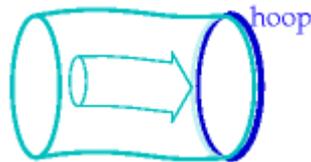


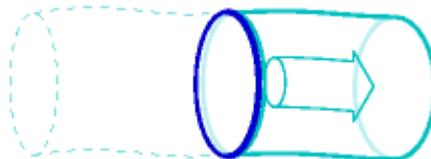
## Anhang B: Wind II

### Die Physik der Windkraft

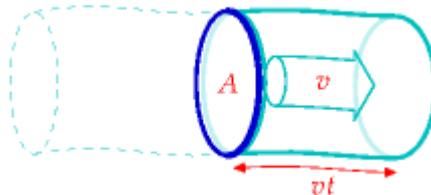
Um die Energie im Wind abzuschätzen, nehmen wir an, dass wir ein Windrad mit der Fläche  $A$  hochhalten, das Wind der Geschwindigkeit  $v$  ausgesetzt ist. Wir berechnen die Masse der Luft, die durch das Windrad pro Sekunde streicht. Hier ist ein Bild der Luft, kurz bevor sie durch das Windrad streicht:



Und hier ist das Bild der selben Masse von Luft eine Sekunde später:



Die Masse dieses Stücks Luft ist das Produkt aus seiner Dichte  $\rho$ , seiner Fläche  $A$  und seiner Länge, die  $v$  mal  $t$  ist, mit  $t$  gleich einer Sekunde.



Die kinetische Energie dieses Stücks Luft ist (ich benutze wieder die Formel Masse = Dichte x Volumen)

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\rho Avt v^2 = \frac{1}{2}\rho Atv^3. \quad (\text{B.1})$$

Die Leistung des Windes auf einer Fläche  $A$  – das ist die kinetische Energie, die pro Zeiteinheit durch diese Fläche streicht – ist somit

$$\frac{\frac{1}{2}mv^2}{t} = \frac{1}{2}\rho Av^3. \quad (\text{B.2})$$

Diese Formel kommt uns bekannt vor – wir leiteten einen identischen Ausdruck auf Seite 360 bei der Diskussion des Energieverbrauchs eines bewegten Fahrzeugs ab.

Was ist eine typische Windgeschwindigkeit? An einem windigen Tag kann man als Radfahrer die Windrichtung direkt wahrnehmen; kommt der Wind von hinten, ist man viel schneller als sonst; die Windgeschwindigkeit ist also vergleichbar mit der eines Radfahrers, der sagen wir 21 km/h (6 m/s) schafft. In Cambridge ist der Wind nur gelegentlich so stark. Lassen Sie mich trotzdem dies als eine für England typische Zahl verwenden (und im Gedächtnis behalten, dass wir unsere Abschätzungen ggf. revidieren müssen).

Meilen/ Stunde	km/h	m/s	Beaufort Skala
2,2	3,6	1	Windstärke 1
7	11	3	Windstärke 2
11	18	5	Windstärke 3
13	21	6	Windstärke 4
16	25	7	Windstärke 5
22	36	10	Windstärke 6
29	47	13	Windstärke 7
36	58	16	Windstärke 8
42	68	19	Windstärke 9
49	79	22	Windstärke 10
60	97	27	Windstärke 11
69	112	31	Windstärke 12
78	126	35	Windstärke 12

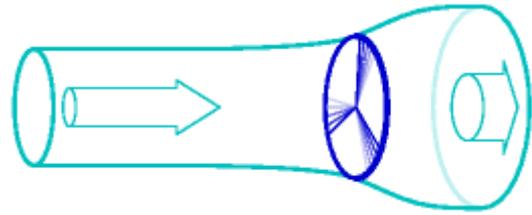


Fig.B.2: (oben) Luftströmung nach einer Windmühle. Die Luft wird abgebremst und aufgeweitet durch die Windmühle.

