
ABSCHLUSSBERICHT

Verbundprojekt Windturbulenzen und deren Bedeutung für die Nutzung von Windenergie

Freifeld- und Windkanalmessungen, Industrienormen



Oldenburg, Dezember 2008

Gefördert durch das



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

ZUWENDUNGSEMPFÄNGER

Prof. Dr. Joachim Peinke
Institut für Physik
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg
26111 Oldenburg

FÖRDERKENNZEICHEN

03SF0314A

VORHABENBEZEICHNUNG

Verbundprojekt Windturbulenzen und deren Bedeutung
für die Nutzung von Windenergie:
Freifeld- und Windkanalmessungen, Industrienormen

LAUFZEIT DES VORHABENS

2005 – 2008 (36 Monate)

1 Kurze Darstellung

1.1 Aufgabenstellung

Das zentrale Thema dieses Projektes war die Durchführung experimenteller Untersuchungen zur Bedeutung von Windturbulenzen für die Nutzung von Windenergie. Hierbei sollten zwei Aspekte bearbeitet werden. Zum einen wurden mit Freifeldmessungen Daten der Windgeschwindigkeit (auf mehreren Höhen) “vor” einer Windenergieanlage (WEA) und der Leistungsabgabe der entsprechenden WEA erhoben, die anschließend aufbereitet und analysiert wurden und die ebenfalls als Basis für die Modellentwicklung für Windböen und Windfelder (Teilprojekte des MPI Dresden und der Universität Münster) dienen sollten. Des Weiteren sollte aus diesen Daten ein phänomenologisches Wind-Leistungsmodell erstellt werden, welches auch die Leistungsabgabe unter Berücksichtigung turbulenter Fluktuationen des Windes richtig wiedergibt.

Der zweite Aspekt der experimentellen Untersuchungen betrifft Windkanalmessungen. Hier sollten die Auftriebskräfte eines Strömungsprofils, Segment eines Flügels, in Betriebszuständen der turbulenten Ablösung und zusätzlich unter turbulenter Anströmung untersucht werden, um ein besseres Verständnis des Phänomens des “dynamischen stall” zu erhalten. Die zeitlich aufgelösten Messungen sollten in einem neuen quantitativen Vergleich mit numerischen Simulationen des DLR in Göttingen gestellt werden. Es war geplant, die hierzu nötigen Analyseverfahren mit den anderen Projektpartnern zu entwickeln, wobei als Basis die phänomenologische stochastische Modellierung der Zeitdynamik der Auftriebskräfte eingesetzt werden sollte. (In dieses Teilprojekt wurde das Vorhaben von Herrn Schaffarczyk als Unterauftrag aufgenommen, welches gesondert aufgeführt ist.)

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Teilprojekt wurde in enger Zusammenarbeit mit den anderen Teilprojekten des Verbundvorhabens “Windturbulenzen und deren Bedeutung für die Nutzung von Windenergie” im Rahmen der Förderinitiative “Netzwerke Grundlagenforschung erneuerbare Energien und rationelle Energieanwendungen” des BMBF durchgeführt. Dies schließt insbesondere einen intensiven Wissensaustausch ein, der es den in diesem Projekt tätigen Wissenschaftlern ermöglichte, die verschiedenen Fragestellungen der Grundlagenforschung mit der spezifischen Anwendung zu verknüpfen und relevante Aspekte für die Windenergieforschung herauszuarbeiten. Experimentelle Voraussetzungen stellten für die beiden Teilaufgaben im Projekt “Freifeld- und Windkanalmessungen” die jeweiligen Messaufbauten dar – der im Windpark Meerhof aufgestellte und mit einer Reihe von Sensoren ausgestattete Messmast sowie der Windkanal der Universität Oldenburg –, die bereits vor Beginn des Projektes betrieben wurden.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben wurde für einen Zeitraum von drei Jahren angelegt. Eine anfängliche Verzögerung ergab sich aus den üblichen Wartezeiten bei dem Finden

und Einstellen von geeignetem Personal. Durch einen Personalwechsel (Sommer/Herbst 2006) kam es zu einer weiteren Verzögerung. Die Laufzeit des Teilprojekts wurde entsprechend kostenneutral verlängert.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand (Ausgangslage)

Angaben und Erläuterungen beziehen sich auf den Stand vor Beginn des Projektes.

Windenergie Zur Charakterisierung von Windverhältnissen werden Freifeldmessungen mit Schalenkreuz- und Ultraschallanemometern auf Messmasten in der Nabenhöhe von Windkraftanlagen durchgeführt. Nach nationalen und internationalen Vorschriften (IEC 61400-1/12, DS 472, ESDU, zusammenfassende Darstellung siehe [1]) werden 10-minütige Windgeschwindigkeitsmittelwerte, Turbulenzintensitäten, und integrale Längenskalen (für Kaimal- und von Karman-Spektren) bestimmt. Während es noch vor einigen Jahren nur schwer möglich war, große Datenmengen zu speichern und schnell zu verarbeiten, ist es aus heutiger Sicht auch bei Freifeldmessungen technisch möglich, im Sekunden-takt oder schneller Daten aufzunehmen. Trotzdem werden auch noch heutzutage meist nur 10-minütige Mittelwerte gespeichert, da für schneller aufgenommene Messwerte keine Normen zur Verarbeitung vorliegen, um etwa eine genauere Charakterisierung eines Standortes für die Windenergienutzung zu erhalten.

Von großem Interesse für die Bestimmung von Extremlasten ist die Beschreibung der Böigkeit des Windes. Insbesondere versucht man die innerhalb von 50 Jahren zu erwartende maximale Windböe aus dem Turbulenzgrad zu bestimmen, wobei Böendauern von mehreren Sekunden bezüglich genormter Böenformen betrachtet werden (hierzu siehe [1]). Windänderungen innerhalb einer Sekunde entsprechen bei Windstärken von mehr als 10 m/s räumlichen Abmessungen von 10 m und mehr, die für die WEA durchaus wichtig sein können.

Vergleicht man die Standardmethoden der Windcharakterisierung mit dem aktuellen Wissen über die Eigenschaften turbulenter Strömungen, so lässt sich leicht erkennen, dass für eine verbesserte Windfeldbeschreibung zeitlich höher aufgelöste Messdaten nötig sind. Wobei hochaufgelöst in Bezug auf eine WEA bedeutet, dass Windgeschwindigkeiten mit einer Abtastrate von 1 bis 10 Hz aufgenommen werden sollten.

Ein weiteres Problem, welches im Allgemeinen übergangen wird, ist, dass bei der Bestimmung von 10-minütigen Mittelwerten nicht beachtet wird, dass sich für turbulente Windfelder eine Standardabweichung nicht eindeutig definieren lässt. Durch den turbulenten und instationären Charakter der Windströmungen hängt die Standardabweichung stark vom Betrachtungszeitraum (Mittelungszeit) ab. Anders formuliert, lässt sich für Windmessungen die integrale Länge aus Korrelationsanalysen meist nicht eindeutig bestimmen [2].

Neben der Beschreibung des Windfeldes ist ein möglichst gutes Verständnis der Auswirkungen des Windes auf die Windenergieumwandlung von zentralem Interesse. Bezüglich der Windenergieumwandlung wollen wir hier zwei Aspekte ansprechen, zum einen die globalere Betrachtung der Leistungsabgabe als Funkti-

on des aktuellen Windes und zum anderen die strömungsmechanisch bedingte Auftriebskraft eines Flügelprofils.

Die Bestimmung der Leistungscharakteristiken von Windenergieanlagen basiert ebenfalls standardmäßig auf 10-minütigen Mittelwerten. Bereits an mehreren Stellen wurde auf die Bedeutung des oben erwähnten Turbulenzgrades hingewiesen (siehe z.B. [3]). Ein bekanntes Problem ist die standortspezifische Abhängigkeit der Leistungscharakteristiken. Des Weiteren sind weder die Komplexität der Windfelder noch die dynamischen Mittelungsprozesse einer Anlage (Leistung als nichtlineare Antwort auf Geschwindigkeitsfluktuationen) hinreichend erforscht. 10-minütige Mittelwerte sind unzureichend, da die Dynamik einer WEA auf kleineren Zeitskalen stattfindet. Es ist offensichtlich, dass der Mittelwert einer fluktuierenden Größe ($\langle P(u) \rangle$: Leistungsmittelwert bei fluktuierender Windgeschwindigkeit u) nicht gleich dem Wert ist, der sich aus dem Mittelwert einer zu Grunde liegenden fluktuierenden Größe ergibt ($P(\langle u \rangle)$). Die sich daraus ergebenden Abweichungen der Leistungsabgabe einer WEA können durchaus im Bereich von einigen Prozent liegen und so über die wirtschaftliche Rentabilität entscheiden.

Als zweiter wichtiger Aspekt der Windenergieumwandlung sei das Auftreten von extremen mechanischen Lasten in Verbindung mit dem Phänomen des dynamischen stall (das dynamische Verhalten der Auftriebskräfte bei sich verändernden Anströmverhältnissen) genannt. Änderungen der Windrichtung, Windscherungen und natürliche Turbulenz – resultierend in hochfrequenten Fluktuationen des jeweiligen Anströmwinkels und des entsprechenden Betrags der Windgeschwindigkeit – sind auch bei modernen, pitch-geregelten WEA hauptsächliche Ursache für das Auftreten von mechanischen Lasten [4]. Daher ist das Verständnis dieser Wind-induzierten Lasten von großem Interesse.

Die Auswirkung laminarer und turbulenter Strömungen auf die Auftriebs- und Widerstandskräfte von Strömungskörpern unter statischen (zeitlich konstanten) Bedingungen wurde zahlreich untersucht. So lange die Strömung an einem Profil anliegt, ist die Druckverteilung und die Auftriebskraft über konforme Abbildungen oder über Singularitätenmethoden gut verstanden (siehe z.B. [5]). Dies gilt nicht mehr, wenn Ablöseeffekte die Auftriebskraft wesentlich bestimmen und man an der zeitlichen Dynamik der sich ergebenden Rüttelkräfte interessiert ist. Das grundlegende Problem ist hierbei, die Transition der anliegenden Strömung in die turbulente Ablösung zu verstehen. Entsprechende Untersuchungen behandeln meist mittlere Kräfte. Es fehlen allgemeine Methoden, um die komplexen dynamischen fluidmechanischen Vorgänge zu erfassen, die durch das nichtlineare Verhalten chaotisch bzw. turbulent und damit im Detail nicht reproduzierbar sind (sensible Abhängigkeit von den Anfangsbedingungen).

Die Änderung der Windrichtung und -geschwindigkeit innerhalb der atmosphärischen Grenzschicht machen die Sachlage des dynamischen stall noch schwieriger, da zusätzlich zum Problem der turbulenten Ablösung schnelle Änderungen des Angriffspunktes der Strömung an den Auftriebskörper stattfinden.

Als Forschungsaufgaben ergaben sich aus dieser Beschreibung des dynamischen stall, zum einen das dynamische Verhalten der Auftriebskräfte zu erfassen

und zu analysieren und zum anderen die Auswirkung turbulenter Anströmungsverhältnissen zu verstehen. Für die Anwendung ist es von besonderem Interesse, die Maximalkräfte des dynamischen Stall zu erfassen, d.h. die maximale Überhöhung der Auftriebskräfte vor dem Einsetzen bzw. der Ausbildung der turbulenten Ablösung zu bestimmen. Hierbei ist es schon hilfreich, wenn genaue obere Schranken für diese Größen angegeben werden könnten.

Turbulenzforschung Das grundlegende Problem der Turbulenz hat seit Jahrzehnten viel Forschungsinteresse auf sich gezogen. Obwohl das genaue Verständnis der Turbulenz bis heute als ungelöstes wissenschaftliches Problem angesehen wird, sind doch eine Vielzahl von Fortschritten zu verzeichnen (siehe z.B. [6]). Im Bezug auf die oben beschriebene Problematik der Windturbulenzen muss festgehalten werden, dass sich die grundlegenden Untersuchungen meist auf idealisierte turbulente Strömungsbedingungen beschränken und nur selten auf reale Situationen wie atmosphärische Windströmungen übertragen werden.

