

# Turbulenz und Windenergie

Von Joachim Peinke und Julia Gottschall

In diesem Beitrag wird zunächst geklärt, was Turbulenz ist und welche besonderen Eigenschaften turbulente Strömungen haben. Insbesondere wird auf die Charakterisierung der turbulenten Unordnung mit anomalen Statistiken eingegangen. Im Hinblick auf das Thema Erneuerbare Energien werden Windböen als Turbulenzphänomen charakterisiert. Zum Schluss geht es um die Auswirkungen von Windturbulenzen auf Windenergieanlagen.



Zeichnung einer turbulenten Bachströmung von Leonardo da Vinci.

This article first explains what turbulence is and what characteristics turbulent flows have. Special attention is paid to the characterization of turbulent disorder with anomalous statistics. Wind gusts are then described as turbulence phenomena, and finally the authors turn to the effects of wind turbulence on wind energy plants.

**T**urbulenz bezeichnet einen Strömungszustand, der durch Unordnung geprägt ist. Allein durch die Beobachtung von turbulenten Strömungen, zum Beispiel der Wolkendynamik oder des Fließens von Wasser, ist zu erkennen, dass in der Turbulenz große und kleine Wirbel miteinander in Wechselwirkung stehen. Diese Erkenntnis hatte schon Leonardo da Vinci (1452-1519), was seine Darstellung einer Bachströmung belegt. Der Engländer Lewis Richardson (1881-1953) entwickelte 1922 aus Wolkenbeobachtungen die Kaskadenidee für die wissenschaftliche Modellierung der Turbulenz. In einer kaskadenartigen Struktur erzeugen große Wirbel kleinere Wirbel, ebenso wie die kleineren noch kleinere erzeugen. Die Struktur ineinander verschachtelter Wirbel, vergleichbar mit der Puppe in der Puppe, erzeugt die turbulente Bewegung des Wassers oder der Luft bzw. des Fluids. Diese Wirbelkaskade wird durch einen stetigen Energiefluss, der fortwährend große Wirbel erzeugt, aufrechterhalten. Diese verwirbelte, turbulente Struktur führt dazu, dass Fluidteilchen eine sehr komplexe ungeordnete Bewegung vollführen, was die viel genutzte Mischeigenschaften von turbulenten Strömungen begründet.

Die turbulente Kaskade und deren hervorragende Mischeigenschaft nutzen wir oft im alltäglichen Leben. Mit dem Umrühren des morgendlichen Kaffees starten wir mit

einem kleinen Turbulenzexperiment den Tag. Auf der großen Längenskala der Tasse erzeugen wir mit der Rührbewegung des Löffels einen großen Wirbel, der instabil ist und in einem kaskadenartigen Prozess kleinere Wirbel erzeugt, die ihrerseits noch kleinere Wirbel erzeugen und so sehr schnell und effektiv mittels turbulenter Strömung den Kaffee mit Milch oder Zucker mischen. Eine andere langsame, aber sehr anschauliche Weise, die Milch im Kaffee zu mischen, ist die durch Konvektion getriebene Turbulenz. Hierzu gießt man vorsichtig etwas Milch in den Kaffee und wartet ab, bis sich die Konvektion einstellt. Warme Fluidteilchen aus dem unteren Bereich der Tasse steigen auf, während die an der Oberfläche und an den Rändern abgekühlten Fluidteilchen absinken, was wiederum zu Wirbeln und Turbulenz führt.

Derartige turbulente Strömungen finden wir auch in der Atmosphäre und im Wetter. Von Satelliten aufgenommene Wetterbilder belegen ausgeprägte Wirbelstrukturen. Für die atmosphärische Strömung ist im Wesentlichen die Sonne als Energielieferant bzw. als Motor zu nennen. Es ist die Sonnenenergie, die zur Aufwärmung des Bodens und der Luft führt und damit turbulente Konvektionen und Winde antreibt.

