

# Grundlagen (spez. Vertikalanlagen):

## Globales Windpotential

Was ist Wind und wie entsteht er eigentlich? Wind ist eine gerichtete, meist horizontale Bewegung von Luft innerhalb der Atmosphäre. Er entsteht durch großräumige Luftdruckunterschiede; in gemäßigten Breiten durch wechselnde Winde, also Hoch- und Tiefdruckbewegungen, in tropischem Klima durch zirkulierende, beständige Bedingungen wie dem Monsun oder dem Passat.<sup>1</sup>

Winfried Schatter beschreibt in der Einführung seines Buches „Windkonverter – Bauarten, Wirkungsgrade, Auslegung“ 1987 den Wind als Resultat des Reibungskontaktes zwischen Erdoberfläche und der Atmosphäre, die auch innere Reibungen besitzt. Dazu tragen Aspekte wie die Oberflächenbeschaffenheit der Erde oder die Corioliskraft maßgeblich bei. Den Wind haben wir physikalisch gesehen der Sonne mit ihrer ständigen Energiezufuhr zu verdanken. Die Strömungslehre zeigt eine Temperaturabhängigkeit der Moleküle. So wirkt sich also das Aufeinandertreffen verschieden dichter Luftmassen immer mit einer Wärmeabgabe der „übermolekular geordneten Strömung“ (Schatter, S. 1) aus. Demzufolge liegt es allein an der Sonneneinstrahlung, die Strömungen in der Atmosphäre immer wieder neu anzutreiben und aufrecht zu erhalten.<sup>2</sup>

„Schätzungsweise 2% der auf die Erde eingestrahltene Sonnenleistung wird in kinetische Energie der Luft umgewandelt. Dies ist eine Leistung von ca.  $3,5 \cdot 10^9 \text{ MW}$ “ (Zahoransky, S. 269). Das würde eine theoretisch nutzbare elektrische Arbeit von  $30,66 \cdot 10^6 \text{ TWh}$  im Jahr bedeuten. Umgerechnet auf die 29,3% der theoretisch bebaubaren Erdoberfläche sind dies immer noch  $8,98 \cdot 10^6 \text{ TWh}$ .

Der tatsächliche weltweite Energieverbrauch wird derzeit auf  $131.400 \text{ TWh}$  pro Jahr geschätzt<sup>3</sup> wovon Deutschland 2009 etwa  $3.722 \text{ TWh}$  verbrauchte<sup>4</sup>. Die Universität Stuttgart schreibt in einer Konzeptstudie von einer vermuteten weltweit installierten Kraftwerksleistung von  $20 \text{ TW}$  im Jahr 2010<sup>5</sup>, was einer Energieversorgung von  $175.200 \text{ TWh}$  entsprechen würde, wenn alle Kraftwerke das

---

<sup>1</sup> Vgl. Knaurs, Band 10, S. 6521

<sup>2</sup> Vgl. Schatter, S. 1

<sup>3</sup> Vgl. Crastan, S. 8

<sup>4</sup> Vgl. Datenbank des BMWi (Energiegewinnung - Primärenergieverbrauch nach Energieträgern)

<sup>5</sup> Vgl. Anhang: Anlage 1.1 (Konzeptstudie zu Auslegungsrichtlinien für VHP-Turbinen)

ganze Jahr über ohne Unterbrechung Strom erzeugen würden. Ein scheinbar erstaunlich hoher Wert, aber alleine mit der oben geschätzten nutzbaren Arbeit von  $30,66 \cdot 10^6 \text{ TWh}$  verglichen sind dies lediglich 0,57%. So könnte theoretisch allein durch die Nutzung von Windkraft der momentane Weltbedarf der elektrischen Energie 175-fach gedeckt werden.