Im Bereich dieser idealisierten Turbulenzforschung sind in den letzten Jahren neue Methoden und Erkenntnisse entwickelt worden, hier seien zum Beispiel die Beschreibung mit Multifraktalen (Multiskalenansätzen) oder mit Hilfe von fraktionalen stochastischen Prozessen zu erwähnen. Neue Ansätze mit Markovprozessen und empirisch bestimmten Fokker-Planck-Gleichungen wurden von den Antragstellern selbst entwickelt (Friedrich, Peinke und Kantz). Zudem sind in letzter Zeit im Rahmen der numerischen Berechnung von turbulenten Strömungen wichtige Fortschritte auf dem Gebiet der Modellierung der kleinskaligen Schwankungsprozesse (Wagner) erzielt worden. So ist es heute möglich, wenigstens phänomenologisch ideale turbulente Strömungsfelder (lokal isotrope Strömung unter Laborbedingungen) zu erfassen und zu beschreiben.

Aktuell gibt es erste Tendenzen, die Turbulenzforschung in den Bereich der nichtstationären Strömung auszudehnen. Hierzu gab es bereits ein erstes DFG-Rundgespräch in Erlangen, wobei zunächst nur sich periodisch ändernde Strömungsbedingungen (also keine turbulenten Anströmbedingungen) diskutiert wurden. Auf dem Hintergrund der Turbulenzforschung wurden von den Antragstellern Kantz und Peinke erste Arbeiten zur Problematik der Windböen erstellt.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Zusammenarbeit erfolgte mit allen Projektpartnern des Verbundprojektes im Rahmen von regelmäßigen Treffen. Zusätzlich entwickelten sich aus diesem Projekt neue bzw. weitere Kooperationen, die von anderen Mitarbeitern umgesetzt wurden. Es gab keine weiteren Kooperationen mit anderen Parteien.

Literatur

- [1] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins and E. Bossanyi, Handbook of Wind Energy (Wiley, Chichester 2001).

- [2] Y. Chigirinskaya, D. Schertzer, S. Lovejoy, A. Lazarev, A. and A. Ordanovich, *Nonlinear Processes in Geophysics*, **1** , 105 (1994).
- [3] H. van Radecke *DEWI Magazin* **24**, 56 (2004)
- [4] T.J. Larsen, H.A. Madsen and K. Thomson. Active load Reduction Using Individual Pitch, Based on Local Blade Flow Measurements *Wind Energy*, 8(1):67–80 (2005).
- [5] L. Prandtl, K. Oswatitsch und K. Wieghardt, *Führer durch die Strömungslehre* (Vieweg, Braunschweig 1993)
- [6] J. Peinke, A. Kittel, S. Barth und M. Oberlack, *Progress in turbulence* (Springer, Berlin 2005).

2 Eingehende Darstellung

Die beiden Teilaufgaben, Freifeld- und Windkanalmessung, werden in den folgenden zwei Unterkapiteln einzeln dargestellt. Der Punkt Industrienormen ist der Aufgabe Freifeldmessung untergeordnet und wird in diesem Zusammenhang aufgeführt.

2.1 Eingehende Darstellung – Teilaufgabe: Freifeldmessung

2.1.1 Erzielte Ergebnisse (Freifeldmessung)

Aufnahme und Aufbereitung der Messdaten Bereits vor Beginn des Projekts wurde in einem Windpark in Meerhof bei Paderborn ein meteorologischer Messmast vor einer Windenergieanlage installiert. Die im Rahmen dieses Aufbaus gemessenen Daten bilden die Basis für das Teilprojekt Freifeldmessung / Leistungscharakteristik und wurden ebenfalls von den anderen Projektpartnern verwendet (Münster, Dresden). Der verwendete Mast hatte eine Höhe von 100 m und war mit zahlreichen Sensoren zur Aufnahme der Windgeschwindigkeit (verschiedene Schalenkreuz- und Ultraschallanemometer auf unterschiedlichen Höhen), der Windrichtung (zusätzliche Windfahnen), der Temperatur, der Luftfeuchte und des Luftdrucks ausgestattet. Parallel zu diesen meteorologischen Daten wurde die elektrische Leistungsabgabe einer 1,8 MW-Windenergieanlage (WEA) erfasst. Eine Skizze des Messaufbaus ist in Abb. 1 zu sehen.

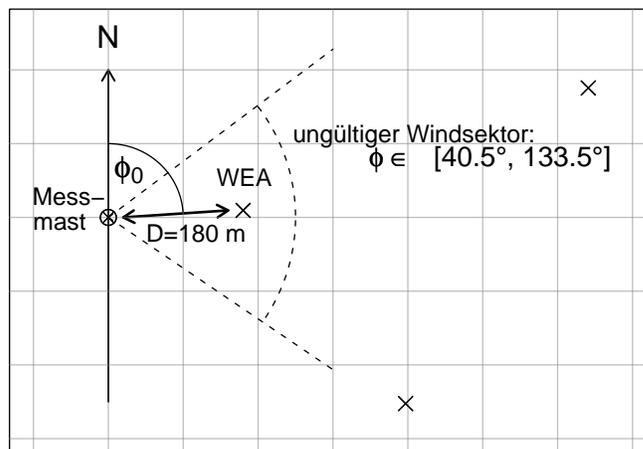


Abbildung 1: Anordnung des meteorologischen Messmasts vor der 1,8 MW-WEA. Benachbarte WEA sind ebenfalls durch Kreuze markiert.

Nach anfänglichen technischen Problemen und einer entsprechenden Verlängerung der Messkampagne, die durch die finanziellen Mittel dieses Projekts ermöglicht wurde, wurden ab Herbst 2005 über einen Zeitraum von sechs Monaten fast kontinuierlich Daten aufgenommen und in einer Datenbank ab-

Tabelle 1: Überblick über aufgenommene Datenpakete. Einzelne Sensoren sind wie folgt zusammengefasst: Schalenkreuzanemometer und Windfahnen auf verschiedenen Höhen als *ammonitdata*, Temperaturmessungen auf verschiedenen Höhen als *icpdata*, drei Komponenten (x, y, z) des Ultraschallanemometers auf Nabenhöhe der WEA als *usadata* bzw. des zweiten Ultraschallanemometers auf Höhe des unteren Blattspitzendurchgangs als *usadata2* und Leistungsdaten der WEA als *plmaster*.

Zeitraum	<i>ammonitdata</i>	<i>icpdata</i>	<i>usadata</i>	<i>usadata2</i>	<i>plmaster</i>
2004-05-11 bis 2004-07-07	-	57 Tage	57 Tage	57 Tage	-
2005-03-08 bis 2005-04-11	34 Tage	34 Tage	-	-	-
2005-04-15 bis 2005-04-23	8 Tage	8 Tage	-	-	-
2005-04-29 bis 2005-06-14	46 Tage	46 Tage	-	-	-
2005-06-17 bis 2005-08-16 2005-07-09 bis 2005-07-29 2005-07-23 bis 2005-07-29 2005-07-24 bis 2005-08-16 2005-05-30 bis 2005-08-18 2005-09-09 bis 2005-09-13	23 Tage	60 Tage	6 Tage	20 Tage	81 Tage 5 Tage
2005-10-17 bis 2006-04-05 2005-10-18 bis 2006-04-05 2006-01-28 bis 2006-04-05	170 Tage	170 Tage	170 Tage	67 Tage	169 Tage
insgesamt	281 Tage	375 Tage	233 Tage	144 Tage	255 Tage

gelegt. Zu betonen ist dabei, dass es sich für alle Sensoren um hochaufgelöste Daten (mit einer Frequenz von mind. 1 Hz) handelt. Tab. 1 gibt einen Überblick über die so gewonnenen Datenpakete.

Statistische Analyse Ziel des Teilprojekts “Freifeldmessung und Leistungscharakteristik” ist die Entwicklung eines dynamischen Leistungsmodells gewesen, das es erlaubt, den Einfluss kleinskaliger turbulenter Fluktuationen der Windgeschwindigkeit auf die Leistungsabgabe einer WEA zu beschreiben. Als Vorarbeit haben wir zunächst auf Basis der aufgenommenen Messdaten mehrere statistische Analysen durchgeführt, um den Begriff der turbulenten Fluktuationen näher zu spezifizieren.

In den technischen Standards für Windenergieanwendungen der Reihe IEC 61400 werden Windgeschwindigkeitszeitreihen typischerweise in Form von 10-Minuten-Mittelwerte $\bar{u}_{10\text{min}}$ und entsprechenden Turbulenzintensitäten I charakterisiert. Die Turbulenzintensität der Windgeschwindigkeit im jeweiligen 10-Minuten-Intervall ist definiert als $I = \sigma/\bar{u}$, wobei σ die Standardabweichung der Windgeschwindigkeit ist. Diese Definition eines einfachen Turbulenzmaßes lässt sich analog auf die gemessenen Leistungsdaten P übertragen. Abb. 2(a) und 3(a) zeigen die gemessenen Werte für die Turbulenzintensität der Windgeschwindigkeit bzw. der Leistung für die einzelnen 10-Minuten-Intervalle eines Gesamtzeitraums von 58 Tagen. Um die Aussagekraft der Turbulenzintensitäten

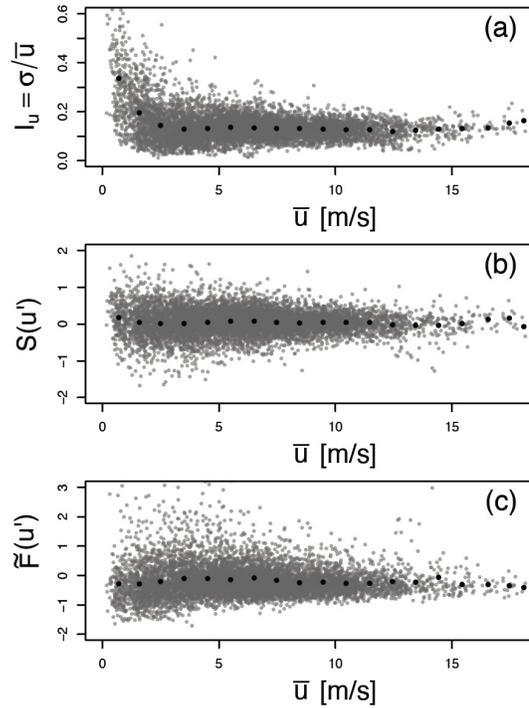


Abbildung 2: (a) Turbulenzintensität I für einer Windgeschwindigkeitszeitreihe $u(t)$, gemessen über einen Zeitraum von 58 Tagen und mit einer Frequenz von 1 Hz, als Funktion der jeweiligen 10-Minuten-Mittelwerts \bar{u} . (b) Schiefe S und (c) Wölbung (Exzess) \tilde{F} der entsprechenden Kurzzeitfluktuationen $u' = u - \bar{u}$ der einzelnen 10-Minuten-Intervalle. Die einzelnen Werte für jedes 10-Minuten-Intervall sind dargestellt durch die kleinen grauen Punkte. Die etwas größeren schwarzen Punkte kennzeichnen Mittelwerte für zusammengefasste Windgeschwindigkeitintervalle mit einer Intervallbreite von jeweils 1 m/s.

zu beurteilen, haben wir auch die Schiefe S sowie den Exzess \tilde{F} (Wölbung, flatness) der Verteilungen in den einzelnen Intervallen berechnet, siehe Abb. 2 und 3 (b–c). Man erkennt hier deutlich den Einfluss der Nichtlinearitäten der Leistungskennlinie, d.h. der Transferfunktion zwischen Windgeschwindigkeit und Leistungsabgabe. Insbesondere das Regelungsverhalten der WEA am Übergang zur Nennleistung, wo die Leistungsabgabe einen konstantem Wert für weiter ansteigende Windgeschwindigkeiten bis zur Abschaltung der Anlage annimmt, bestimmt den Transfer der turbulenten Fluktuationen von der Windgeschwindigkeit zur Leistung stark.

