehr exakt gilt, vergleiche dazu auch [7]. Oft wird angenommen, dass ein Profil nach Hellmann, $v(z) = v_{ref}(z/z_{ref})^p$, das mittlere Vertikalprofil der Windgeschwindigkeit hier besser beschreibt. Für die Flächenleistung ergibt sich in diesem Fall (hier nicht dargestellt) für sinnvolle Exponenten ein ganz ähnliches Bild wie in Abbildung 1. Durch die Graphen in Abbildung 1 lassen sich vor allem grundsätzliche funktionale Abhängigkeiten der Flächenleistung von Nabenhöhe, Rotorradius und Rauigkeit verdeutlichen. Zur exakten quantitativen Bestimmung der Flächenleistung ist eine solche Darstellung weniger geeignet. Ein einfacher und zugleich sehr genauer Zugang wird sich im Folgenden ergeben.

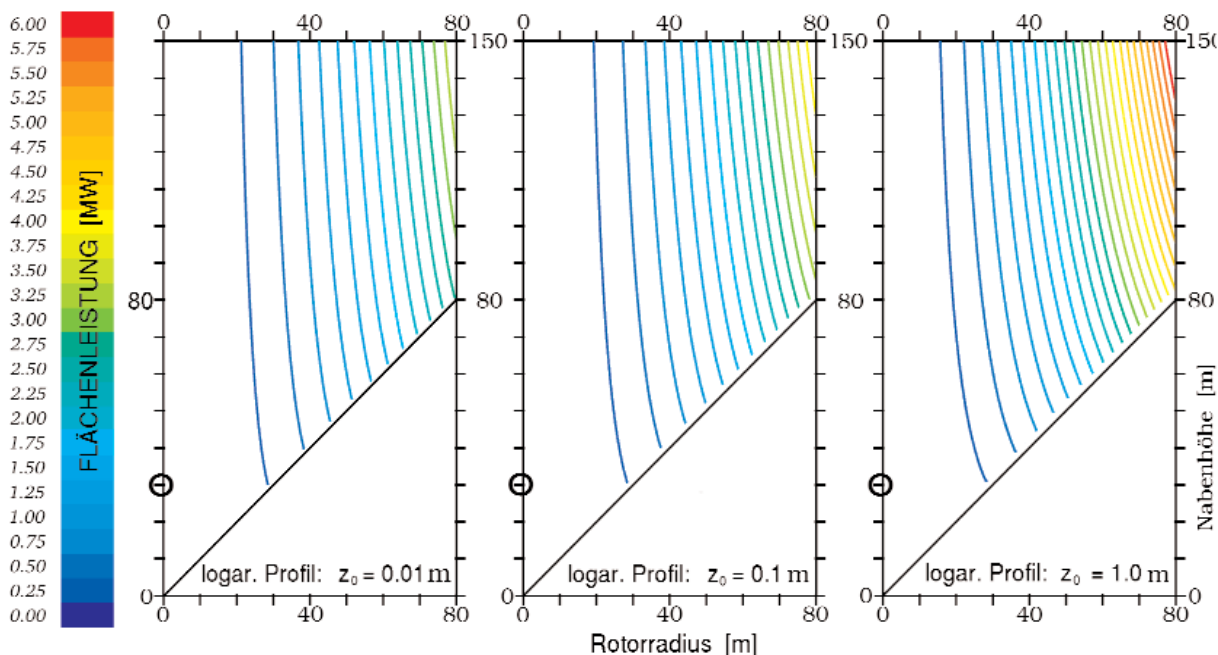


Abb. 1: Absolute Flächenleistung P unter homogenen atmosphärischen Bedingungen als Funktion von Rotorradius R und Nabenhöhe z_N bei unterschiedlichen Vertikalprofilen der mittleren Geschwindigkeit (Nebenbedingung $v(30) = 5.5 \text{ m/s}$, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$)

³ Eine detailliertere und um manche Aspekte erweiterte Version dieses Textes ist [7].

⁴ Eine Forderung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes: durch die Bedingung $v(30) = 5.5 \text{ m/s}$ werden die Leistungsangaben zu unterschiedlichen Windkonvertern vergleichbar.