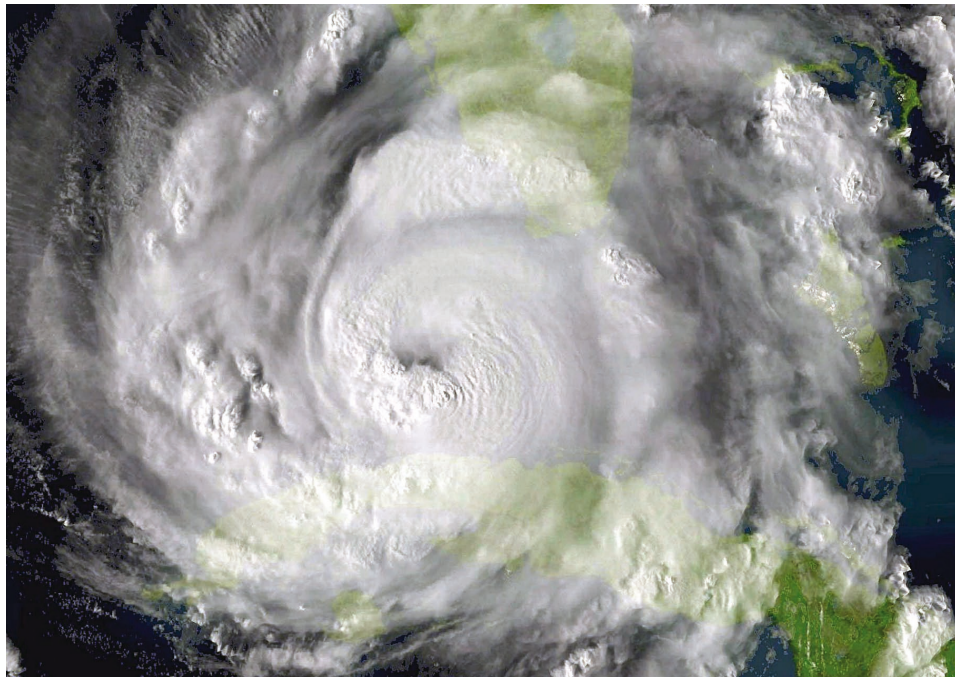
Der Unterschied in der turbulenten Strömung in einer Kaffeetasse und in der Atmosphäre besteht im Wesentlichen in der Stärke der

Turbulenz. Die Stärke kann durch die Größe der Reynoldszahl quantifiziert werden. Die Reynoldszahl berechnet sich aus der typischen Geschwindigkeit  $u$  des Fluids, der Größe  $L$  der Strömung und der kinematischen Viskosität  $\nu$  des Fluids, also den Materialeigenschaften, gemäß  $Re = uL/\nu$ .

**Bewegte Blätter**

Für die Tasse können wir mit der Geschwindigkeit des Kaffees von ungefähr  $u = 0,01 \text{ m/sec}$ , mit der Tassengröße von ungefähr  $L = 0,05 \text{ m}$  und einer kinematischen Viskosität von  $\nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$  eine Reynoldszahl von