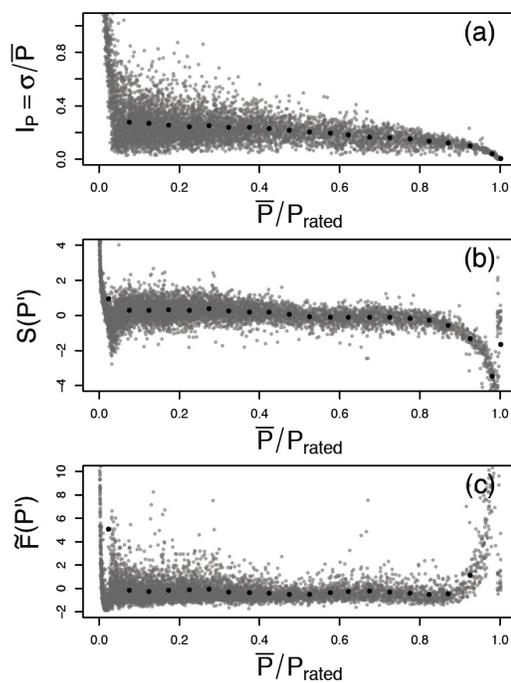


Abbildung 3: (a) Turbulenzintensität, (b) Schiefe und (c) Wölbung wie in Abb. 2, hier allerdings für die gemessene Leistungsabgabe $P(t)$. Einzelne Ergebnisse (graue Punkte) sind für Leistungsintervalle mit einer Breite von jeweils $0.1P_{\text{rated}}$ (P_{rated} bezeichnet die Nennleistung von hier 1,8 MW) zusammengefasst (schwarze Punkte).

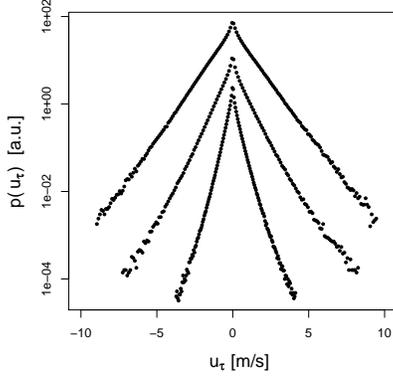


Abbildung 4: Verteilungen der Windgeschwindigkeitsinkremente u_τ für verschiedene Zeitspannen τ – von unten nach oben $\tau = 1$ s, $\tau = 5$ s und $\tau = 30$ s. (Wahrscheinlichkeiten $p(u_\tau)$ sind logarithmisch aufgetragen.)

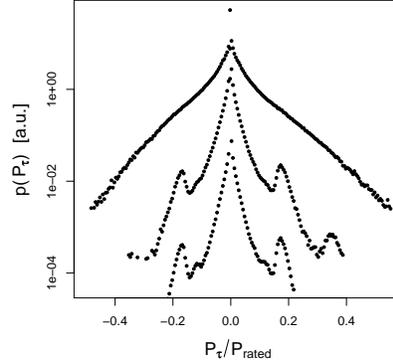


Abbildung 5: Verteilungen der Leistungsinkremente P_τ für verschiedene Zeitspannen τ – wie in Abb. 4 von unten nach oben $\tau = 1$ s, $\tau = 5$ s und $\tau = 30$ s. (Wahrscheinlichkeiten $p(P_\tau)$ sind logarithmisch aufgetragen.)

Alternativ hierzu lassen sich turbulente Fluktuation (im Hinblick auf Zweipunktstatistiken) als Inkremente der jeweiligen Messgröße beschreiben. Ein Windgeschwindigkeitsinkrement u_τ bzgl. einer Zeitspanne τ ist definiert als

$$u_\tau(t) = u(t + \tau) - u(t). \quad (1)$$

Für Leistungsinkremente gilt analog

$$P_\tau(t) = P(t + \tau) - P(t). \quad (2)$$

Untersucht man die Verteilungen der Windgeschwindigkeits- und Leistungsinkremente für verschiedene Werte von τ (Abb. 4–7), so fällt jedes Mal die intermittente Form auf. Intermittenz bedeutet hierbei, dass extreme Ereignisse (entsprechend den Flügeln der Verteilungen) deutlich häufiger auftreten, als man es auf Basis einer Normalverteilung mit der gleichen Standardabweichung erwarten würde. Eine starke Intermittenz wird durch einen hohen Wert für die Wölbung der Verteilung charakterisiert. (Eine Normalverteilung hat eine Wölbung von $F = 3$ bzw. einen Exzess von $\tilde{F} = F - 3 = 0$.) Aus Abb. 6 und 7 erkennt man, dass für größere Werte von τ die Inkrementverteilungen breiter werden (höhere Werte für die jeweilige Standardabweichung σ), aber gleichzeitig weniger intermittent (kleinere Werte für die Wölbung). Der Transfer dieses Verhaltens von den Windgeschwindigkeits- zu den Leistungsinkrementen wird durch die Dynamik der Leistungsumwandlung beschrieben, die wir im Folgenden mit Hilfe von stochastischen Differentialgleichungen modelliert haben.

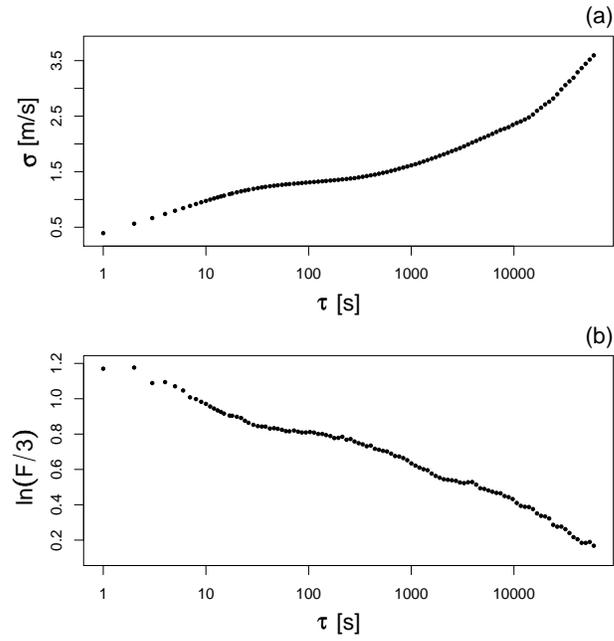


Abbildung 6: (a) Standardabweichung σ und (b) die Größe $\ln(F/3)$ für die Verteilungen der Windgeschwindigkeitsinkremente u_τ als Funktion der Zeitspanne τ .

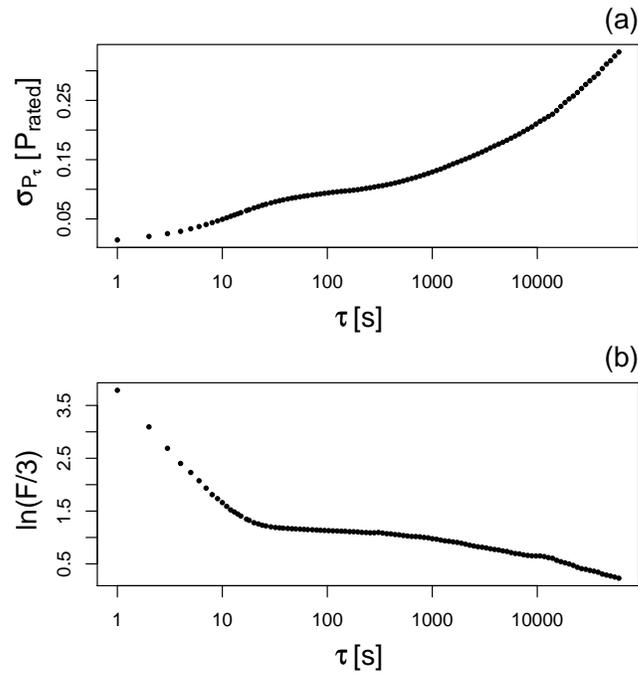


Abbildung 7: (a) Standardabweichung σ und (b) die Größe $\ln(F/3)$ für die Verteilungen der Leitungsinkremente P_τ als Funktion der Zeitspanne τ – analog zu Abb. 6 für die Windgeschwindigkeit.

Modellierung der Leistungsabgabe / dynamische Leistungskennlinie In Anlehnung an Vorarbeiten aus der Arbeitsgruppe haben wir für die dynamische Modellierung der Leistungsumwandlung einer WEA ein System eindimensionaler Langevin-Prozesse angenommen, die durch die folgenden stochastischen Differentialgleichungen gegeben sind:

$$\frac{d}{dt}P(t) = h_i(P, t) + \sqrt{g_i(P, t)} \Gamma_i(t) \quad (3)$$

für eine jeweils feste Windgeschwindigkeit u_i . Die Terme h_i und g_i sind hierbei beliebige Funktionen der Leistung P zum Zeitpunkt t , und $\Gamma_i(t)$ ist ein Rauschprozess. Die Windgeschwindigkeit ist in diesem Modell ein Parameter, angedeutet durch den Index i , stellt aber keine zweite Variable dar, so dass es sich hier effektiv um einen quasi-eindimensionalen Ansatz handelt. Die Konditionierung auf u_i wird umgesetzt, indem ein sog. Windgeschwindigkeits-Binning mit einer festen Bin- oder Intervallbreite eingeführt wird. Der deterministische Anteil der dynamischen Gleichung (3) beschreibt das Relaxationsverhalten des Systems hinsichtlich eines oder mehrerer Fixpunkte. Für nur einen Fixpunkt und einer linearen Relaxation, können wir z.B. schreiben:

$$h_i(P, t) = -\alpha_i[P(t) - P_{\text{FP}}(u_i)], \quad (4)$$

wobei α_i eine Relaxationskonstante ist und $P_{\text{FP}}(u_i)$ der Fixpunkt im Windgeschwindigkeitsintervall um u_i . Bei einem allgemeineren Relaxationsverhalten entspricht α_i einer beliebigen nichtlinearen Funktion der Differenz zwischen der tatsächlichen Leistung und dem jeweiligen Fixpunkt. Die Windgeschwindigkeitsfluktuationen wirken als treibende Kräfte in diesem Modell und führen eine Art Umschalten zwischen den einzelnen Windgeschwindigkeitsbins bzw. den jeweiligen eindimensionalen Langevin-Modellen dar.

Infolge der Annahme, dass Gleichung (3) einen Langevin-Prozess beschreibt und $\Gamma_i(t)$ dementsprechend eine Langevin-Kraft, definiert als normalverteiltes und δ -korreliertes weißes Rauschen (mit $\langle \Gamma_i(t) \rangle = 0$ und $\langle \Gamma_i(t_1) \Gamma_j(t_2) \rangle = 2\delta_{ij} \delta(t_1 - t_2)$), darstellt, entsprechen die Funktionen $h_i(P, t)$ und $g_i(P, t)$ sogenannten Drift- und Diffusionskoeffizienten, d.h. $h_i(P, t) \equiv D_i^{(1)}(P, t)$ und $g_i(P, t) \equiv D_i^{(2)}(P, t)$, die direkt aus den gemessenen Daten rekonstruiert werden können. Ein entsprechendes Verfahren wurde von Friedrich und Peinke eingeführt und in den vergangenen Jahren anhand von diversen, z.T. sehr unterschiedlichen Anwendungsbeispielen diskutiert.

Für die Anwendung auf den Prozess der Leistungsumwandlung einer WEA werden im Wesentlichen die bedingten Momente

$$M_{ij}^{(n)}(P, \tau) = \langle [P(t + \tau) - P(t)]^n | P(t) = P_j, u(t) = u_i \rangle \quad (5)$$

($n = 1, 2$) für jedes Windgeschwindigkeitsintervall u_i und die einzelnen Leistungsbins P_j , die durch ein zweites Binning festgelegt werden, berechnet und anschließend die entsprechenden Koeffizienten geschätzt. Dabei gilt

$$D_i^{(n)}(P) = \frac{1}{n!} \lim_{\tau \rightarrow 0} \frac{1}{\tau} M_{ij}^{(n)}(P, \tau) \quad (6)$$

– die Extrapolation wird mit einem linearen Fit durchgeführt. Die Fixpunkte der deterministischen Dynamik sind als Punkte mit verschwindendem Drift definiert, d.h.

$$D_i^{(1)}(P_{\text{FP}}) \equiv 0, \quad (7)$$

und werden über eine entsprechende Fixpunktanalyse bestimmt.

In weitergehenden Untersuchungen hat sich gezeigt, dass der Prozess der Leistungsumwandlung nur in grober Näherung durch einen Langevin-Prozess beschrieben und entsprechend rekonstruiert werden kann. Diese Einschränkung betrifft jedoch v.a. die Rekonstruktion des stochastischen Diffusionsanteils. Die Rekonstruktion des Driftkoeffizienten und insbesondere die anschließende Fixpunktanalyse ist weitgehend robust gegenüber dieser Unzulänglichkeit.