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 $v_N = v(z_N)$ das Windfeld in der gesamten Konverterfläche repräsentiert, so dass

$$P_{\text{naiv}} := \frac{1}{2} \rho v_N^3 F_{\text{Rotor}} \quad (2)$$

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.⁵) Für kleinere Rotorflächen ist dies sicher eine sinnvolle Annahme, s. dazu auch Abbildung 2. Für große Rotorflächen wird diese Annahme 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, vergleiche [2]. Häufig wird daher für das Vertikalprofil der Geschwindigkeit im Rotorbereich ein linearer Verlauf $v_{\text{lin}}(z) = a(z - z_N) + b$ angenommen, was zwar ebenfalls vereinfachend ist, oft aber eine gute Approximation von Messwerten darstellt und darüber hinaus eine analytische Berechnung von P gestattet:

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

Hier steht a für den Vertikalgradienten der Geschwindigkeit und b für die Geschwindigkeit, die für die Nabenhöhe angesetzt wird. Liegt ein logarithmisches Profil zu Grunde, wird die Flächenleistung (für den gesamten Bereich von z_N und R und für alle Rauigkeiten) recht gut durch $P_1 := P(v_1)$, $v_1(z) = ((\partial v / \partial z)(z_N)) \cdot (z - z_N) + v_N$ approximiert, s. Graph IV in Abbildung 2. Für Hellmann-Profile stellt $a = (v(z_N + R) - v(z_N - R)) / 2R$, $b := v_N$ den genaueren Ansatz dar (P_2 in Graph VI). In beiden Fällen sind die Abweichungen dieser Approximationen von den exakten Werten gering. Sie liegen für realistische Nabenhöhen in Relation zur Rotorblattlänge ($z_N \geq 2R$) in allen Fällen unter 1.5 Prozent.

Auf den ersten Blick mag überraschen, dass über die vorgestellten linearen Näherungen des Geschwindigkeitsprofils keine Verbesserung in der Approximation der Flächenleistung erzielt wird.⁶ Unter homogenen Bedingungen ist die durch (2) gegebene naive Approximation (diese liefert, wie auch schon P_1 und P_2 , stets *obere* Schranken für die exakte Leistung P) für beide Profilarten (log. oder Hellmann) genauer. Dies gilt für alle Rotorlängen, Nabenhöhen und Rauigkeiten. Vergleiche dazu die entsprechenden Graphen in Abbildung 2. Für kleine bis mittlere Rauigkeiten zeigt sich hier für realistische Nabenhöhen ein Fehler von kaum 1.0 Prozent, für große Rauigkeiten liegt dieser nur wenig darüber, Graphen I bis III.

Fazit: Über die Formeln (2) bzw. (3) ist unter homogenen Bedingungen 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 stellt ohne Einschränkung auch noch für große Rotordurchmesser den besten Ansatz dar. Es wird daher in der entsprechenden Diskussion inhomogener Strömungsmuster (Abschnitt 4) eine Normierung der Flächenleistung über P_{naiv} vorgenommen.

3. Die numerisch bestimmten Windfelder an Haldenstandorten

Ziel der Untersuchung ist es, die Windleistung in der Rotorfläche in Relation zur Nabengeschwindigkeit

⁵ In Übereinstimmung mit Definitionsgleichung (1) wird hier also wieder 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 damit im Trend der aktuellen Diskussionen über die geeignete Beschreibung der Konverterleistung über die Leistungskennlinie und über den Charakter der zur Vermessung einzusetzenden Anemometer, vgl. [3].

⁶ Dieser scheinbare Widerspruch klärt sich, wenn man in Gleichung (1) die entsprechenden Taylorentwicklungen zu $v^3(z) = ((u^2/k) \ln(z/z_0))^3$ bzw. $v(z) = v_{\text{ref}}(z/z_{\text{ref}})^p$ einsetzt und die Korrekturterme bis zur zweiten Fehlerordnung diskutiert.