Fig.B.1: (links) Geschwindigkeiten

Die Dichte von Luft ist etwa  $1,3 \text{ kg pro m}^3$ . (Gewöhnlich runde ich das zu  $1 \text{ kg/m}^3$ , weil das leichter zu merken ist, aber hier habe ich nicht gerundet.) Die typische Windleistung pro Quadratmeter Windrad ist

$$\frac{1}{2} \rho v^3 = \frac{1}{2} 1,3 \text{ kg/m}^3 \times (6 \text{ m/s})^3 = 140 \text{ W/m}^2. \quad (\text{B.3})$$

Eine Windmühle kann diese Energie nicht komplett extrahieren. Die Windmühle verlangsamt den Luftstrom deutlich, sie muss aber der Luft etwas an kinetischer Energie belassen, sonst ist die abgebremste Luft im Weg. Fig.B.2 zeigt eine Skizze des tatsächlichen Luftstroms nach einer Windmühle. Der maximale Energie-Anteil, den eine Windmühle aus einem ankommenden Luftstrom extrahieren kann, wurde von dem deutschen Physiker Albert Betz 1919 berechnet. Wenn der abströmende Wind  $1/3$  der Geschwindigkeit des ankommenden Windes hat, dann ist die extrahierte Leistung  $16/27$  der Gesamtleistung.  $16/27$  sind  $0,59$ . Lassen Sie uns für die Praxis annehmen, die Windmühlen seien  $50\%$  effizient. Tatsächlich werden Windmühlen für bestimmte Windgeschwindigkeiten konzipiert; liegt die tatsächliche Windgeschwindigkeit signifikant über der Idealgeschwindigkeit der Turbine, muss diese abgeschaltet werden.

Für eine Beispielrechnung nehmen wir einen Durchmesser von  $25 \text{ m}$  und eine Nabenhöhe von  $32 \text{ m}$  an, was in etwa den Dimensionen der einzeln stehenden Windanlage oberhalb der Stadt Wellington, Neuseeland, entspricht (siehe Fig.B.3). Die Leistung dieser einzelnen Windmühle ist



Fig.B.3: Die Brooklyn Windmühle bei Wellington, Neuseeland, mit Leuten zum Maßstabsvergleich. An einem windigen Tag erzeugte diese Windmühle  $60 \text{ kW}$  ( $1400 \text{ kWh/d}$ ). Foto von Philip Banks

Wirkungsgrad x Leistung pro Flächeneinheit x Fläche

$$= 50\% \times \frac{1}{2} \rho v^3 \times \frac{\pi}{4} d^2 \quad (\text{B.4})$$

$$= 50\% \times 140 \text{ W/m}^2 \times \frac{\pi}{4} (25 \text{ m})^2 \quad (\text{B.5})$$

$$= 34 \text{ kW.} \quad (\text{B.6})$$

Als ich die Windmühle an einem sehr windigen Tag besuchte, zeigte der Zähler des Generators eine tatsächliche Leistung von 60 kW.

Um abzuschätzen, wie viel Leistung wir aus dem Wind gewinnen können, müssen wir noch festlegen, wie groß unsere Windmühlen werden können und wie nahe wir sie zusammenpacken dürfen.

Wie dicht können Windmühlen gepackt werden? Zu nahe, und die im Wind stehenden werden für die dahinterliegenden einen Windschatten erzeugen. Experten sagen, dass Windmühlen nicht näher als 5mal ihr Durchmesser stehen dürfen, ohne dass signifikante Leistungseinbußen erfolgen. Bei diesem Abstand können Windmühlen pro Landfläche eine Leistung erzeugen von (vgl. Fig.B.4)

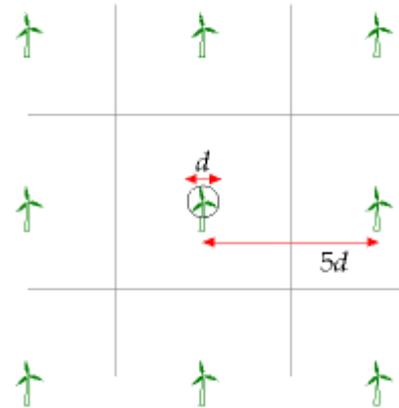


Fig.B.4: Windfarm-Layout

$$\frac{\text{Leistung pro Windmühle}}{\text{Fläche pro Windmühle}} = \frac{\frac{1}{2} \rho v^3 \frac{\pi}{8} d^2}{(5d)^2} \quad (\text{B.7})$$