Aufgrund mehrerer Faktoren, wie der Ergebnisse der Weltklimakonferenz oder der Atommüllendlager-Problematik, wird die Forderung immer lauter, den Bedarf zunehmend durch regenerative Energien zu ergänzen oder gar komplett zu decken. Der Erfolg eines Umdenkens zeichnet sich ab; längerfristig (ab 1995) wird dies von der Statistik für erneuerbare Energien des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) bestätigt. Europaweit speisen WEA im Jahr 2009 den Strom ganzer zehn Kernkraftwerke in das Netz ein. In der Bundesrepublik Deutschland betrug 2008 der an der Gesamtstromerzeugung beteiligte Anteil der Windenergie 6,49%, Tendenz steigend.<sup>6</sup>

---

<sup>6</sup> Vgl. Datenbank des BMWi (Energieträger - Erneuerbare Energien)

## Definition der Kleinwindanlage

In den letzten Jahren haben neben den großen On- und Offshore-Windparks zunehmend kleinere WEA an Bedeutung gewonnen; aber nicht nur für den Endverbraucher zur Stromversorgung, zum Wasserpumpen oder zur Warmwasseraufbereitung. Es werden zunehmend WEA zur Energieversorgung von Funkmasttürmen oder auf Schiffen für die Bordelektronik verwendet. In Schwellen- und Entwicklungsländern lösen sie teuer zu unterhaltende Dieselaggregate und gefährliche Kerosinlampen ab, auch entlegenen Gebieten wird so eine einfache Energieversorgung zugestanden.<sup>7</sup>

Aber wo genau ist die Grenze zwischen kleinen und großen WEA? Laut des Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE) sind Kleinwindanlagen Windräder mit bis zu 100 kW installierter Leistung. Eine andere Definition liefert die IEC-NORM ("design requirements for small wind turbines"). Diese bezieht sich auf die Leistung pro überstrichene Rotorfläche. Der Grenzwert hierbei liegt bei  $350 \text{ W/m}^2$ . Außerdem darf die überstrichene Fläche nicht größer als  $200\text{m}^2$  sein; und die Leistung somit 70 kW nicht überschreiten. Der britische Windenergieverband (BWEA) setzt eine Grenze von 50 kW installierter Leistung. Diese wird wiederum unterschieden in "micro wind" (bis 20 kW) und "small wind" (über 20 kW).

Es gibt also momentan keine eindeutig festgelegte Definition an der sich Endverbraucher orientieren könnten; lediglich Richtlinien sind vorhanden, die von Organisation zu Organisation mit mehr oder weniger großen Unterschieden festgelegt werden.<sup>8</sup>

---

<sup>7</sup> Vgl. Wind Energy Market 2009, S. 53

<sup>8</sup> Vgl. BWE Marktübersicht 2010, S. 52

# Arten von Windkraftanlagen

## Unterscheidungskriterien

Es gibt zahlreiche unterschiedliche Arten und Bauformen von Geräten, die die Energie des Windes in eine brauchbare Form von Arbeit umwandeln. Hierbei ist wichtig, dass es sich nicht nur um die "Aufnahme" des Windes (also den Rotor mit seiner mehr oder weniger optimalen aerodynamischen Form) handelt. Genauso notwendig ist die Umsetzung der Energie durch die dazugehörigen Einzelkomponenten wie dem Generator, eventuell vorhandenem Getriebe, Regelungssystem und anderen Komponenten und Faktoren wie Lagerung, Gewicht, Gewichtsverteilung etc.<sup>9</sup>

Zunächst wird aber an dieser Stelle auf die verschiedenen Arten von Rotoren eingegangen. Grundsätzlich differenziert man zwischen Windkraftanlagen als "*Widerstandsläufer*" und "*Auftriebsläufer*"<sup>10</sup>. Der Widerstandsläufer gewinnt, wie der Name schon vermuten lässt, seine Leistung ausschließlich aus dem Luftwiderstand, der den Rotor antreibt. Ein Widerstandsläufer, der jedem geläufig sein wird, ist das Schalenkreuz-Anemometer zum Messen der Windgeschwindigkeit. "Die hohle Halbkugel hat auf ihrer konkaven Seite einen geringeren Strömungswiderstand als auf ihrer hohlen, konvexen Seite"<sup>11</sup>. Der Auftriebsläufer dagegen ist in der Lage, den bei der Umströmung des Rotors entstehenden Auftrieb in eine Bewegung umzusetzen. Diese Art von WEA weisen in der Regel die besseren Wirkungsgrade auf.<sup>12</sup>