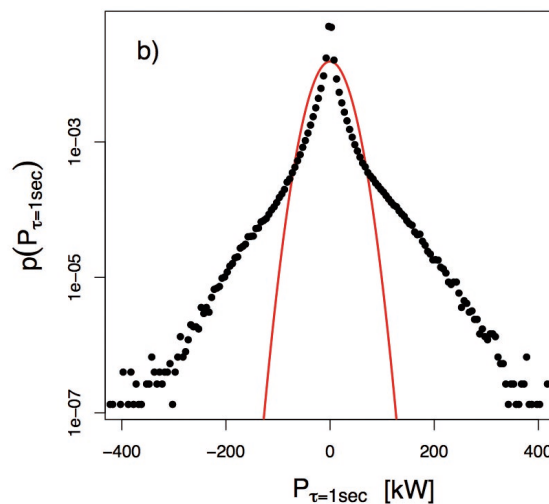
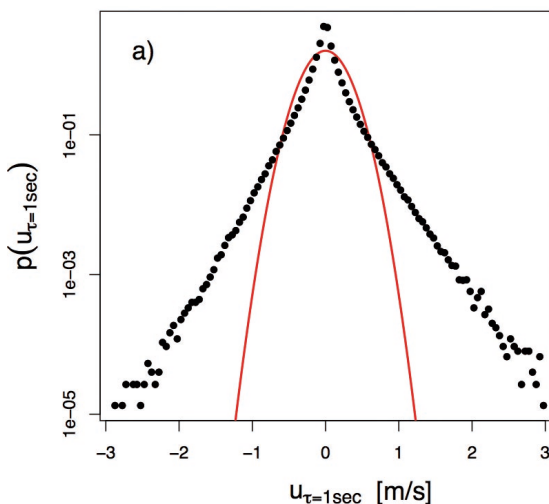
$Re \approx 500$  abschätzen; während für die atmosphärische Turbulenz die Reynoldszahl mit  $Re \approx 10^{10}$  um vieles größer ist. Große Reynoldszahlen ändern nicht das Prinzip der Turbulenz mit der kaskadenartigen Wirbelstruktur. Große Reynoldszahlen bedeuten, dass der Unterschied zwischen dem größten und kleinsten Wirbel größer wird, was bei festgehaltener größter Länge bedeutet, dass mit zunehmender Reynoldszahl immer kleinere Wirbel entstehen. Das schnellere Umrühren des Kaffees erhöht über die Geschwindigkeit des Kaffees die Reynoldszahl. Der größte Wirbel hat weiterhin die Größe



Ausgeprägte Wirbelstrukturen: Ein vom Satelliten aufgenommenes Wetterbild.

der Tasse. Eine stärkere Kaskade kann noch kleinere Wirbel erzeugen. Bezeichnet man mit  $L$  die Größe des größten Wirbels und mit  $\eta$  die des kleinsten Wirbels, dann gilt die Beziehung  $Re = (L/\eta)^{3/4}$ , was belegt, dass die turbulenten Winde auch Wirbel auf kleinsten Längen erzeugen. Dieses Phänomen ist im Herbst an der Bewegung von Laubblättern eindrucksvoll zu beobachten. Bei der Charakterisierung der Turbulenz bis hierher wurden nur nachvollziehbare mechanische Vorstellungen herangezogen. Die mathematisch-physikalische Beschreibung benötigt auch nicht mehr. Die

Grundgleichung der Turbulenz, die Navier-Stokes-Gleichung, ist nichts anderes als die bekannte Newtonsche Gleichung Kraft = Masse x Beschleunigung. Bei der Masse muss man berücksichtigen, dass es in einem Fluid nur eine Massendichte gibt, die über den Raum verteilt ist. Die Kräfte, die auf ein Fluidelement, etwa einen Tropfen im fließenden Bach wirken, sind erstens die viskose Reibungskraft, falls sich der Tropfen schneller bewegt als seine Umgebung, zweitens die Druckkraft, die etwa zwischen Hoch- und Tiefdruckgebiet zur Ausbildung von Windströmungen führt oder die Zugluft



Gemessene Wahrscheinlichkeitsverteilungen von Wind- und Leistungsschwankungen innerhalb einer Sekunde, a) Windgeschwindigkeitsinkremente, b) Leistungsinkremente jeweils für 1 sec.

in einem Zimmer bewirkt, sowie drittens äußere Kräfte, wie die Gravitationskraft, die zum Beispiel auch zur Konvektion führt, also schwere (kalte) Fluidteilchen nach unten fallen lässt.