$$= \frac{\pi}{200} \frac{1}{2} \rho v^3 \quad (\text{B.8})$$

$$= 0,016 \times 140 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.9})$$

$$= 2,2 \text{ W/m}^2 \quad (\text{B.10})$$

Das ist eine Zahl, die man im Gedächtnis behalten sollte: Eine Windfarm bei 6 m/s Windgeschwindigkeit erzeugt 2 W pro m<sup>2</sup> Landfläche. Beachten Sie, dass dieser Wert nicht vom Durchmesser der Windräder abhängt. Die  $d$ 's kürzten sich heraus, da größere Windmühlen in größerem Abstand aufgestellt werden müssen. Größere Windmühlen sind eine gute Idee, wenn es darum geht, die höheren Windgeschwindigkeiten auszunutzen, die in größeren Höhen über Grund herrschen (je höher eine Windmühle, um so größere Windgeschwindigkeiten nutzt sie), oder aus ökonomischen Erwägungen. Diese beiden Argumente sind aber auch die einzigen, die für große Windmühlen sprechen.

### Leistung pro Flächeneinheit

<b>Windfarm</b> (Wind 6 m/s)	<b>2W/m<sup>2</sup></b>
---------------------------------	-------------------------

Tabelle B.5: Fakten, die man behalten sollte: Windfarmen

Die Berechnungen hängen wesentlich von den angenommenen Windgeschwindigkeiten ab. Sind 6 m/s langfristig typische Geschwindigkeiten in windigen Gegenden Englands? Fig.4.1 und Fig.4.2 zeigen Windgeschwindigkeiten in Cambridge und Cairngorm. Fig.B.6 zeigt mittlere Winter- und Sommer-Windgeschwindigkeiten für acht weitere Orte in England. Ich fürchte, 6 m/s war zu hoch geschätzt für die typische Geschwindigkeit im größten Teil Englands! Ersetzen wir die 6 m/s durch die 4 m/s von

Bedford, müssen wir unsere Abschätzungen herunterskalieren, auf  $(4/6)^3 \approx 0,3$  (denn die Leistung skaliert mit der Windgeschwindigkeit hoch 3).

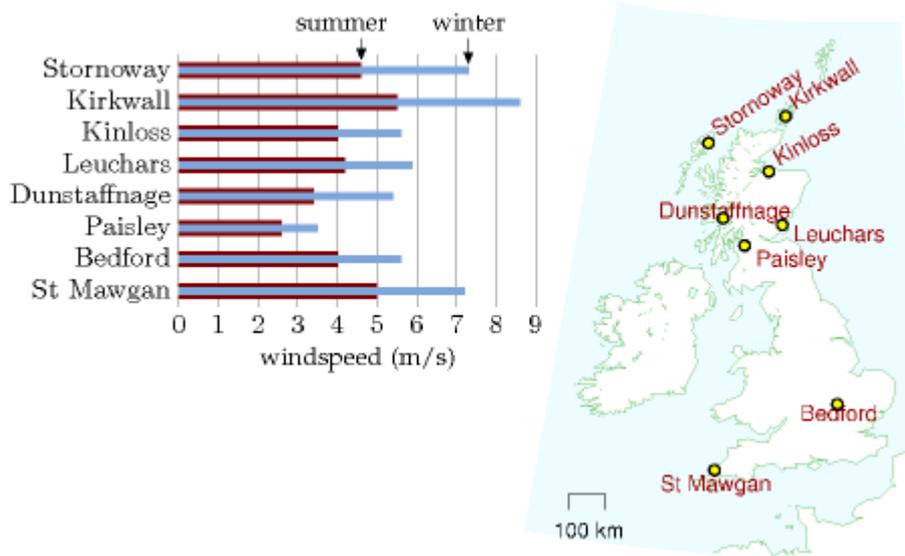


Fig.B.6: mittlere Sommer- (dunkelroter Balken) und Winter-Windgeschwindigkeiten (hellblauer Balken) an acht Stellen in England, gemessen in Standard-Wetterstationshöhe von 10m. Mittelwerte über 1971-2000.