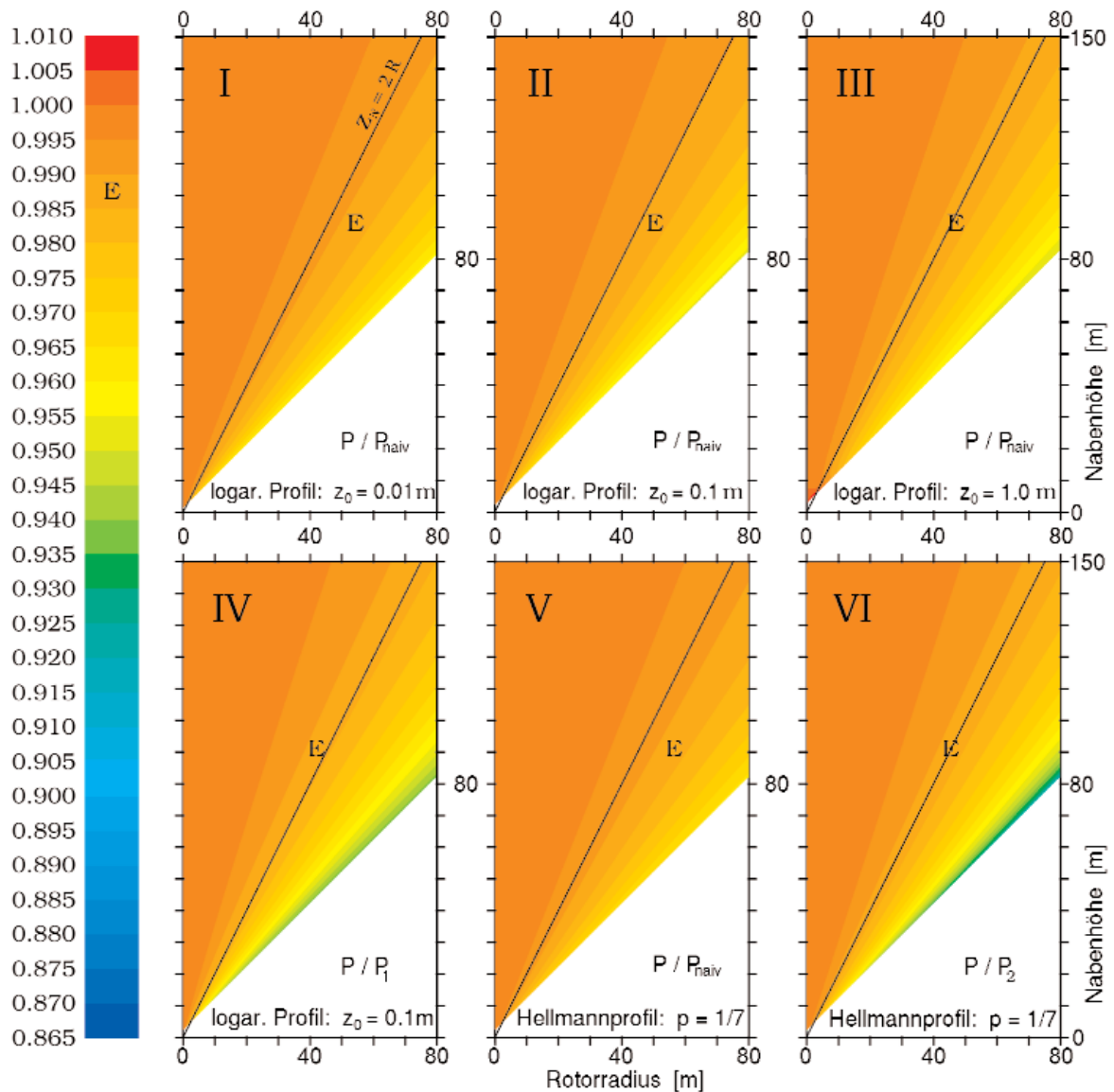


Abb. 2: Normierte Flächenleistung unter homogenen atmosphärischen Bedingungen als Funktion von Rotorradius und Nabenhöhe für unterschiedliche Vertikalprofile der mittleren Geschwindigkeit. (Die Farbskalierung wurde hier in Konsistenz zu allen weiteren Darstellungen der normierten Flächenleistung gewählt.)