Die Funktionsweise des beschriebenen Rekonstruktionsverfahrens soll zunächst an einem numerischen Beispiel verdeutlicht werden. Dazu haben wir das Relaxationsmodell (3, 4) zusammen mit einer theoretischen Leistungskurve gemäß

$$P_{\text{FP}}(u) := \begin{cases} au^3 & \text{for } u < u_{\text{rated}} \\ P_{\text{rated}} & \text{for } u \geq u_{\text{rated}} \end{cases} \quad (8)$$

und einer gemessenen Windgeschwindigkeitszeitreihe integriert, um numerische Leistungsdaten zu erhalten. Die Konstante a in (8) setzt die Werte der Nennleistung und der entsprechenden Geschwindigkeit, bei der dieser Leistungswert erreicht wird, unter der Annahme eines stetigen Übergangs in Verbindung gemäß $a = P_{\text{rated}}/u_{\text{rated}}^3$. Abb. 8 veranschaulicht das benutzte Modell und gleichzeitig das, was wir im Folgenden unter dem Begriff der dynamischen Leistungscharakteristik verstehen. Die Pfeile stellen das Driftfeld dar, d.h. die Werte $D_i^{(1)}(P_j)$ für jedes Windgeschwindigkeits- und jedes Leistungsintervall u_i bzw. P_j , also die Relaxation auf die theoretische Leistungskurve. Die Leistungskennlinie entspricht den diskreten Fixpunkten $P_{\text{FP}}(u_i)$ für die jeweiligen einzelnen Windgeschwindigkeitsintervalle. Abb. 9 zeigt die Ergebnisse für die rekonstruierten Fixpunkte, die aus den numerischen Daten mit dem oben ausgeführten Rekonstruktionsverfahren gewonnen worden, im Vergleich zu der theoretischen Leistungskennlinie, die zuvor in das Modell gesteckt worden ist. Die Übereinstimmung ist in den meisten Bereichen sehr gut.

Abb. 10 zeigt die Ergebnisse für die gemessenen Windgeschwindigkeits- und Leistungsdaten. Dargestellt ist wieder die dynamische Leistungscharakteristik, bestehend aus dem rekonstruierten Driftfeld und den ermittelten Fixpunkten. Die Ergebnisse sind in dieser Form noch nicht zufrieden stellend gewesen, insbesondere sind die rekonstruierten Fixpunkte mit einer sehr großen Unsicherheit behaftet. Weitergehende Untersuchungen konnten zeigen, dass sich die Ergebnisse verbessern lassen, wenn man zunächst eine gleitende Mittelung als Filter auf die gemessenen Windgeschwindigkeitsdaten anwendet und dann erst die Rekonstruktion durchführt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abb. 11 gezeigt. Dieses Vorgehen lässt sich mit der Tatsache rechtfertigen, dass die Windgeschwindigkeit nur die Bedeutung eines Parameters, nicht aber einer zweiten Variablen des Prozesses hat. Im Allgemeinen lassen sich mit der Definition einer entsprechenden effektiven Windgeschwindigkeit noch weitere Aspekte in die

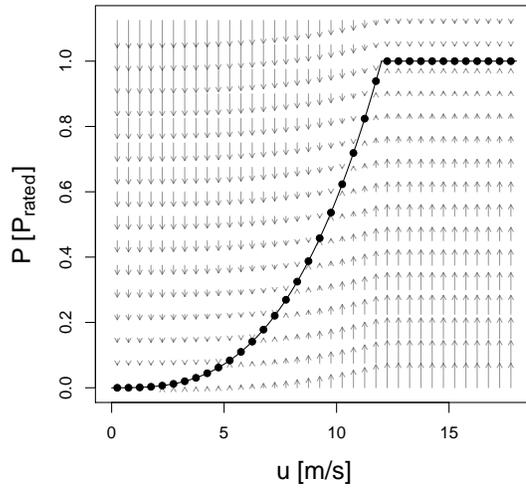


Abbildung 8: Veranschaulichung des verwendeten Relaxationsmodells. Pfeile stellen die Werte des Driftfelds $D_i^{(1)}(P_j)$ für die Windgeschwindigkeits- und Leistungsintervalle u_i bzw. P_j dar, die die Relaxation auf die theoretische Leistungskurve (Linie) beschreiben – hier für eine lineare Relaxationsfunktion mit $\alpha = 0.1$. Die Punkte kennzeichnen die Fixpunkte $P_{FP}(u_i)$ für die einzelnen Windgeschwindigkeitsintervalle.

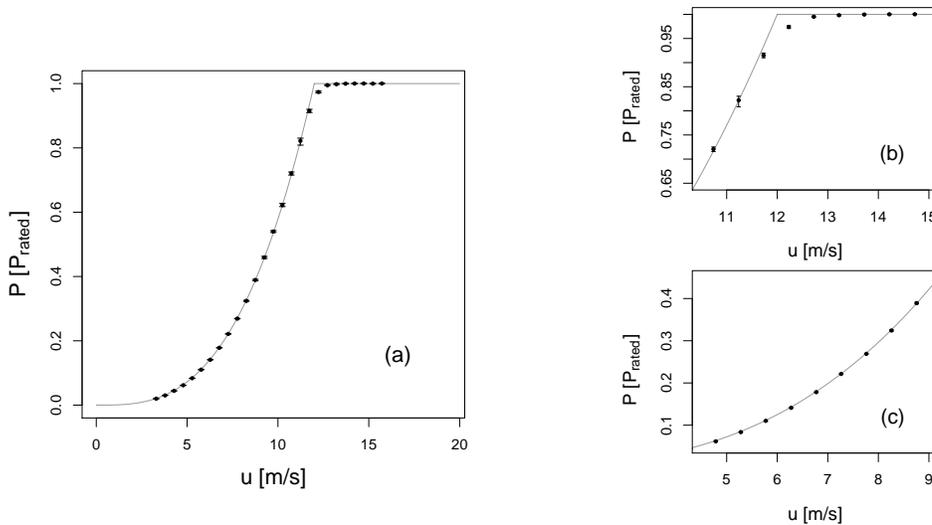


Abbildung 9: Rekonstruierte Fixpunkte (Punkte mit Fehlerbalken) für numerische Leistungsdaten, simuliert auf der Basis von gemessenen Windgeschwindigkeitsdaten (zehn zusammenhängende Tage, 10 Hz, mittlere Turbulenzintensität von 0.13), und theoretische Leistungskennlinie (Linie). Abb. (b) und (c) sind vergrößerte Ausschnitte der Gesamtkurve in (a).

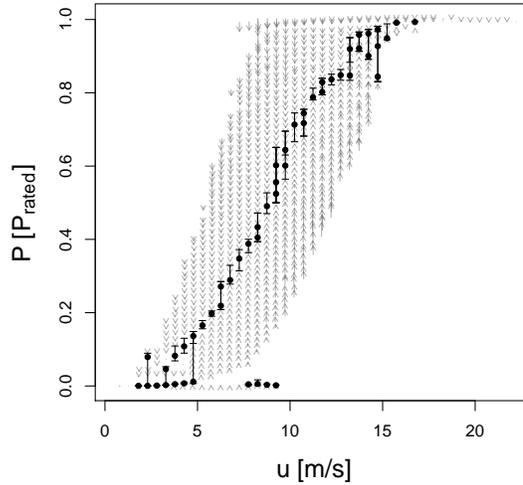


Abbildung 10: Dynamische Leistungscharakteristik (bestehend aus rekonstruiertem Driftfeld und den daraus ermittelten Fixpunkten – vgl. Abb. 8) für die gemessenen Windgeschwindigkeits- und Leistungsdaten.

Modellierung integrieren, wodurch letztendlich eine besserer Vergleichbarkeit der gewonnenen Ergebnisse für verschiedene Messungen bzw. Messaufbauten erzielt werden kann – darunter fällt die Normierung bzgl. der Luftdichte, wie sie auch im Standardverfahren nach IEC 61400-12 vorgesehen ist, genauso wie die Einbeziehung weiterer meteorologischer Größen wie z.B. der Windscherung. Letzteres konnten wir im Rahmen dieses Projekts allerdings nicht testen, da nicht genügend zuverlässige Daten zur Verfügung standen.

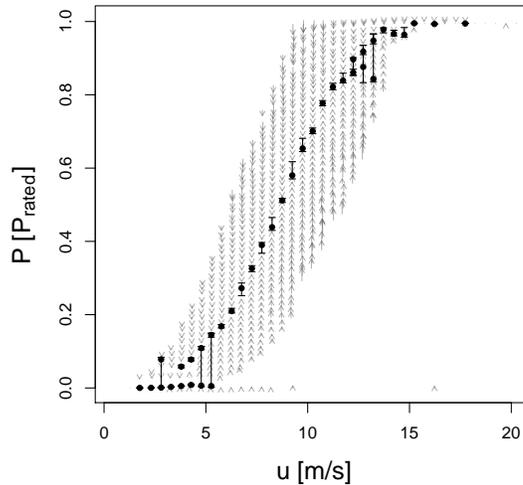


Abbildung 11: Dynamische Leistungscharakteristik nach Anwendung einer gleitenden Mittelung auf die Windgeschwindigkeitsdaten.

2.1.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse (Freifeldmessung)

Die erzielten Ergebnisse sowie die verfolgten neuartigen Ansätze haben bereits viel Aufmerksamkeit im Bereich der Windenergieforschung auf sich gezogen. Indiz hierfür sind die aufgeführten Veröffentlichungen und die damit teilweise verbundenen Auftritte auf internationalen Konferenzen. Es wird bereits daran gearbeitet, die Ergebnisse auch so aufzubereiten, dass sie einem breiteren Publikum zur Verfügung stehen – bzgl. einer konkreten technischen Verwertbarkeit anhand eines Norm-ähnlichen Verfahrens, wie es von der Industrie gewünscht wird, aber genauso bzgl. einer allgemeinen Verständlichkeit in Form von entsprechenden weiteren Artikeln. Zurzeit wird das Verfahren der dynamischen Kennlinienbestimmung zusammen mit einem Windparkbetreiber getestet, um ein allgemeines Monitoring von Windenergieanlagen durchzuführen.

2.1.3 Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen (Freifeldmessung)

Wesentliche Fortschritte auf diesem Gebiet bei anderen Stellen sind uns nicht bekannt. Vielmehr ist uns bekannt, dass verschiedene andere Forschungsgruppen unsere Arbeiten aufgegriffen bzw. nachprogrammiert haben.

2.1.4 Erfolge und geplante Publikationen (Freifeldmessung)

Auf der Basis der beschriebenen Freifeldmessung und der Auswertung der so erhaltenen Messdaten wurde mehrere Publikationen erstellt, die z.T. auch für

die an erster Stelle aufgelistete Dissertation verwendet wurden.

- J. Gottschall: Modelling the variability of complex systems by means of Langevin processes. Dissertation, Cral von Osiietzky Universität Oldenburg (eingereicht, 2008).
- J. Gottschall, E. Anahua, St. Barth, J. Peinke: Stochastic Modelling of Wind Speed Power Production Correlations. In: PAMM – Proc. Appl. Math. Mech. 6, 665–666 (2006).
- J. Gottschall, J. Peinke: Stochastic modelling of a wind turbine’s power output with special respect to turbulent dynamics. In: The Science of Making Torque from Wind – Journal of Physics: Conference Series 75, 012045 (2007).
- J. Gottschall, J. Peinke: How to improve the estimation of power curves for wind turbines. In: Environ. Res. Lett. 3, 015005 (2008).
- J. Gottschall, J. Peinke: Power curves for wind turbines – a dynamical approach. In: Proceedings EWEC 2008, Brussels.
- J. Gottschall, J. Peinke: Impact of atmospheric turbulence on the power output of wind turbines. In: Progress in Tubulence III, Springer (Proceedings iTi Conference on Tubulence 2008; z.Z. in Vorbereitung).
- J. Gottschall, J. Peinke: On the definition and handling of different drift and diffusion estimates. In: New Journal of Physics 10, 083034 (2008).

