
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