für Anlagenstandorte in strukturiertem Terrain zu charakterisieren. 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 durchgeführt. (Eine genaue Beschreibung von Orographie und Topographie der betrachteten Hindernisse findet sich in [7].) Die Strömungsverhältnisse an den verschiedenen Haldenstandorten wurden (im Rahmen eines Dissertationsvorhabens im Fachbereich Geowissenschaften der Universität Münster⁷) 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 solche Strömungssituationen präsentiert, an denen wichtige Phänomene deutlich gemacht werden können und die zugleich die insgesamt an Haldenstandorten gefundenen Effekte auf die Flächenleistung gut repräsentieren. Grundlage für eine fundierte Analyse der Flächenleistung ist die exakte und zugleich hochauflösende Bestimmung der Windfelder. Diese erfolgte hier mit der CFD-Software FLUENT numerisch, s. [5]. Gerade für die exakte Darstellung der komplexen Strömungsmuster bei Hindernisüberströmungen (Strömungsablösungen) in der atmosphärischen Grenzschicht sind die Eigen-

⁷ Die Forschungsgruppe Windenergie am Institut für Geographie/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.

schaffen des eingesetzten strömungsmechanischen Rechenmodells und der klimatologische Modellansatz von fundamentaler Bedeutung, s. dazu [7]. (Zur Darstellung der entsprechenden Windfelder vgl. ebenfalls [7].)

4. Die normierte Flächenleistung unter inhomogenen Bedingungen

Für die berechneten Windfelder wurde mit Hilfe zusätzlicher Software (s. [7]) die räumliche Verteilung der normierten Flächenleistung $[P/P_{\text{naiv}}] = [P/P_{\text{naiv}}](R; \bar{v})$ ermittelt. Die Ergebnisse werden in den Abbildungen 3 bis 5 in einheitlicher Skalierung präsentiert, die so auch den Vergleich mit dem homogenen Fall (Abbildung 2) zulässt. (Als Funktion des angesetzten Rotorradius R ist P/P_{naiv} natürlich erst für Nabenhöhen deutlich über der Blattlänge sinnvoll.)

Einfluss klimatologischer Randbedingungen: Für das jeweils betrachtete Hindernis ist die Verteilung von P/P_{naiv} als Funktion des Windfeldes \bar{v} abhängig von den klimatologischen Parametern, die die Hindernisanströmung definieren. Unter nicht ganz windschwachen Bedingungen sind die Strukturen des bodennahen Windfeldes in erster Linie reliefinduziert und dominieren einen möglichen Schichtungseinfluss auf das Strömungsmuster. Eine erste Untersuchung der Flächenleistung, die vor allem an »mittleren« Bedingungen interessiert ist, kann sich daher auf die Betrachtung neutraler atmosphärischer Schichtungszustände beschränken. Für den Einfluss der Anströmungsgeschwindigkeit auf das Strömungsmuster am Hindernis kann dann in erster Näherung *Reynolds-Ähnlichkeit* angenommen werden, so dass von der Anströmungsgeschwindigkeit auch kein relevanter Einfluss auf P/P_{naiv} ausgeht.

Unter homogenen Bedingungen hat sich nur ein sehr schwacher Einfluss der Bodenrauigkeit über das Geschwindigkeitsprofil auf die normierte Flächenleistung gezeigt (Graphen I, II und III in Abbildung 2). Am Hindernis hat das anströmende Vertikalprofil einen »gewissen« Einfluss auf das Strömungsmuster, wenngleich das Windfeld hier in erster Linie durch die Hindernisgeometrie bestimmt wird. Es konnte gezeigt werden (vgl. [7]), dass der Effekt der Rauigkeit im Fetch z_0^{eff} auf die Verteilung von P/P_{naiv} am Hindernis ebenfalls vernachlässigbar ist. Es bedeutet also keine Einschränkung, wenn die Anströmungsprofile nachfolgend durchweg über in etwa mittlere Rauigkeiten z_0^{eff} gebildet werden.