2.2 Eingehende Darstellung – Teilaufgabe: Windkanalmessung

2.2.1 Erzielte Ergebnisse (Windkanalmessung)

Bei Untersuchungen von Auftriebskräften an Flügelprofilen werden neben der direkten Kraftmessung auch häufig Druckverteilungen auf dem Flügel verwendet. Die Idee, den Auftrieb über die Druckverteilung auf den umgebenden Windkanalwänden zu erfassen, wurde bereits von D. Althaus 1980 zur Vermessung von Profilen unter niedrigen Reynoldszahlen eingesetzt [1, 2] und hat den großen Vorteil, dass am Profil selbst keine Messsensoren angebracht werden müssen. Bei diesem Verfahren entsteht ein dem Druck auf dem Flügelsegment entgegengesetzter Druck auf den Windkanalwänden, siehe Abbildung 12. Für eine zeitlich aufgelöste Messung reicht es allerdings nicht, Drucksammelrohre zu verwenden oder die Druckstellen einzeln nacheinander abzutasten. Hierfür, insbesondere bei Messungen unter stark instationären Bedingungen, muss die Druckverteilung über den Windkanalwänden simultan erfasst werden. Ein erster Versuchsaufbau wurde in der Diplomarbeit von T. Bohlen (AG Hydrodynamik und Windenergie, Universität Oldenburg, 2005) realisiert.

Ob dieses Messverfahren unter dynamischen Bedingungen einsetzbar ist – und insbesondere, ob die Ablösung von Turbulenzen im Bereich der starken Ablösung mit den Wanddrucksensoren interferiert und so das Ergebnis verfälscht –, konnte im Folgenden noch nicht gänzlich ausgeschlossen werden, da durch den Mangel an Dynamic-Stall-Messungen entsprechende Referenzen fehlen. Eine Arbeit von Noca et al. widerlegt dies jedoch theoretisch [4]. In weiteren Projekten sollte dies numerisch überprüft werden. Für die Vermessung der Auftriebsüberhöhung, was uns in diesem Projekt interessiert, scheint diese Methode gut geeignet zu sein.

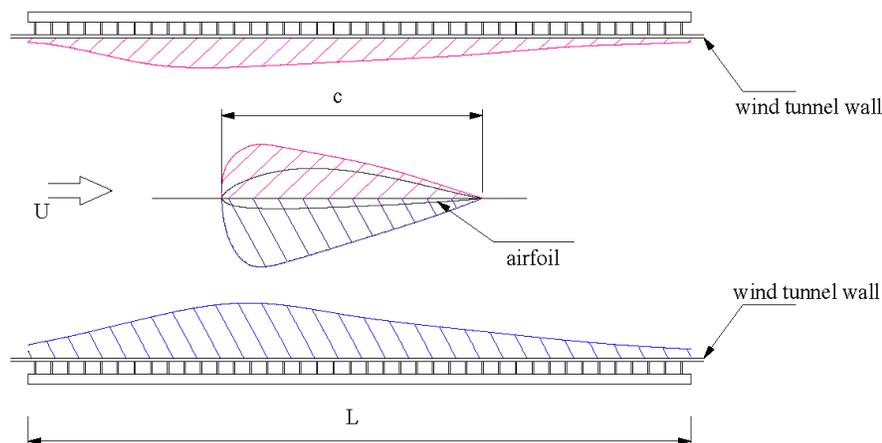


Abbildung 12: Darstellung der Druckverteilung auf einem Flügelsegment sowie der entsprechenden Gegendruck auf den Windkanalwänden.

Der Versuchsaufbau wurde im Laufe des Projektes stark weiterentwickelt. Dies betrifft zum einen die Datenaufnahme, da im ursprünglichen Versuch die Signale der 40 Sensoren einer Seite analog addiert und dann eingelesen wurden.

Der Nachteil besteht darin, dass der Kalibrierungsaufwand sehr hoch ist, defekte Sensoren nur sehr schwer ermittelt werden können und Laufzeitunterschiede nicht berücksichtigt werden können.

Somit wurde in einem ersten Schritt eine 80 Kanal A/D-Karte verwendet, damit alle 80 Sensoren einzeln abgetastet werden können. Durch diese Einzelaufnahme der Druckwerte konnten die einzelnen Drucksensoren entsprechend angepasst und modifiziert und somit optimiert werden, was besonders zur Unterdrückung von Messrauschen wichtig war. In einem weiteren Schritt wurde die Datenaufnahme von PCI- auf PXI-Karten umgestellt, was für eine Entlastung der eingesetzten Computer sorgt und für die Benutzung eines aktiven Gitters eine Grundvoraussetzung darstellt. Abbildung 13 zeigt die geschlossene Messstrecke mit dem installierten Flügelsegment.

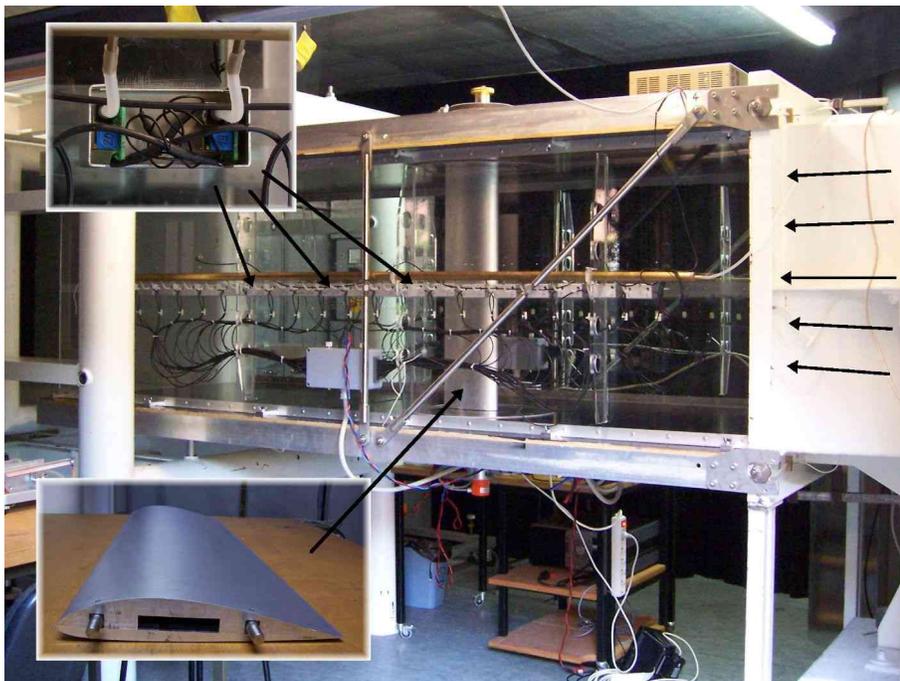


Abbildung 13: Im Windkanal eingebaute geschlossene Messstrecke. Vergrößert zu sehen sind zwei der entwickelten Drucksensoren sowie das FX79W161A Flügelsegment.

Charakterisierung des Standardprofils Um das Verfahren und die Funktionstüchtigkeit der geschlossenen Messstrecke mit den neu entwickelten Drucksensoren zu überprüfen, wurden Messungen unter statischen Bedingungen durchgeführt und somit Auftriebskurven für das verwendete Profil erstellt. Dabei wurde sowohl die Reproduzierbarkeit der Resultate, als auch die Übereinstimmung mit Literaturwerten überprüft.

Bei dem Profil handelt es sich um das FX79W161A-Profil mit einer Profildicke von 15,2% (siehe Abbildung 14; Profilkordinaten und Referenzwerte siehe [3]). Dieses Profil wurde auch für die numerischen Teilbereiche (DLR

Göttingen) verwendet, um einen Vergleich zwischen Numerik und Experiment zu ermöglichen.



Abbildung 14: Darstellung des Profils FX79W161A.

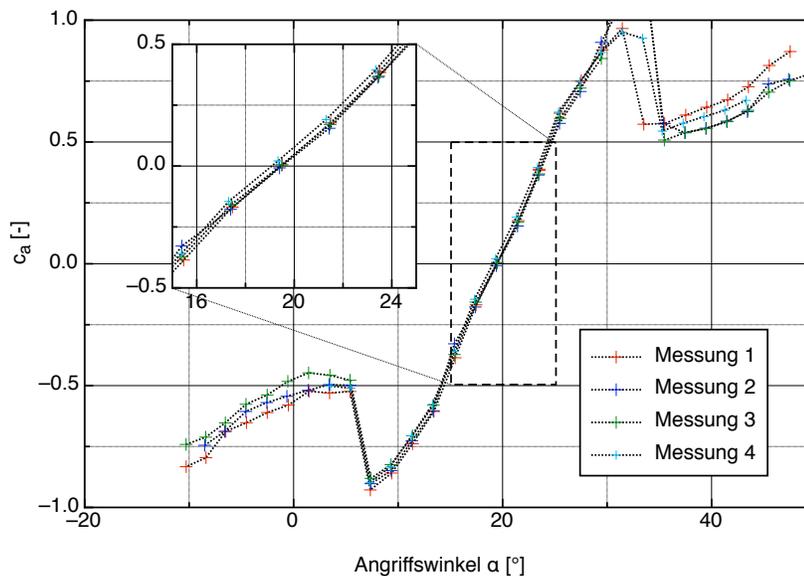


Abbildung 15: Auftriebskurven für eine Reynoldszahl von $Re = 4 \cdot 10^5$. Der Offset des Anströmwinkels wurde nicht verrechnet. Es zeigt sich eine gute Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Bei dem im Folgenden untersuchten Flügelsegment handelt es sich um einen zweiteiligen, gefräßten und polierten Flügel aus Aluminium mit einer Profiltiefe von 0,2 m, bestehend aus Ober- und Unterschale. Durch eine extrem hohe Passgenauigkeit sind Verbindungsfugen nicht zu erkennen. Die Schraubenlöcher zum Verbinden der beiden Flügelsegmente werden für Messungen jeweils abgedichtet. Durch die Herstellung mittels CNC-Technik wurde das vorgegebene Profil FX79W161A sehr gut reproduziert.

Zum Klären der Reproduzierbarkeit und der Übereinstimmung mit Literaturwerten wurden mehrere Auftriebskurven unter verschiedenen Reynoldszahlen aufgenommen. Dabei wurden die Drücke jeweils über 15 Sekunden gemessen und dann gemittelt. In der Regel wurden dabei Winkelbereiche von ca. -5° bis 20° abgefahren, da dies auch die Angriffswinkel sind, die unter realen Bedingungen erreicht werden und für die es auch Literaturwerte als Referenz gibt.

Abbildung 15 zeigt vier Messungen bei einer Reynoldszahl von $Re = 4 \cdot 10^5$,

die zu unterschiedlichen Zeiten genommen wurden. Der Angriffswinkel ist mit einem Offset behaftet. Deutlich erkennbar ist die hohe Übereinstimmung der vier Kurven und somit eine hohe Reproduzierbarkeit der Messungen. Erst im Bereich des Strömungsabrisses, der im Allgemeinen bei über 12° liegt, zeigen sich Unterschiede. Hier muss aber auch betont werden, dass durch das Ablösen von Wirbeln und Turbulenzen die Wanddrucksensoren beeinflusst werden und somit bei extremen Anstellwinkeln die Genauigkeit stark abnimmt.

In Abbildung 16 werden Auftriebskurven für eine Reynoldszahl von $Re = 6 \cdot 10^5$ mit dem entsprechenden Literaturwert verglichen. Auch hier ist die Übereinstimmung sehr gut, Abweichungen sind erst hinter dem Winkel der Strömungsablösung, also über 12° zu erkennen. Dabei kann aber auch nicht ausgeschlossen werden, dass diese Abweichungen durch unterschiedliche Randbedingungen zwischen der eigenen Messung und der Referenzmessung zustande kommen. Gründe können hier unterschiedliche Turbulenzgrade oder Oberflächen sein.

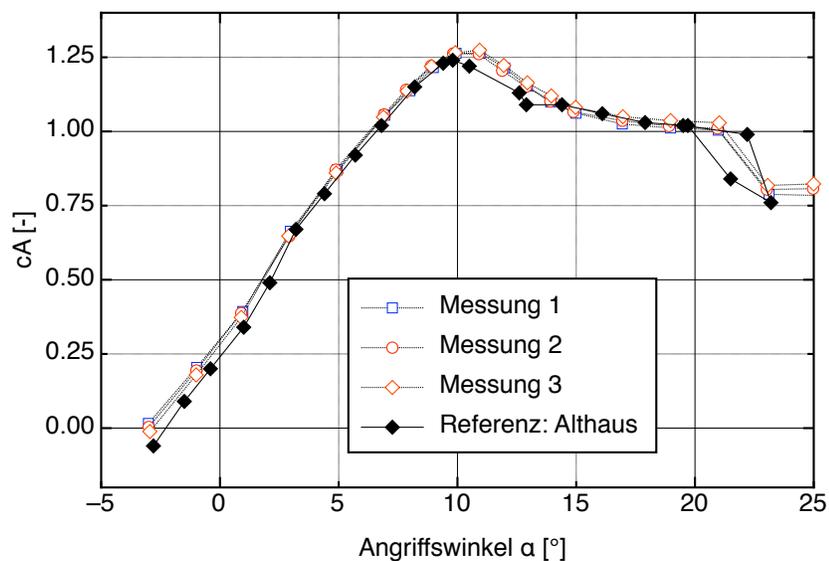


Abbildung 16: Auftriebskurven für eine Reynoldszahl von $Re = 6 \cdot 10^5$.