Weiteres Unterscheidungskriterium (unabhängig von der Rotorbauweise) ist die Schnellläufigkeit von Windenergiekonvertern. Eine genaue Differenzierung zwischen Schnell- oder Langsamläufer ermöglicht die Schnelllaufzahl  $\lambda$ , welche sich aus der Umfangsgeschwindigkeit  $u$  des Rotors und der absoluten Windgeschwindigkeit  $v_0$  berechnet:<sup>13</sup>

$$\lambda = \frac{u}{v_0}$$

**Formel 1: Schnelllaufzahl**

---

<sup>9</sup> Vgl. Hau, S. 71

<sup>10</sup> Vgl. Hau, S. 65

<sup>11</sup> Vgl. Zahoransky, S. 271

<sup>12</sup> Vgl. Hau, S. 69

<sup>13</sup> Vgl. Schatter, S. 23

Die meisten Verbände und Organisationen lassen sowohl die Schnellläufigkeit eines Rotors als auch seine Auftriebs- oder Widerstandseigenschaften in die Unterscheidung verschiedener WEA mit einfließen. So zieht auch der BWE klare Grenzen (Tabelle 1):

	Widerstandsläufer	Auftriebsläufer
Langsamläufer	$\lambda < 1$	$1 < \lambda < 2,5$
Schnellläufer		$2,5 > \lambda > 15$

Tabelle 1: Gegenüberstellung der Schnelllaufzahl mit den Laufarten der WEA

Während langsam laufende WEA sowohl Widerstands- als auch Auftriebsläufer sein können, sind alle Schnellläufer dagegen auftriebsnutzend, wie aus

Tabelle 1 hervor geht; Widerstandsläufer können sich nicht schneller drehen als der Wind auf seine Rotorblätter auftrifft. Nur in Kombination mit auftriebsnutzenden Komponenten (Hybride, beispielsweise der Canstein-Rotor, in Kapitel 0 genauer beschrieben) sind Schnelllaufzahlenwerte  $> 1$  möglich.<sup>14</sup>

Beim Schnellläufer wird die Umlaufgeschwindigkeit der Rotorspitze oftmals um ein vielfaches höher als die momentane Windgeschwindigkeit. Zu dieser Kategorie gehören alle horizontalen, stromerzeugenden WEA mit einem, zwei oder drei Rotorblättern, aber auch die meisten modernen Darrieus-Rotoren, die eine vertikale Rotationsachse besitzen (siehe hierzu Abbildung 1).<sup>15</sup>

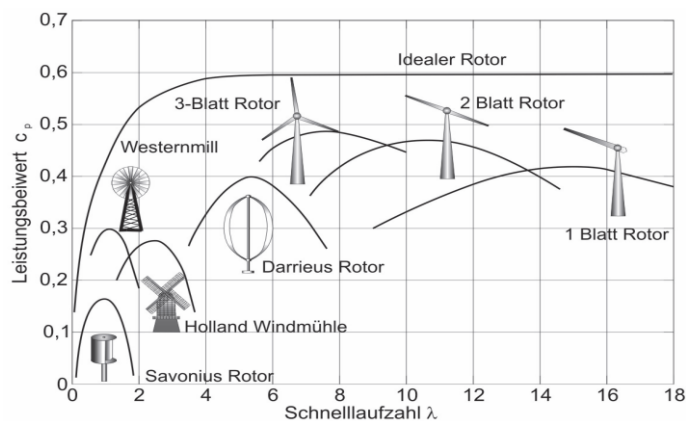


Abbildung 1: unterschiedliche Windradtypen, deren Schnelllaufzahl und Leistungsbeiwert<sup>16</sup>

Eine sehr detaillierte Typenübersicht befindet sich im Anhang<sup>17</sup> und wurde nach den Angaben von Winfried Schatter angefertigt.

<sup>14</sup> Vgl. Bundesverband WindEnergie e.V. (Widerstand- und Auftriebsprinzip, die Schnelllaufzahl)

<sup>15</sup> Vgl. Bundesverband WindEnergie e.V. (Winddreieck)

<sup>16</sup> Vgl. Pilotstudie: Kurzfassung des Abschlussberichts, S. 4

## Leistungsbeiwert und theoretische Nutzungsgrenze

Über eine derartige Kategorisierung hinaus gilt für jede Anlage der sogenannte Leistungsbeiwert. Dies ist etwa vergleichbar mit dem Wirkungsgrad einer Maschine, bezieht sich jedoch ausschließlich auf das "Verhältnis der mechanischen Leistung des Wandlers zu der des ungestörten Luftstromes"<sup>18</sup>. Der deutsche Physiker Albert Betz veröffentlichte diesen wichtigen Zusammenhang zum ersten Mal 1920 in der "Zeitschrift für das gesamte Turbinenwesen". Hier ermittelt er das maximal theoretisch erreichbare Verhältnis zwischen mechanischer Leistung des Wandlers und der Leistung des Luftstroms (ohne Leistungsentzug):<sup>19</sup>