Selbst wenn also für die weitere Analyse der Flächenleistung recht spezielle atmosphärische Randbedingungen zu Grunde gelegt werden, so darf dennoch angenommen werden, dass die ermittelten Verteilungen von P/P_{naiv} für ein größeres Spektrum atmosphärischer Zustände repräsentativ sind.

Der zweidimensionale Fall: Ziel von Abschnitt 4 ist es zu zeigen, wie sich der Einfluss orographischer Strukturen auf die relative Flächenleistung auswirkt, wie sich ausgehend von den homogenen Bedingungen der Anströmung Störungen im Windfeld im Verhältnis von P zu P_{naiv} niederschlagen. Dabei lassen sich wesentliche Aspekte oder Phänomene bereits am zweidimensionalen Fall verdeutlichen, s. Abbildung 3. Besonders gut nachvollziehbar ist das Verhalten von P/P_{naiv} im Leebereich von Hindernissen, und hier insbesondere in Verbindung mit dem Auftreten von Strömungsablösungen. Liegt die Rotorhülle im »Windschatten«, während der obere Teil der Rotorfläche »frei« angeströmt wird, wird die Flächenleistung über die Nabengeschwindigkeit (bzw. P_{naiv}) systematisch unterschätzt. Liegt die Nabe knapp über der Nachlaufzone wird die Flächenleistung überschätzt. In den übrigen Bereichen kann das Verhalten von P/P_{naiv} nur bei genauer Kenntnis des Geschwindigkeitsfeldes erklärt werden. (Am aufschlussreichsten sind in diesem Zusammenhang die Vertikalprofile der Horizontalgeschwindigkeit, vgl. dazu [7].)

Einfluss der Rotorblattlänge: 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 3 zeigt am Beispiel der Dammüberströmung den Einfluss der Blattlänge 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 beispielsweise einen festen Punkt (als Rotorhülle) im Nachlaufbereich des Hindernisses, zeigt sich bei Variation der Blattlänge eine Bandbreite für P/P_{naiv} von bis zu 10 %. Eine solche Sichtweise ist bezogen auf die Windkraftnutzung bzw. im Hinblick auf reale Anlagentypen allerdings wenig sinnvoll. Eine Anlagenplatzierung 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 unter der Nebenbedingung $z_n \geq 2R$, so macht Abbildung 3 folgendes deutlich: Die Flächenleistung wird jetzt über