Experimente in laminarer Anströmung (mit periodischer Variation des Anströmwinkels) Nach den Experimenten unter festen Anstellwinkeln zum Validieren der Messmethodik wurde eine Reihe von Messungen mit variierenden Angriffswinkeln aufgenommen. Dabei wurde der Flügel mittels eines Schrittmotors auf der Oberseite der geschlossenen Messstrecke gedreht und die relative Winkeländerung über einen Winkelgeber an der Unterseite der Messstrecke gemessen. Die Winkeldaten wurden zusammen mit dem Vorkammerdruck (zum Ermitteln der Anströmgeschwindigkeit) aufgenommen. Mit einer zweiten A/D-Karte wurden die Signale aller 80 Wanddrucksensoren simultan erfasst.

Für den ersten Teil der Messungen wurde ein Programm zur Datenaufnahme in LabVIEW erstellt. Dieses Programm steuert sowohl den Anstellwinkel

des Flügels sinusförmig an und erfasste die Messsignale. Bei Messungen unter sinusförmigen Änderungen des Anstellwinkels gibt es drei zentrale Parameter. Dies ist die Reynoldszahl Re , welche durch die Anströmgeschwindigkeit u , die Flügeltiefe c und die dynamische Viskosität des Fluids ν bestimmt wird, der mittlere Anstellwinkel α , die Amplitude A sowie die Frequenz f . Für Vergleiche zwischen unterschiedlichen Versuchen wird häufig die reduzierte (dimensionslose) Frequenz k als Vergleichsparameter verwendet:

$$k = \frac{\pi \cdot f \cdot c}{u}. \quad (9)$$

Dies führt generell dazu, dass der Bereich, in dem man die Parameter Re und k variieren kann, beschränkt ist, da eine hohe Reynoldszahl erwünscht ist, diese aber zu geringeren reduzierten Frequenzen führt. Die maximale Frequenz ist bestimmt durch die maximal mögliche Beschleunigung des Flügelsegments und kann somit nicht beliebig erhöht werden.

Die Auswertung der Auftriebskurven wurde mittels eines Programms in der Skriptsprache Python durchgeführt. Dabei wurden die Daten kalibriert, Störsignale herausgefiltert und Laufzeitverzögerungen durch die unterschiedlichen Positionen der Drucksensoren zum Flügелеlement berücksichtigt.

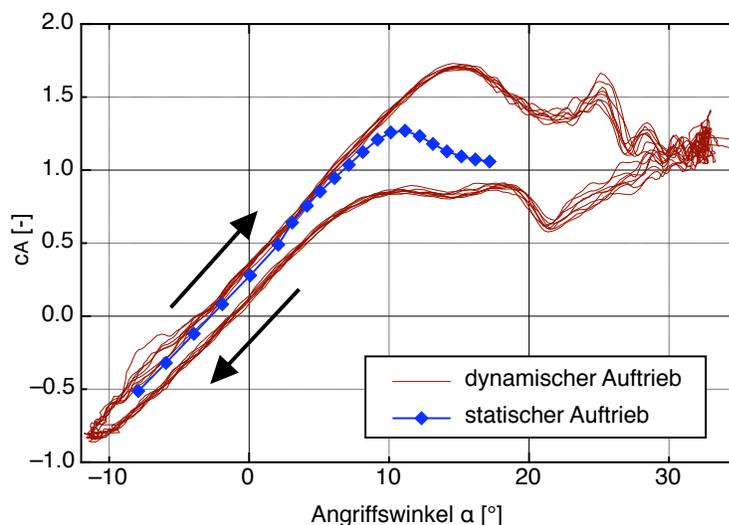


Abbildung 17: Vergleich von Auftriebskurven unter statischen und dynamischen Bedingungen ($Re = 6 \cdot 10^5$).

Abbildung 17 zeigt exemplarisch eine aufgenommene Auftriebskurve unter dynamischen Bedingungen sowie eine Vergleichskurve unter statischen Bedingungen. Zum einen ist hier deutlich die Auftriebsüberhöhung zu erkennen. So nimmt die Auftriebskraft erst deutlich nach dem Überschreiten des Winkels, ab dem der Strömungsabriss unter statischen Bedingungen einsetzt, ab und erreicht vorher einen Wert von $c_{a,max}^{dynamisch} \approx 1,7$ im Gegensatz zu $c_{a,max}^{statisch} \approx 1,25$ im statischen Fall. Zum anderen zeigt sich hier eine Hysteresekurve, welche

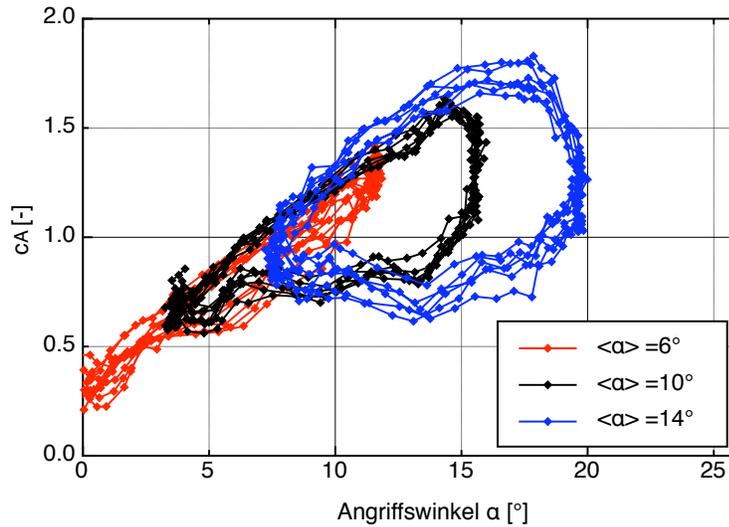


Abbildung 18: Messungen mit unterschiedlichem mittleren Anströmwinkel α . Die Amplitude beträgt $A = 6^\circ$, die Frequenz liegt bei $f = 3.05 \text{ Hz} \Rightarrow k = 0.064$. Das Flügelsegment wurde mit $u = 30 \text{ m/s}$ angeströmt.

von weiteren Minima und Maxima geprägt ist, welche durch die Ablösung von Wirbeln von der Saugseite des Flügels erklärbar sind.

Abbildung 18 und 19 zeigen Messungen, bei denen der mittlere Anstellwinkel bzw. die Drehfrequenz variiert wurde. So zeigt sich bei einer Verschiebung des mittleren Anströmungswinkels in Richtung des Bereichs der klassischen Strömungsablösung ($\alpha > 12^\circ$) eine deutlich spätere Verringerung der Auftriebskraft. Gleichzeitig vergrößert sich die Hysteresekurve. Bei einer Erhöhung der Pitchfrequenz steigt ebenfalls der maximal erreichbare Auftriebskoeffizient.

Durch verschiedene Faktoren wurde der Ablaufplan des Projektes stark verzögert. Dies beinhaltet Personalwechsel, Probleme des Aufbaus mit Rauschen und dem Modifizieren der Sensoren sowie die Umstellung der Hardware für die Datenaufnahme von einem PCI- zu einem PXI-System. Hierdurch konnten bisher keine nicht-sinusförmigen Anstellwinkelveränderungen durchgeführt werden.

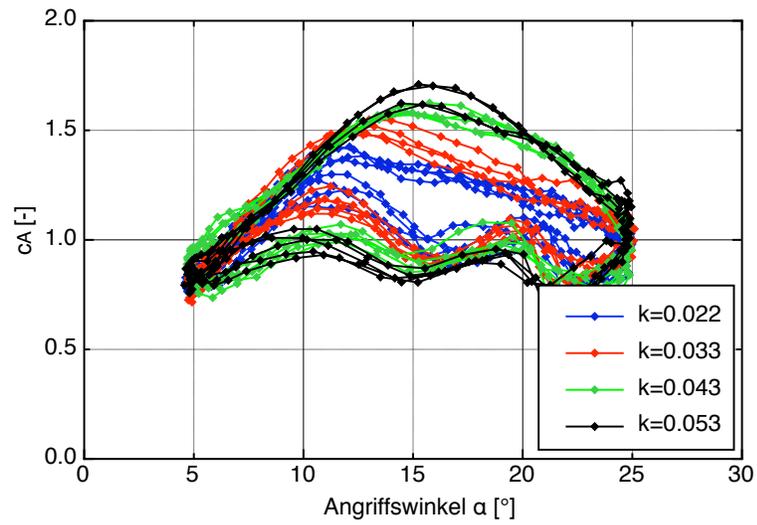


Abbildung 19: Messungen unter verschiedenen Oszillationsfrequenzen. Der mittlere Winkel liegt bei $\alpha = 15^\circ$ die Amplitude bei $A = 10^\circ$. Das Flügelsegment wurde mit $u = 50$ m/s angeströmt.

Phänomenologisches Lastmodell Um die Entwicklung des maximalen Auftriebswertes zu ermitteln, wurden Messungen gemacht, bei denen die Winkelgeschwindigkeit über dem Bereich des statischen Strömungsabriss konstant gehalten wurde. Dabei wurde die Drehgeschwindigkeit variiert. Wie zu erwarten war, steigt mit der Drehgeschwindigkeit auch der maximale Auftriebskoeffizient, bevor die Auftriebskraft stark abfällt. Dies ist mit der Zeit der Verschiebung des Ablösepunktes von der Hinterkante zur Vorderkante des Profils zu erklären.

Die gemessenen Ergebnisse für den maximalen Auftriebswert $c_{a,max}$ in Abhängigkeit von der Winkelgeschwindigkeit in $^\circ/s$ ist in Abbildung 2.2.1 aufgetragen. Als Fit findet man

$$c_{l,max} = 1,22 + 0,025 \exp(\dot{\alpha}/67). \quad (10)$$

Auch wenn es naheliegend ist, dass bei entsprechend hohen Winkelgeschwindigkeiten ein Maximum des Auftriebswertes gefunden werden kann, ist dies mit dem derzeitigen Versuchsaufbau nicht zu ermitteln, da hier die maximale Drehgeschwindigkeit eine Grenze darstellt. Weiterhin muss für ein Vergleich mit Messungen und Simulationen die Winkeldrehgeschwindigkeit in eine dimensionslose Winkelgeschwindigkeit umgerechnet werden.

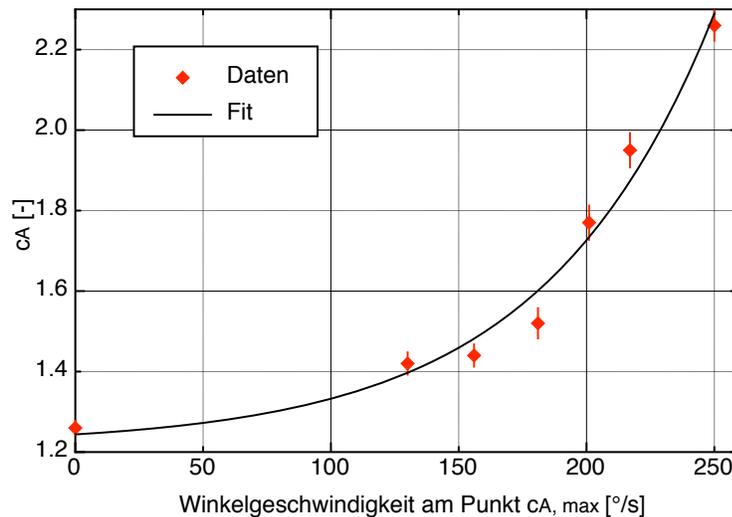


Abbildung 20: Im Windkanal eingebaute geschlossene Messstrecke.