Um andererseits die mittlere typische Leistung abzuschätzen, sollten wir nicht die mittlere Windgeschwindigkeit nehmen und sie in die dritte Potenz erheben, sondern das Mittel der mit 3 potenzierten Windgeschwindigkeit. Das Mittel der Potenzen ist größer als die entsprechende Potenz des Mittelwertes. Doch wenn wir so sehr ins Detail gehen wollen, wird es noch komplizierter, da reale Windturbinen nicht Leistung proportional zu  $v^3$  erzeugen. Tatsächlich haben sie einen Geschwindigkeitsbereich, in dem sie die theoretisch mögliche Leistung liefern, bei höheren oder niedrigeren Geschwindigkeiten liefern reale Turbinen weniger als die theoretisch mögliche Leistung.

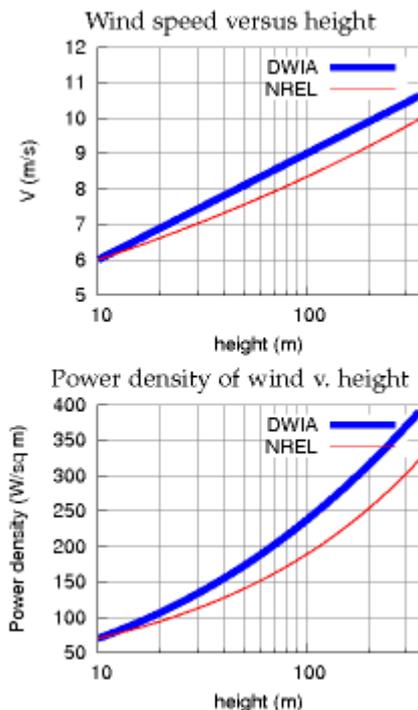


Fig.B.7: oben: Zwei Modelle für Windgeschwindigkeit und -leistung als Funktion der Höhe. DWIA=Danish Wind Industry Association; NREL=National Renewable Energy Laboratory. Für beide Modelle wurde die Geschwindigkeit bei 10 m mit 6 m/s angenommen. Für das dänische Windmodell wurde die Rauigkeitslänge auf 0,1 m gesetzt. Unten: Die Energiedichte (Leistung pro senkrechter Fläche) nach beiden Modellen.

### Variation der Windgeschwindigkeit mit der Höhe

Höhere Windmühlen sehen höhere Windgeschwindigkeiten. Die Art, mit der die Windgeschwindigkeit als Funktion der Höhe zunimmt, ist kompliziert und hängt von der

Rauhigkeit des umgebenden Terrains und von der Tageszeit ab. Als Faustformel gilt: Verdopplung der Höhe vergrößert die Windgeschwindigkeit um 10% und damit die Leistung um 30%.

Einige Standardformeln für die Geschwindigkeit  $v$  als Funktion der Höhe  $z$  sind:

1. Nach der Windscherungs-Formel von NREL [ydt7uk] variiert die Geschwindigkeit mit einer Potenz der Höhe:

$$v(z) = v_{10} \left( \frac{z}{10 \text{ m}} \right)^\alpha,$$

wobei  $v_{10}$  die Geschwindigkeit bei 10 m Höhe ist und ein typischer Wert für den Exponenten  $\alpha$  0,143 oder  $1/7$  ist. Das Ein-Siebtel-Gesetz ( $v(z)$  proportional zu  $z^{1/7}$ ) benutzt z.B. auch Elliott et al. (1991).

2. Die Windscherungs-Formel der Danish Wind Industry Association [yaoonz] ist

$$v(z) = v_{\text{ref}} \frac{\log(z/z_0)}{\log(z_{\text{ref}}/z_0)},$$

wobei  $z_0$  ein Parameter namens Rauigkeitslänge und  $v_{\text{ref}}$  die Geschwindigkeit in einer Referenzhöhe  $z_{\text{ref}}$  wie etwa 10 m ist. Die Rauigkeitslänge für typische Landschaften (Ackerland mit einigen Häusern und Heckenbiotopen im Abstand einiger 500 m – „Rauhigkeitsklasse 2“) ist  $z_0 = 0,1 \text{ m}$ .