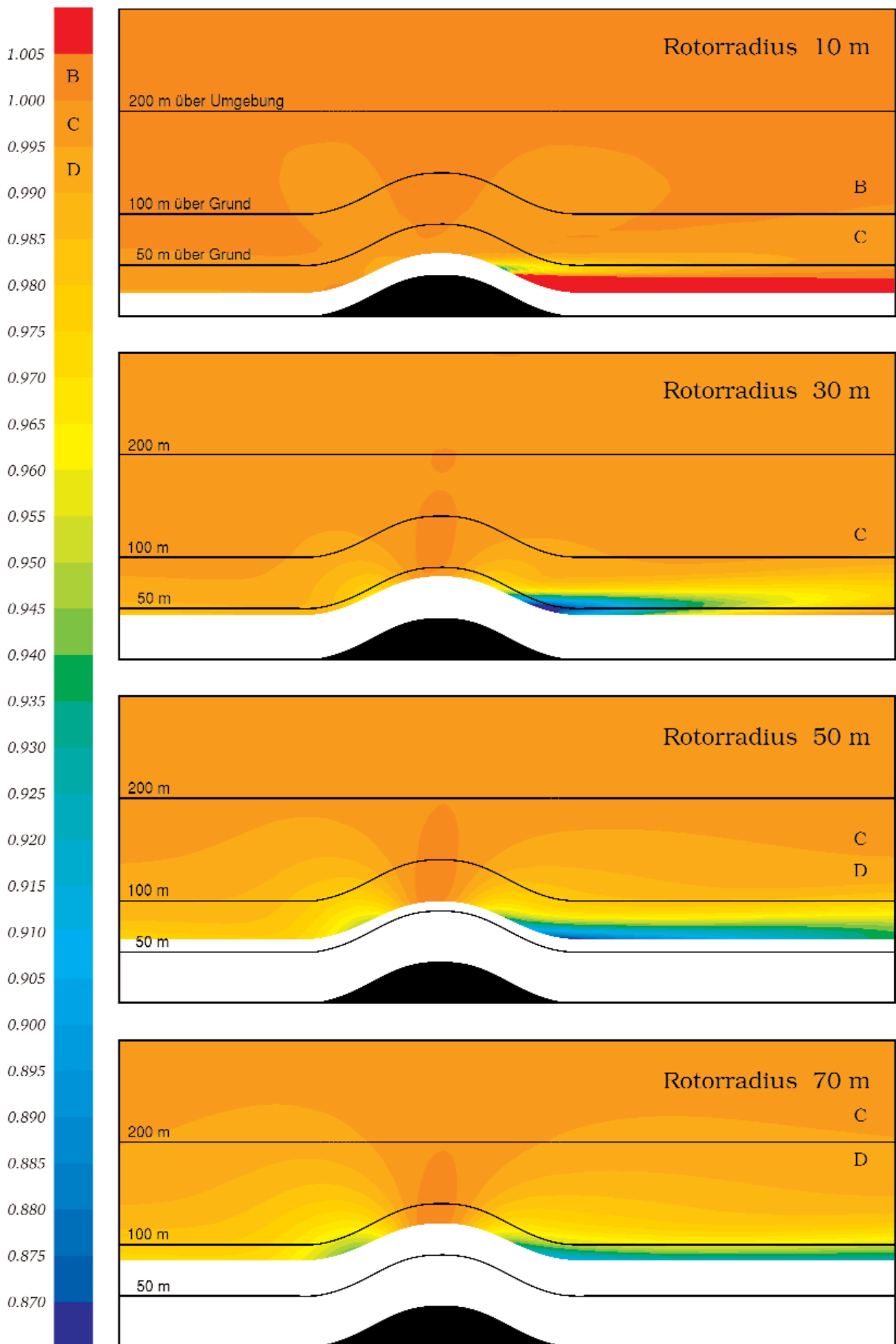


Abb. 3: Einfluss des Rotorradius auf die normierte Flächenleistung P/P_{naiv} bei Überströmung eines etwa dammartigen Hindernisses: Höhe 40 m, Anströmung von links ($z_0^{eff}=0.1$ m), Detailausschnitt