Schon 1848 wurden diese Gleichungen aufgestellt. Das Besondere an diesem mechanischen Problem und damit an der Turbulenz ist, dass bis heute keine allgemeinen Lösungen der Gleichungen bekannt sind. Es gibt weder eine mathematische noch eine physikalische Lösung; auch der Einsatz größter Computer hat es bisher nicht ermöglicht, eine turbulente Strömung exakt zu berechnen. In der Mathematik ist die Turbulenz eine der sieben Jahrtausendfragen, welche im Jahr 2000 vom „Clay Mathematics Institute“, mit jeweils einer Million Dollar Preisgeld, ausgelobt wurden. Ein zentraler, nicht verstandener Aspekt betrifft die Stärke der kleinsten Wirbel. Für die atmosphärische Windströmung sind nach unseren Forschungsergebnissen diese kleinsten Wirbel für die Ausbildung von Windböen verantwortlich.

## Was eine Windböe ausmacht

Ein allgemein verwendetes Maß für die kleinsten Wirbel in einer turbulenten Strömung sind die Geschwindigkeitsfluktuationen  $u_r = u(x+r; t) - u(x, t)$  über einen Abstand  $r$  oder  $u_\tau = u(x, t+\tau) - u(x, t)$  über einen Zeitabstand  $\tau$ . Solche Größen kann man leicht mit einer oder mit zwei Geschwindigkeitsmesssonden („Anemometer“) messen. Während für große  $r$ - und  $\tau$ -Werte die Geschwindigkeitsfluktuationen einfachen Zufallszahlen ähneln, die man mathematisch sehr gut mit Gaußverteilungen beschreiben kann, fällt es bis heute schwer, die Statistik und damit Erscheinungswahrscheinlichkeit der Geschwindigkeitsfluktuationen für kleine  $r$ - und  $\tau$ -Werte zu beschreiben. In den beiden Schaubildern auf Seite 17 unten ist eine solche gemessene Verteilung zu sehen. Aus gemessenen Winddaten wurden hier mit dem zeitlichen Abstand von 1 sec die Geschwindigkeitsänderungen bestimmt und die Häufigkeit der Werte dargestellt. Zum Vergleich ist eine normale Zufallsstatistik (Gaußverteilung) eingezeichnet, welche sich mathematisch etwa durch einen Würfelprozess beschreiben ließe. Das Besondere ist, dass die Auftretswahrscheinlichkeit von großen Werten viel größer ist, als dies für die Gaußstatistik der Fall ist. Aus der Messung (Schaubild a)) kann man erkennen, dass die größten Geschwindigkeitsänderungen viele Zehnerpotenzen häufiger auftreten. Ein Unterschied in der Wahrscheinlichkeit von  $10^6$  bedeutet etwa, dass ein Ereignis, welches

einmal pro Jahr für eine Gaußverteilung erwartet wird,  $10^6$  mal häufiger, also alle 30 Sekunden auftritt. In der Messung, der das Schaubild a) zugrunde liegt, wurden große Windschwankungen von bis zu 3 m/sec ermittelt, die täglich auftraten, die aber für eine entsprechende Gaußverteilung nicht einmal im Laufe von Jahrzehnten erwartet würden. Eine Änderung der Windgeschwindigkeit an einem ortsfesten Punkt um 3 m/sec oder 10 km/h innerhalb einer Sekunde ist unserer Meinung nach das, was eine Windböe ausmacht. Hier sei angemerkt, dass es noch ein offenes Problem ist, was eine Windböe ist bzw. wie man diese charakterisieren oder definieren soll.