Experimente in turbulenter Anströmung – Kontrollierte Erzeugung von Turbulenzen im Windkanal, Aktives Gitter

Zur künstlichen Erzeugung von Turbulenzen werden standardmäßig Gitter in die Strömung eingebracht. Die derart erzeugte Turbulenz besitzt bereits wenige Maschenweiten vom Gitter entfernt eine gleichförmige und in transversaler Richtung homogene Struktur mit einer niedrigen Anisotropie von weniger als 10 %. Diese Eigenschaften machen sie insbesondere zur Erforschung idealisierter Turbulenz, wie sie durch die Theorie von Kolomogorov beschrieben wird, interessant. Erste systematische Untersuchungen hierzu sind bereits in den vierziger und fünfziger Jahren des vorherigen Jahrhunderts u.a. von Batchelor und Townsend [5] durchgeführt wurden.

Als Nachteil der Gitterturbulenz erweist sich die Tatsache, dass sich nur niedrige Reynoldszahlen und relativ geringe Turbulenzintensitäten von typischerweise 5 % und weniger erzielen lassen. Die turbulenten Strukturen, die hierbei erzeugt werden können, sind im Wesentlichen durch die Maschenweite des Gitters sowie die Größe des Windkanals festgelegt. Die integrale Länge als Maß für die größte Wirbelstruktur liegt hierbei im Bereich einer Maschenweite.

Für Untersuchungen des Auftriebsverhaltens von Strömungskörpern in turbulenter Anströmung ist dieses Verfahren daher nur eingeschränkt anwendbar. Die Turbulenzgrade, die in der atmosphärischen Grenzschicht, dem Arbeitsumfeld von Windkraftanlagen, auftreten, liegen mit z.T. mehr als 20 % deutlich darüber. Eine weitere charakteristische Eigenschaft von natürlichen Windfeldern ist ein ausgedehnter Skalenbereich mit intermittenter Inkrementstatistik der Windgeschwindigkeit. Für unter Laborbedingungen mit Gittern erzeugte Turbulenz zeigen die Inkrementstatistiken bereits auf Skalenlängen der Gittermaschenweite eine gaußförmige Verteilung, während hingegen bei natürlichen Windfeldern der intermittente Charakter über einen größeren Skalenbereich erhalten bleibt [6] [7]. Von besonderem Interesse für das Auftriebsverhalten von Strömungsprofilen in turbulenter Strömung sind Turbulenzstrukturen, die in der Größenordnung der Profiltiefe liegen.

Um sowohl höhere, einstellbare Turbulenzgrade als auch die für atmosphärische Windfelder charakteristischen Inkrementstatistiken auf großen Zeitskalen im Experiment realisieren zu können, wurde für den Oldenburger Windkanal als Lösungsansatz ein *aktives Gitter* entwickelt. Dieses besteht im Unterschied zu herkömmlichen Gittern aus einer Gitterstruktur aus Achsen, an denen Flügелеlemente angebracht sind und die über Antriebe einzeln und unabhängig voneinander bewegt werden können. Durch eine geeignete Ansteuerung lassen sich so sowohl die Windgeschwindigkeit als auch der Turbulenzgrad gezielt manipulieren.

Das Konzept und die erste Realisierung eines aktiven Gitters stammt von Makita [8] (1991). Neuere Arbeiten zur Turbulenzgenerierung mit aktiven Gittern stammen von Mydlarski & Warhaft [9], Poorte [10], Kang [12] sowie Larssen [11]. Weitere Arbeiten hierzu sind nicht bekannt.

Das für den Oldenburger Windkanal verwirklichte aktive Gitter orientiert sich an dem Entwurf von Larssen und ist in Abbildung 21 zu sehen. Die Maschenweite des Gitters beträgt 11 cm. Es besteht aus sieben horizontal und neun vertikal angeordneten Stahlachsen, die über Schrittmotoren angetrieben

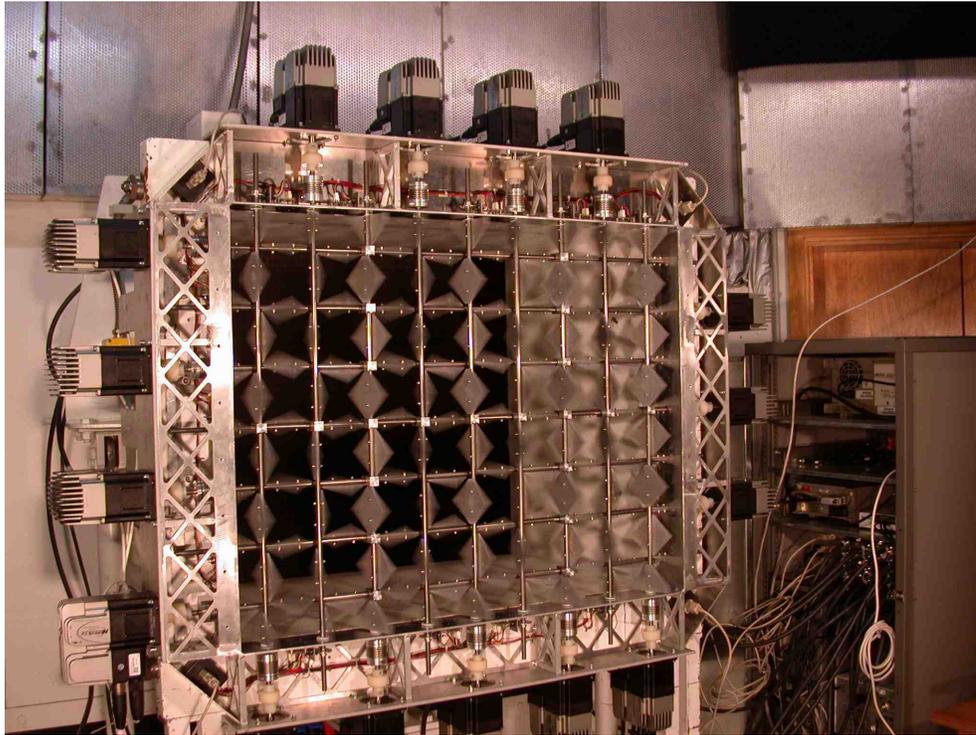


Abbildung 21: Aktives Gitter im Oldenburger Windkanal in Bewegung.

werden. Jeder Schrittmotor verfügt über eine eigene Leistungselektronik, so dass von außen nur Schritt- und Richtungssignal vorgegeben werden müssen. Beim Rahmen handelt sich um eine Aluminiumschweißkonstruktion. Die Motoren sind zur leichteren Montage und Demontage auf vier Leisten montiert, die einzeln am Rahmen befestigt werden. Die Antriebskopplung findet über eine Zahnkupplung aus Taschen- und Nabenteil sowie eine verwindungssteife Metallbalgkupplung statt. Die Antriebssteuerung der Motoren erfolgt über zwei PXI-Motion Control Karten von National Instruments. Über PXI-Busleitungen auf der Backplane des PXI-Chassis können die Karten mit den Messkarten synchronisiert werden. Die Motoren verfügen über eine eingebaute Encoderscheibe zur genauen Positionierung. Zusätzlich sind für Referenzpositionsfahrten Lichtschranken an jede Achse am Rahmen angebracht. Die Motion Control Karten werden über eine eigens hierfür in CVI/LabWindows erstellte Software unter MS Windows XP angesprochen. Für die Datenaufnahme, die rechnergestützte Windkanalsteuerung sowie die vorhandene Traversiereinrichtung sind ebenfalls neue Programme erstellt worden. Die Programme verfügen über eine ActiveX-Schnittstelle, so dass über ein hierfür beschafftes Testmanagementsystem von NI (Teststand) eine weitgehende Automatisierung aller Messabläufe und damit systematische Untersuchungen möglich sind. Über eine zusätzliche Treiberhardware ist es ebenfalls möglich, mit den Motion Control Karten unter Verzicht einer Achse des Gitters die Ansteuerung des Anstellwinkels des Profils zu übernehmen. Für beliebige Bewegungsabläufe werden im Speicher der Karten Schrittwerte gespeichert. Im sogenannten Contouringmodus entspricht jede

Schrittvorgabe einer Zeitdifferenz von 10 ms. Der in den Karten integrierte DSP interpoliert zwischen den Schrittvorgaben mittels einer Splinefunktion zusätzliche Werte, woraus das Taktsignal für die Schritte erzeugt wird. Hierdurch können nahezu beliebige Bewegungsmuster der Achsen über einen Zeitraum von zwei Wochen realisiert werden. Begrenzt wird das System in dieser Hinsicht nur durch die Zeitauflösung der Positionsvorgaben sowie das maximale Drehmoment der Motoren.

Die bislang am aktiven Gitter durchgeführten Untersuchungen konnten zeigen, dass sich die angestrebten Ziele realisieren lassen. Die im Experiment ermittelten Turbulenzgrade liegen ca. 10 Maschenweiten vom Gitter entfernt je nach Anstellwinkel bzw. dynamischer Ansteuerung zwischen 5% und 40%. Abbildung

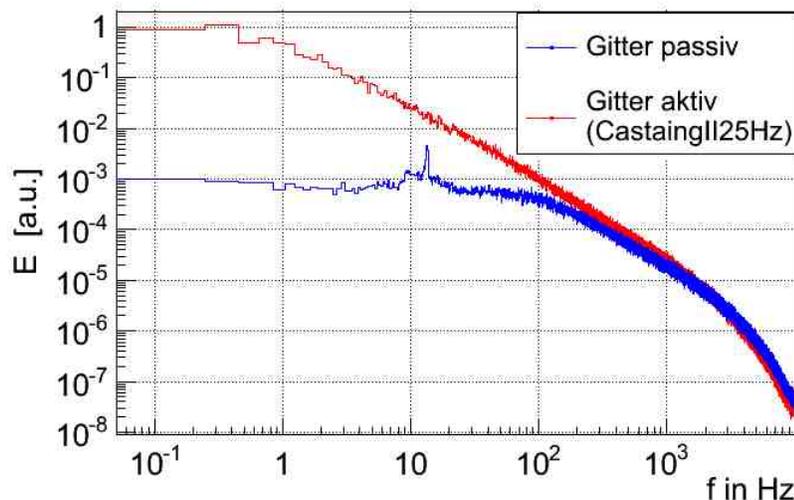


Abbildung 22: Vergleich von Leistungsspektren für aktiven und passiven Fall, Aufnahme­frequenz: 20 kHz, Tiefpassfilter: 10 kHz.

22 zeigt den Vergleich der Leistungsspektren für das aktive Gitter und das aktive Gitter im passiven Fall, d.h. mit dem kleinstmöglichen Versperrungsgrad ohne Achsbewegung. Während im passiven Fall der Inertialbereich mit einer konstanten Skalenabhängigkeit über eine Dekade verläuft, ist dieser Bereich im Fall des aktiven Gitters mit drei Dekaden deutlich erweitert. Die dargestellten Resultate basieren dabei auf Hitzdrahtmessungen über einen Messzeitraum von 5 Minuten mit einer Aufnahme­frequenz von 20 kHz. Die Hitzdrahtsonde war ca. 12 Maschenweiten vom Gitter entfernt. Die Achsen des Gitters wurden im aktiven Fall unabhängig voneinander stochastisch angeregt. In Abbildung 23 sind die zugehörigen Inkrementstatistiken dargestellt. Während im passiven Fall bereits bei 2,5 ms ein Übergang zur Gaußverteilung stattfindet, tritt dieser für das aktive Gitter erst bei Inkrementwerten von mehr als 50 ms auf. Die eingestellte Windgeschwindigkeit bei freier Strömung betrug in beiden Fällen 22 ms^{-1} , die mittlere Windgeschwindigkeit nach dem Gitter liegt bei 15 ms^{-1} bzw. 11 ms^{-1} (das aktive Gitter hat eine höhere Versperrung).

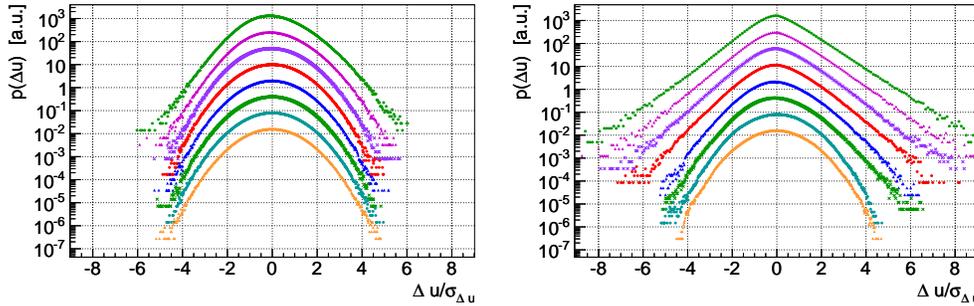


Abbildung 23: Normierte Inkrementverteilungen (für Zeitinkremente von $5 \cdot 10^{-4}$ bis $5 \cdot 10^{-1}$ - von oben nach unten) für passiven (links) und aktiven (rechts) Fall hinter aktiven Gitter. Die Verteilungen sind mit der Standardabweichung skaliert und zur besseren Darstellung gegeneinander verschoben.