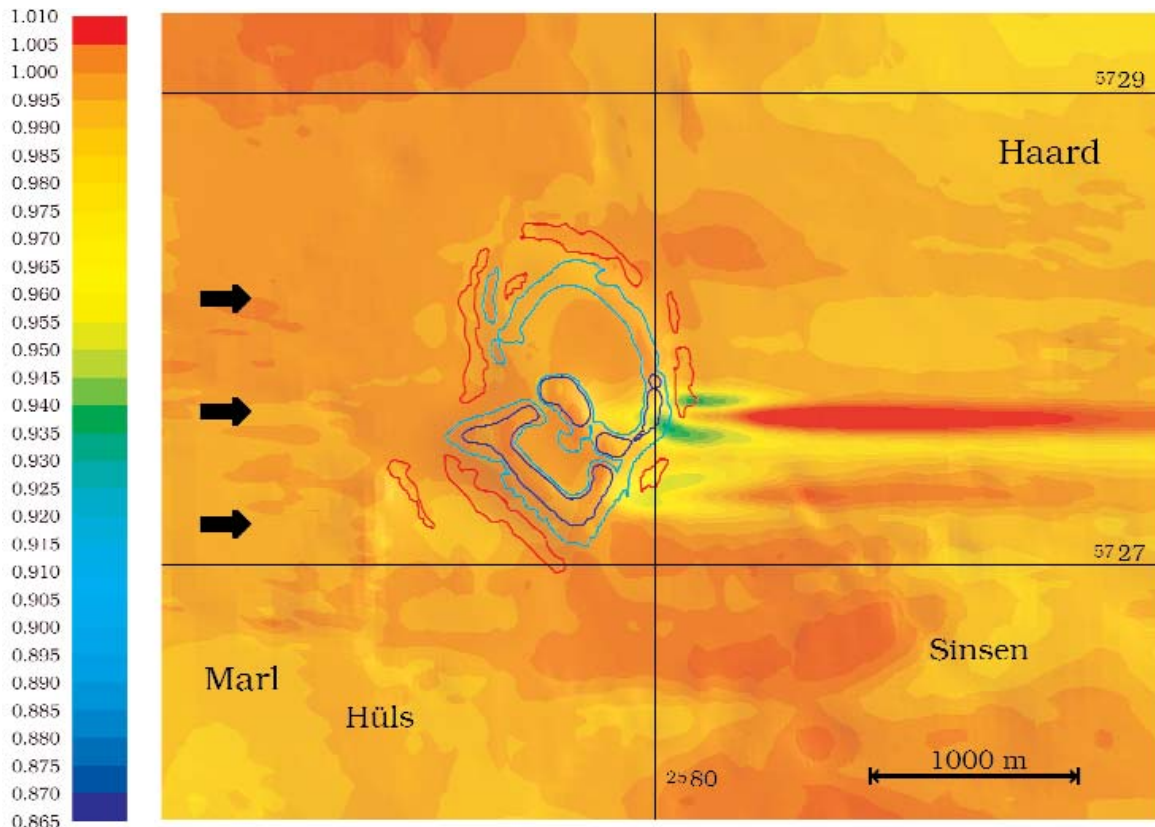


Abb. 5: Normierte Flächenleistung P/P_{naiv} um die Bergehalde Brinkfortsheide (Detailausschnitt) für Rotorradius $R=50$ m in 87.5 m über Grund (Höhenlinien: blau 77.5 m, grün 82.5 m, rot 92.5 m)

diese Hypothese zu überprüfen, wurde P/P_{naiv} für den realen Haldenstandort »Brinkfortsheide« bei Marl (vgl. [7]) berechnet. Abbildung 5 zeigt die normierte Flächenleistung auf einer festen Knotenebene des Rechengitters in einer Höhe von 87.5 m über Grund. Lediglich im unmittelbaren Hindernisbereich weicht die Höhe durch die hier auftretende Verzerrung des körperangepassten Gitters von diesem Wert ab. Die eingezeichneten Höhenlinien erklären die vertikalen Abweichungen und machen zugleich die Lage der Halde deutlich. Neben dem vom Hindernis ausgehenden dominanten Effekt auf P/P_{naiv} , kann hier die Wirkung auf die relative Flächenleistung bei mäßig strukturiertem Terrain in typischer Nabenhöhe abgelesen werden.⁸ Abseits der Halde besitzt P/P_{naiv} (in dieser Höhe, $87.5 < 2R$, $R=50$ m) eine Bandbreite von etwa 3.5 Prozentpunkten. Für größere Höhen wird diese Spanne schnell kleiner und liegt beispielsweise für 107 m über Grund nur noch bei etwa 2.5 %, s. [7].

5. Schlussbemerkungen

Zusammenfassung: Zuletzt wurde stets der Quotient P durch P_{naiv} betrachtet. Die Bedeutung dieser Größe für die Konverterleistung erschließt 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. Hier wird die exakte Flächenleistung P durch die Approximation über die Nabengeschwindigkeit P_{naiv} um etwa 1 Prozent überschätzt, s. Abschnitt 2. Wie in Abschnitt 4 gezeigt wurde, liegt diese Differenz in komplexem Terrain, sinnvolle Anlagenstandorte und Nabenhöhen vorausgesetzt, eher um 3 %. Die tatsächliche Windleistung in der Rotorfläche wird hier also auf Basis der Nabengeschwindigkeit um bis zu 2 (in seltenen Fällen um maximal 3) Prozentpunkte zu hoch eingeschätzt. Diese Abschätzung gilt unter der Voraussetzung sinnvoller Nabenhöhen ($z_N \geq 2R$) auch noch für die kommende Konverterklasse mit Rotorblattlängen um 50 m. 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.