$$c_p = \frac{P}{P_0}$$

**Formel 2: Leistungsbeiwert**

*P: mechanische Leistung der WEA*

*P<sub>0</sub>: Leistung des Luftstroms (ohne Entzug mechanischer Leistung)*

An dieser Stelle ist wieder eine Differenzierung zwischen Auftriebs- und Widerstandsläufer zu treffen, wobei nicht gesondert auf die Herleitungen der beiden Formeln eingegangen wird sondern lediglich die Ergebnisse erläutert und diskutiert werden.

Ausgehend von der kinetischen Energie der Luftmasse und dem Impulserhaltungssatz gilt für einen Auftriebsläufer nach Betz:<sup>18</sup>

$$c_{p,A} = \frac{P_A}{P_0} = \frac{\frac{1}{4}\rho A(v_1^2 - v_2^2)(v_1 - v_2)}{\frac{1}{2}\rho A v_1^3} = \frac{1}{2} \left| 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right| \left| 1 + \frac{v_2}{v_1} \right|$$

**Formel 3: Leistungsbeiwert für Auftriebsnutzende Windenergiewandler**

*c<sub>p,A</sub>: Leistungsbeiwert eines Auftriebsläufers*

*P<sub>A</sub>: mechanische Leistung des Auftriebswandlers*

*ρ: Luftdichte*

*A: Querschnittsfläche*

*v<sub>1</sub>: Geschwindigkeit des Luftstroms vor dem Wandler*

*v<sub>2</sub>: Geschwindigkeit des Luftstroms nach dem Wandler*

---

<sup>17</sup> Vgl. Anhang: Anlage 2.1 (Windkonverter-Bauarten nach Winfried Schatter)

<sup>18</sup> Vgl. Hau, S. 82

<sup>19</sup> Vgl. Hau, S. 79

Ausgehend von der Tatsache, dass der Luftstrom nach dem Wandler nie auf Null abgebremst werden kann, da ja sonst auch die Luft vor dem Wandler stehen würde, betrachtet man stets das Windverhältnis  $\frac{v_2}{v_1}$ .<sup>20</sup>

Der Leistungsbeiwert des Widerstandsläufers dagegen wird mittels des Luftwiderstandes der WEA und der kinetischen Energie des Luftstroms errechnet:<sup>21</sup>

$$c_{P,W} = \frac{P_W}{P_0} = \frac{\frac{1}{2} \rho c_W A_W (v_1 - v')^2 v'}{\frac{1}{2} \rho v_1^3 A_W} = c_W \left(1 - \frac{v'}{v_1}\right)^2 \frac{v'}{v_1}$$

**Formel 4: Leistungsbeiwert eines reinen Widerstandsläufers**

$c_{P,W}$ : Leistungsbeiwert eines Widerstandsläufers

$P_W$ : mechanische Leistung des Widerstandswandlers

$c_W$ : Widerstandsbeiwert

$A_W$ : Widerstandsfläche

$v'$ : Geschwindigkeit des Wandlers für maximalen Energieentzug aus dem Luftstrom

Grundsätzlich gilt die gleiche Ausgangssituation wie nach Formel 2; doch wird hier die Bewegungsgeschwindigkeit des Widerstandsrotors im Verhältnis mit der Anfangsgeschwindigkeit des Luftstroms betrachtet, da der reine Widerstandsläufer unmöglich eine schnellere maximale Umlaufgeschwindigkeit erreichen kann als die Geschwindigkeit des Luftstroms. Ferner ist das Gesamtergebnis stark vom Widerstandsbeiwert der geometrischen Elemente abhängig. Dieser sollte im vorliegenden Fall so groß wie möglich sein. Auffällig an dieser Formel nach Jens Peter Molly ist die Geschwindigkeit des Rotors, die eigentlich rotatorisch und nicht, wie in der Berechnung verwendet, translatorisch berücksichtigt wurde. Diese Problematik wird in Abbildung 2 veranschaulicht.<sup>22</sup>