In der Praxis liefern die beiden Formeln numerisch gleiche Ergebnisse. Was jedoch nicht bedeutet, dass sie immer korrekt wären. Van den Berg (2004) vermutet, dass insbesondere nachts häufig andere Windprofile auftreten.

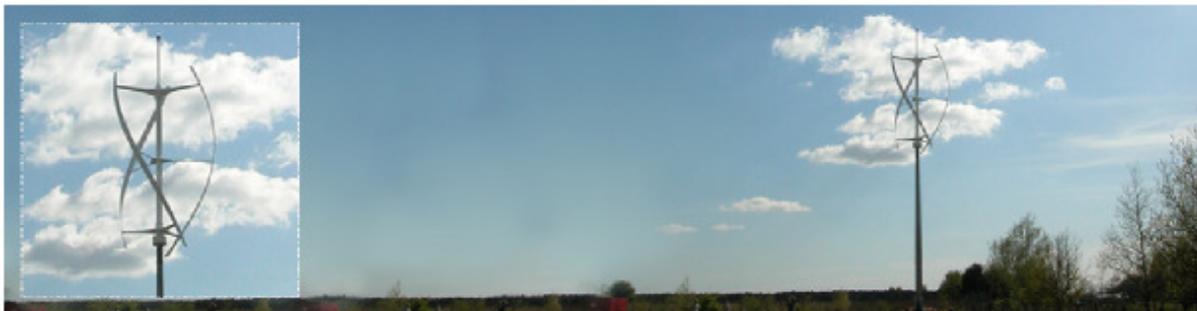


Fig.B.8: Das qr5 von quietrevolution.co.uk. Keine typische Windmühle.

### ***Standardeigenschaften der Windmühlen***

Die heute üblichen Windturbinen haben einen Rotordurchmesser von 54 Metern und eine Nabhöhe von 80 Metern; so eine Maschine hat eine „Kapazität“ von 1 MW. Die „Kapazität“ oder „Spitzenleistung“ ist das Maximum an Leistung, das die Windmühle bei optimalen Verhältnissen generieren kann. Die Turbinen sind gewöhnlich dafür ausgelegt, bei Windgeschwindigkeiten von 3-5 m/s zu starten und bei Sturm über 25 m/s abzuschalten. Die tatsächlich gelieferte Leistung ist die „Kapazität“ multipliziert mit einem Faktor, der den Bruchteil der Zeit beschreibt, zu dem nahezu optimale Bedingungen herrschen. Dieser Faktor, oft „Load Faktor“ oder „Kapazitätsfaktor“ genannt, hängt vom Standort ab. Ein typischer Load-Faktor für einen guten Standort in England ist 30%. In Holland ist ein typischer Load-Faktor 22%, in Deutschland 19%.

### ***Abschätzungen anderer Autoren zur Leistung von Windfarmen pro Flächeneinheit***

In einer Regierungsstudie [www.world-nuclear.org/policy/DTI-PIU.pdf] werden englische Onshore-Windressourcen mit höchstens 9 W/m<sup>2</sup> (Kapazität, nicht mittlere Leistung) abgeschätzt. Mit einem Kapazitätsfaktor von 33% wären das 3 W/m<sup>2</sup> mittlere Energieproduktion.

Das London Array ist eine Offshore-Windfarm, die im äußeren Themsemündungsbereich geplant ist. Mit seiner Kapazität von 1 GW soll es die weltgrößte Windfarm werden. Sie wird aus 271 Turbinen in 245 km<sup>2</sup> [6086ec] bestehen und eine mittlere Leistung von 3100 GWh pro Jahr (350 MW) erbringen. (Kosten £1.5 Mrd.) Das ist eine Leistungsdichte von 350 MW/245 km<sup>2</sup> = 1.4 W/m<sup>2</sup>. Das ist weniger als bei anderen Offshore-Farmen, weil, wie ich vermute, dieser Standort einen großen Kanal (Knock Deep) enthält, der zu tief (etwa 20 m) für ökonomisch vertretbare Turbinengrundfeste ist.