Für Auftriebsuntersuchungen an einem Strömungsprofil ist es hinsichtlich definierter Bedingungen von Vorteil, über den Anströmbereich ein homogenes Turbulenzfeld mit konstanter mittlerer Windgeschwindigkeit zu erhalten. Abbildung 24 zeigt die mittlere Windgeschwindigkeit sowie den Turbulenzgrad in Abhängigkeit von der horizontalen Entfernung von der Mitte quer zur Hauptströmungsrichtung in einem Abstand von ca. 12 Maschenweiten hinter dem Gitter. Innerhalb eines Bereichs von 30 cm beträgt die maximale Abweichung von der mittleren Windgeschwindigkeit 4,5%. Für die Turbulenzintensität liegt die Abweichung bei ca. 12,5%. Für den zentralen Bereich von ± 10 cm sind

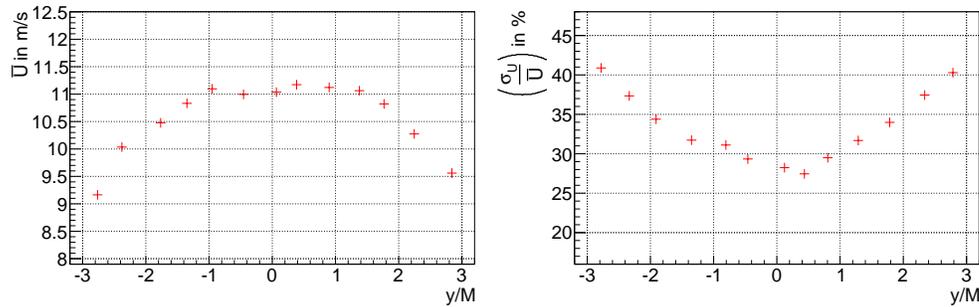


Abbildung 24: Untersuchung der Homogenität bei aktiver Ansteuerung: links mittlere Geschwindigkeit, rechts Turbulenzintensität in Abhängigkeit von der transversalen Position ca. 12 Maschenweiten (M) hinter dem Gitter.

in Abbildung 25 die Verteilung der Windgeschwindigkeit sowie die zugehörigen Leistungsspektren dargestellt. Diese Ergebnisse zeigen, dass nur innerhalb eines eng begrenzten Bereichs die Homogenitätsforderung als erfüllt betrachtet werden kann. In einer weiteren Messreihe ist zusätzlich untersucht worden, inwieweit ein Geschwindigkeitsgradient mithilfe des aktiven Gitters gezielt erzeugt werden kann. Dies wäre insbesondere für eine experimentelle Modellierung des Windgeschwindigkeitsgradienten der Atmosphäre unter Laborbedingungen interessant. Hierzu wurden die vertikalen Achsen auf einen festen Anstellwinkel

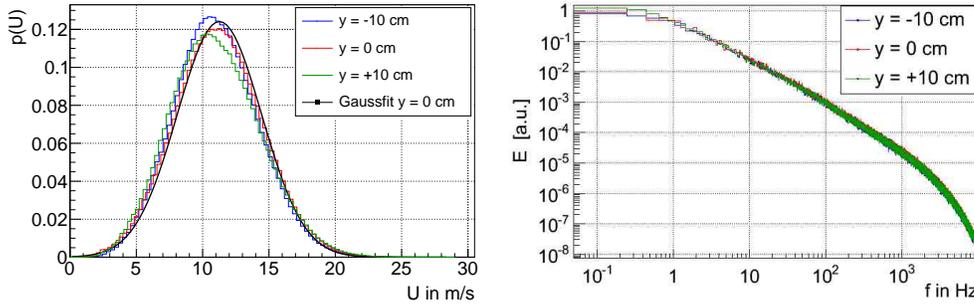


Abbildung 25: Untersuchung der Homogenität bei aktiver Ansteuerung: (links) Verteilung der Geschwindigkeit U , (rechts) zugehörige Leistungsspektren für unterschiedliche Positionen.

von 0 bis 80 Grad in Schritten von 10 Grad eingestellt und nur die horizontalen Achsen stochastisch angeregt. Das Messresultat ist in Abbildung 26 dargestellt. Der ansatzweise lineare Verlauf der Turbulenzintensität als auch der mittleren Windgeschwindigkeit legen nahe, dass durch geeignete Wahl der Ansteuerung ein über einen größeren Bereich homogenes Geschwindigkeitsfeld erzielt werden kann.

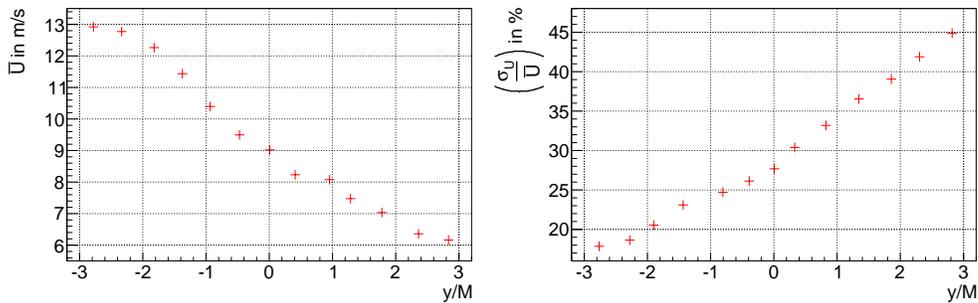


Abbildung 26: Gradient: links Geschwindigkeit, rechts Turbulenzintensität in Abhängigkeit von der Position.

Bei den für das aktive Gitter dargestellten Messresultaten ist zu beachten, dass diese bei offener Messstrecke durchgeführt wurden. Die Messung von Auftriebskräften über die Wanddrucksensoren erfolgt jedoch ausschließlich bei geschlossener Messstrecke. Das aktive Gitter, das nach der Fertigstellung der geschlossenen Messstrecke und dem Aufbau zu Dynamic Stall-Messungen begonnen wurde, ist entsprechend so vorbereitet, dass beide in Kombination in den Windkanal eingebaut werden können. Bevor solche Messungen durchgeführt werden können, ist das Verfahren der Auftriebsmessung über die Druckverteilung an den Wänden in turbulenter Anströmung kritisch zu untersuchen. Die Problematik hierfür ist die Tatsache, dass durch den Betrieb des Gitters teilweise große statische Druckschwankungen auftreten. Die Erkenntnisse aus dem bisherigen Aufbau zur Messung der Auftriebskräfte stellen jedoch eine wichtige Basis für spätere Modifikationen und notwendige Anpassungen an Messungen in

turbulenter Anströmung dar. Insbesondere können neue, geeignetere Messmethoden bei denen die Kräfte direkt am Flügelprofil bestimmt werden, mit den hier vorgestellten später abgeglichen werden.

Vergleich mit Simulationen Prinzipiell können die Versuchsergebnisse mit numerischen Messungen verglichen werden, wobei jedoch die unterschiedlichen Reynoldszahlen ein mögliches Problem darstellen.

Darum wurden zusätzlich bei einem festen Anstellwinkel von 12° Hitzdrahtmessungen über der Saugseite des Flügels durchgeführt, um an unterschiedlichen Stellen über dem Flügel Mittelwerte und Turbulenzintensitäten zu erhalten und um diese dann mit numerischen Berechnungen vergleichen zu können. Diese Messung wurde bereits durchgeführt, ein großer Teil der Messwerte muss jedoch für eine weitere Untersuchung noch kalibriert und ausgewertet werden.

Literatur

- [1] D. Althaus. Measurement of lift and drag in the laminar wind tunnel
<http://www.iag.uni-stuttgart.de/laminarwindkanal/pdf-dateien/liftdrag2.pdf>
- [2] D. Althaus. Tunnel-wall corrections at the laminar wind tunnel
<http://www.iag.uni-stuttgart.de/laminarwindkanal/pdf-dateien/corrections.pdf>
- [3] D. Althaus and F. X. Wortmann. 1981 *Stuttgarter Profilkatalog I* (Vieweg Verlag)
- [4] F. Noca, D. Shiels and D. Jeon. A Comparison of Methods for Evaluating Time-Dependent Fluid Dynamic Forces on Bodies, Using Only Velocity Fields and Their Derivates. *Journal of Fluids and Structures*, **13**, 551-578 (1999)
- [5] G. K. Batchelor, The theory of homogenous turbulence, Cambridge University Press (1953)
- [6] F. Boettcher, Ch. Renner, H.-P. Waldl and J. Peinke, On the statistics of wind gusts, *Boundary-Layer Meteorology* 108, 163-173 (2003)
- [7] F. Boettcher, Statistische Analyse der atmosphärischen Turbulenz und allgemeiner stochastischer Prozesse, PhD thesis, Universität Oldenburg (2005)
- [8] H. Makita, Realization of a large-scale turbulence field in a small wind tunnel, *Fluid Dyn. Res.* 8, 53-64 (1991)
- [9] L. Mydlarski and Z. Warhaft, On the onset of high-Reynolds-number grid-generated wind tunnel turbulence, *J.Fluid Mech.* 320, 331-368 (1996)
- [10] R. E. G. Poorte, On the motion of bubbles in active grid generated turbulent flows, PhD thesis, University of Twente (1998)

- [11] J. V. Larssen, Large Scale Homogenous Turbulence and Interactions with a Flat-Plate Cascade, PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg (2005)
- [12] H. S. Kang, S. Chester and C. Meneveau, Decaying turbulence in an active-grid-generated flow and comparisons with large-eddy simulation, J. Fluid Mech., vol 480, pp. 129-160 (2003)

2.2.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse (Windkanalmessung)

Mit dem vollzogenen Aufbau eines turbulenten Windkanals. bei dem sich die Turbulenzen einstellen lassen. ermöglicht eine Vielzahl von neuen experimentellen Untersuchungen. Mit dem Aufbau ist es möglich Windsituationen aus Freifeldmessungen im Labormaßstab nachzubilden. Das aktuelle Thema der mechanischen Lasten die turbulente Anströmbedingungen bewirken können nun im Labor untersucht werden. Intelligente Rotorblätter die durch adaptive Veränderungen Lastschwankungen ausgleichen sollen können somit ebenfalls in unserem Windkanal untersucht bzw. entwickelt werden. Es bestehen erste Vorgespräche dieses Konzept des aktiven Gitters in einem größeren industriellen Windkanal ebenfalls aufzubauen.

2.2.3 Fortschritte auf dem Gebiet bei anderen Stellen (Windkanalmessung)

Es ist ein wachsendes Interesse an der Umströmung von Rotorblättern von Windkraftanlagen zu verzeichnen. Die Messungen des EU Projekts Mexico werden zur Zeit von internationalen Gruppen analysiert. Hier wurde eine kleine Windkraftanlage in den Deutsch-Niederländische Windkanal (DNW) mit unterschiedlichen Methoden vermessen, wobei die Anlage laminar angeströmt wurde. Zur Zeit werden viele numerische Anstrengungen unternommen diese Messungen nach zu modellieren. Der in dem hier beschriebenen Antrag vollzogene Aufbau einer einstellbaren turbulenten Anströmung stellt eine wichtige Ergänzung dar und ist für die Windenergieforschung einzigartig.

2.2.4 Erfolgte und geplante Publikationen (Windkanalmessung)

**ICIAM2007: 6th International Congress on Industrial and Applied Mathematics,
ETH Zürich, Schweiz**

- Proceeding Paper:
G. Wolken-Möhlmann, J. Peinke and St. Barth:
Dynamic-lift measurements of airfoils

**TWind07: The Science of Making Torque from Wind, Lyngby,
Dänemark**

- Proceeding Paper:
G. Wolken-Möhlmann, P. Knebel, St. Barth and Joachim Peinke:
*Dynamic lift measurements on an FX79W151A airfoil via pressure
distribution on the wind tunnel walls*
- Publikation zum aktiven Gitter in Vorbereitung