Sofern man bereit ist, Fehler von bis zu 3 Prozentpunkten zu tolerieren, kann die eingangs formulierte zentrale Fragestellung dieser Arbeit folgendermaßen beantwortet werden: Die Nabengeschwindigkeit

⁸ Die hier gewählte Darstellungsart ist mit Blick auf die Windkraftnutzung vielleicht besonders aussagekräftig, da sie die Auswirkungen einer Standortwahl für einen konkreten Anlagentyp (fester Rotorradius und feste Nabenhöhe) auf die relative Flächenleistung abbildet.

repräsentiert die Flächenleistung des Windes in der Konverterfläche noch so gut, dass sie als einzige Information über das mittlere Geschwindigkeitsfeld ausreicht. Dies gilt auch noch für große Rotorradien, und auch noch bei inhomogener Strömung in strukturiertem Terrain.

Fazit: Im Rahmen dieser Arbeit wurde (vermutlich erstmalig das Verhältnis der Nabengeschwindigkeit zur Windflächenleistung grundlegend untersucht. Die numerisch gewonnenen Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Relation zwischen Nabengeschwindigkeit und Flächenleistung durch eine gewisse Unschärfe gekennzeichnet ist, die bei schwach bis mäßig strukturiertem Terrain knapp 4 Prozentpunkte ($0.97 < P/P_{\text{naiv}} < 1.005$) betragen kann. Diese Abschätzung gilt für $z_N \geq 2R$ unabhängig vom Rotordurchmesser der Anlage. Überträgt sich dies entsprechend auf die Beziehung zwischen Nabengeschwindigkeit und Konverterleistung, lässt das weitere Interpretationen 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 also angenommen werden darf, dass die in Abbildung 5 dargestellte Verteilung für schwach bis mäßig strukturiertes Terrain typisch ist und eine Streuung von etwa 2 Prozent 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.

Auf der anderen Seite darf nicht übersehen werden, dass im Hinblick auf die Problemstellung, die Beziehung zwischen Nabengeschwindigkeit, Leistungskennlinie und tatsächlicher Konverterleistung, mit der hier gefundenen Variabilität der relativen Flächenleistung ein zusätzlicher Aspekt gegeben ist, der größenordnungsmäßig einen ähnlichen Stellenwert besitzt wie beispielsweise der bereits vielfach diskutierte Turbulenzgrad des Windfeldes. 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 (≤ 3 Prozent). Letzteres zeigt sich auch noch in einem anderen Zusammenhang: Man geht allgemein davon aus, dass die Vermessung der Leistungskennlinie in flachem Terrain mit einem Fehler von 6 - 8 Prozentpunkten behaftet ist. Für komplexes Terrain wird eine Unsicherheit von etwa 10 Prozentpunkten angenommen, vgl. [3].

Da die Flächenleistung anders als die Nabengeschwindigkeit oder der Turbulenzgrad nicht durch eine vergleichsweise einfache »Punktmessung« ermittelt werden kann, wird man die hier theoretische bestimmte Unschärfe auch in Zukunft nicht durch Messungen vor Ort erfassen (können). 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 3 Prozentpunkten machen.

6. Literatur:

- [1] Zelený, J; Foken, T.: Leistungsuntersuchungen an einer Windkraftanlage im Gebirge, DEWI-Magazin 7, Wilhelmshaven, 1995.
- [2] Albers, A; Hinsch, C.: Abhängigkeit des Leistungsverhaltens großer Windenergieanlagen von verschiedenen meteorologischen Parametern, DEWI-Magazin 9, Wilhelmshaven, 1996.
- [3] Pedersen, T. F; Gjerding, S; Ingham, P. et al: Wind Turbine Power Performance Verification in Complex Terrain and Wind Farms, RISØ Nat. Laboratory, Roskilde, 2002.
- [4] 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, April 2001.
- [5] FLUENT Incorporated: FLUENT 4.4 User's Guide, 2. Aufl., Lebanon, NH 03766, 1997.
- [6] Hau, E.: Windkraftanlagen, 2. Aufl., Springer-Verlag, Heidelberg, 1996.
- [7] Friedrich, J.: Wie repräsentativ ist die Nabengeschwindigkeit noch?, ungekürzte Fassung, 2003, s. <http://www.joe-friedrich.de>.