Mit dieser Beschreibung der anomalen Statistik kleinskaliger Turbulenz ist der Bezug zu den wetterabhängigen, Erneuerbaren Energien leicht zu erklären. Wetterstrukturen wie Wolken und Windstärken sind durch die Turbulenz geprägt. Aus oben Gesagtem folgt, dass für Windverhältnisse, die auf eine Windenergieanlage einwirken, Eigenschaften der kleinskaligen Turbulenz gelten. (Eine Windenergieanlage mit einer Größe bis zu 100 Metern ist im Verhältnis zu den größten Strukturen der atmosphärischen Turbulenz sehr klein und Messungen zufolge mit anomalen Fluktuationsstatistiken oder vielen Böen behaftet.) Diese Geschwindigkeitsfluktuationen rütteln permanent an Windenergieanlagen, die ja gerade dort betrieben werden, wo viel Wind weht und damit starke Turbulenzen mit großen Reynoldszahlen vorherrschen. Diese Turbulenzeinflüsse auf eine Windenergieanlage ist ein herausforderndes wissenschaftliches Thema mit vielen strömungsmechanischen und dynamischen Aspekten.

Neben den mechanischen Lastaspekten wirkt sich auch die Turbulenzstatistik auf die Leistungsabgabe einer Windenergieanlage aus. Im Schaubild b) ist die Statistik der Leistungsfluktuation einer Windkraftanlage zu sehen. Auch hier wird die extrem erhöhte Wahrscheinlichkeit von großen Leistungsfluktuationen innerhalb kurzer Zeitabstände deutlich. Mehr als 10 % Leistungsschwankung in wenigen Sekunden ist nicht unwahrscheinlich. Das Verständnis der Turbulenz von Windverhältnissen lässt erwarten, dass man diese anomalen Statistiken auch auf die Leistungsabgabe von ganzen Windparks übertragen kann. Bei dem Ziel, einen sehr großen Anteil von Erneuerbaren Energie (insbesondere Windenergie) in der elektrischen Energieerzeugung zu verwirklichen, wird es von sehr großer Bedeutung sein, diese Fluktuationsstatistik wenigstens

empirisch besser zu verstehen, um unerwartete Instabilitäten im elektrischen Netz zu vermeiden. Unserer Meinung nach sind bisher diese durch die Windturbulenzen bewirkten Kurzzeitschwankungen zu wenig berücksichtigt worden. Jede verbesserte Erkenntnis dieser turbulenten Unordnungsphänomene wird dazu beitragen, dass etwaige Energiespeichersysteme in Richtung höherer Systemsicherheit und niedrigerer Speicherkosten optimiert werden können. Hier sei angemerkt, dass in den letzten Jahren große Fortschritte in der Turbulenzforschung stattgefunden haben. Auch wenn es noch keine allgemeine Lösung des Turbulenzproblems gibt, so ist es doch inzwischen möglich, die Turbulenz empirisch relativ gut zu erfassen. Beispielsweise ist es dem Oldenburger Physiker Andreas P. Nawroth 2007 in seiner Doktorarbeit gelungen, numerische Modelle aufzustellen, die Turbulenzsignale mit richtigen  $n$ -Punktkorrelationen berechnen.

## Die Autoren



Prof. Dr. Joachim Peinke ist Leiter der Arbeitsgruppe Hydrodynamik und Windenergie im Institut für Physik sowie Sprecher des Zentrums für Windenergieforschung „ForWind“ der Universität Oldenburg und Hannover. Er studierte Physik in Tübingen und Corvallis (Oregon, USA). Nach Promotion und Habilitation in Tübingen war Peinke u.a. Wissenschaftlicher Mitarbeiter und Heisenberg-Stipendiat am Centre National de la Recherche Scientifique in Grenoble, bevor er 1998 an die Universität Oldenburg berufen wurde. Sein Forschungsschwerpunkt ist die Komplexitätsforschung in strömungsphysikalischen Systemen, wie Turbulenz und Windenergie, mit Anwendungen in anderen Gebieten.



Julia Gottschall studierte Physik in Heidelberg und Uppsala (Schweden) und beendete ihr Studium mit einem Master of Science in Theoretischer Physik. Seit 2005 promoviert sie in der Arbeitsgruppe von Prof. Dr. Joachim Peinke. Schwerpunkt ihrer Forschung ist die Rekonstruktion von stochastischen Prozessen mit Anwendungen u.a. in der Windenergieforschung.