*I'm more worried about what these plans [for the proposed London Array wind farm] will do to this landscape and our way of life than I ever was about a Nazi invasion on the beach.*

Bill Boggia aus Graveney, wo die Unterseekabel der Windfarm an die Küste kommen.

### **Fragen**

*Was ist mit Mikro-Windrädern? Wenn man eine solche Miniturbine auf sein Dach setzt, wie viel Energie kann man daraus erwarten?*

Bei einer angenommenen Windgeschwindigkeit von 6 m/s, die wie gesagt schon über der mittleren Windgeschwindigkeit Englands liegt, und einem angenommenen Durchmesser von 1 m wäre die zu erwartende Leistung bei 50 W. Das sind 1,3 kWh pro Tag – nicht allzu viel. Und in realer Umgebung einer typischen englischen Stadtsiedlung liefert eine solche Turbine lediglich 0,2 kWh pro Tag – siehe Seite 76.

Die vielleicht schlechtesten Windmühlen der Welt sind einige in Tsukuba City, Japan, die tatsächlich mehr Energie verbrauchen als sie liefern. Ihre Betreiber waren so verstört über die ständig stillstehenden Turbinen, dass sie Energie hineinsteckten, damit sie sich drehten und wenigstens den Anschein erweckten, als würden sie arbeiten! [6bkvbn]



Fig.B.9: Eine Ampair „600W“ Mikroturbine. Die mittlere Leistung, die von dieser Mikroturbine in Lemington Spa erzeugt wird, ist 0,037 kWh pro Tag (1,5 W).

## Anmerkungen und Literaturhinweise

Seite

286 Der maximale Energie-Anteil, den eine Windmühle aus einem ankommenden Luftstrom extrahieren kann Eine sehr schöne Erklärung dazu findet sich auf der Website der Danish Wind Industry Association [yekdaa].

289 Die Turbinen sind gewöhnlich dafür ausgelegt, bei Windgeschwindigkeiten von 3-5 m/s zu starten [ymfbsn].

289 Ein typischer Load-Faktor für einen guten Standort in England ist 30 Im Jahr 2005 war der durchschnittliche Load-Faktor der größeren englischen Windfarmen 28% [ypvbvd]. Der Load-Faktor variierte im Jahresverlauf, mit einem Minimum von 17% im Juni und Juli. Der Load-Faktor der besten Standorte – Caithness, Orkney und die Shetland-Inseln – war 33%. Die Load-Faktoren der beiden in 2005 betriebenen Offshore-Windfarmen waren 36% für North Hoyle (vor Nord-Wales) und 29% für Scroby Sands (vor Great Yarmouth). Mittlere Load-Faktoren für folgende zehn Regionen waren (2006): Cornwall 25%; Mid-Wales 27%; Cambridgeshire und Norfolk 25%; Cumbria 25%; Durham 16%; Südschottland 28%; Orkney und Shetland-Inseln 35%; Nordost-Schottland 26%; Nordirland 31%; Offshore 29%. [wbd8o]

Nach Watson et al. (2002) wird eine mittlere jährliche Windgeschwindigkeit von 7,0 m/s als notwendig für einen ökonomischen Betrieb einer Windfarm angesehen. Etwa 33% Englands haben solche Windgeschwindigkeiten.



Fig.B.10: Eine Iskra 5 kW Turbine mit 5,5 m Durchmesser [www.iskrawind.com] bei der jährlichen Wartung. Diese Turbine steht in Hertfordshire (nicht einer der windigsten Orte in England) in 12 m Höhe und hat einen mittleren Leistungs-Output von 11 kWh pro Tag. Eine Windfarm mit Maschinen dieser Performance, je eine auf 30 m x 30 m, hätte eine Energiedichte pro Flächeneinheit von 0,5 W/m<sup>2</sup>.