$F_W$ : Luftwiderstand

**Abbildung 2: Strömungsverhältnisse und Luftkräfte bei einem Widerstandsläufer<sup>22</sup>**

<sup>20</sup> Vgl. Hau, S. 79 ff

<sup>21</sup> Vgl. Molly, S. 6

<sup>22</sup> Vgl. Hau, S. 85 f

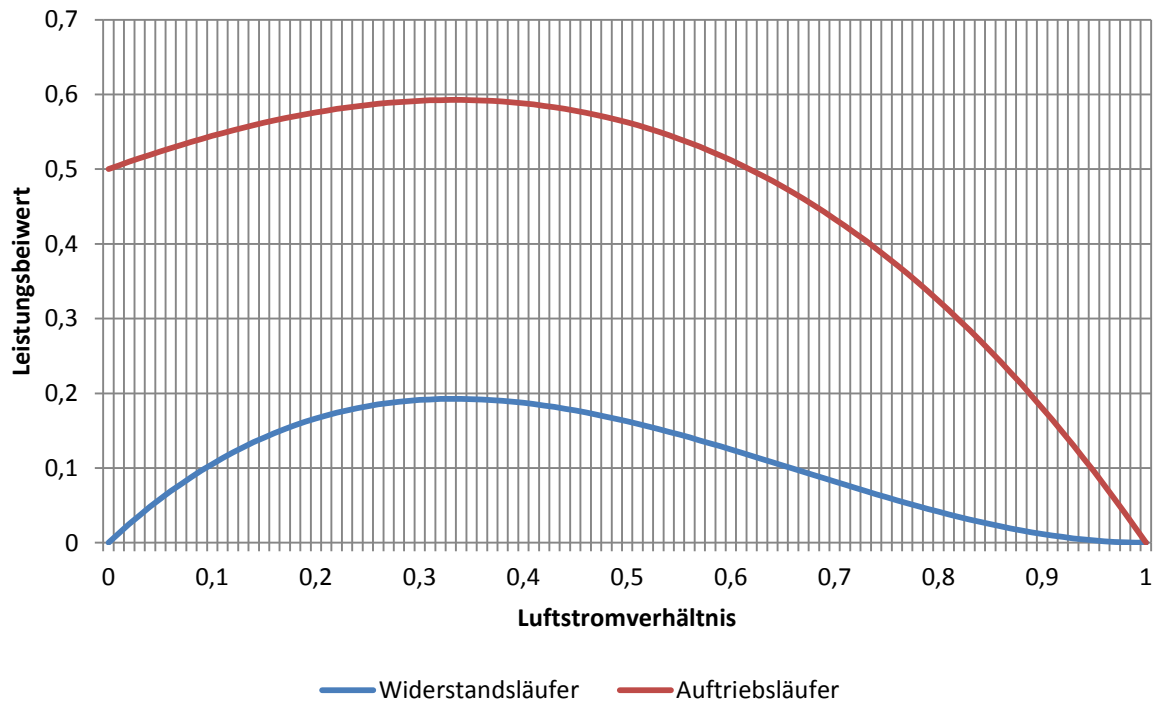


Abbildung 3: Leistungsbeiwerte von Auftriebs- und Widerstandsläufer abhängig vom Luftstromverhältnis  $\frac{v_2}{v_1}$  bzw.  $\frac{v'}{v_1}$  <sup>23</sup>

Abbildung 3 zeigt eine Gegenüberstellung der beiden Wandlerarten. Für den Widerstandsläufer wurde ein optimaler Widerstandsbeiwert von  $c_w = 1,3$  gewählt<sup>24</sup>. Resultat der graphischen Darstellung ist das optimale Geschwindigkeitsverhältnis der Luftströme von  $1/3$ , dies lässt sich auch rechnerisch bestätigen.

Somit ergibt sich für eine auftriebsnutzende WEA ein idealer Leistungsbeiwert von:<sup>23</sup>

$$c_{p,A} = \frac{16}{27} \sim 0,593$$

Formel 5: idealer Leistungsbeiwert eines Auftriebsläufers

<sup>23</sup> Vgl. Schatter, S. 25 und S. 32

<sup>24</sup> Vgl. Molly, S. 6



Für Widerstandskonverter gilt abhängig vom Widerstandsbeiwert:<sup>23</sup>

$$c_{p,W}(c_w) = \frac{4}{27} c_w$$
$$c_{p,W}(1,3) = \frac{5,2}{27} \sim 0,193$$

**Formel 6: idealer Leistungsbeiwert eines Widerstandsläufers**

## Gesamtaufbau

Nach den theoretischen Grundlagen wird nun näher auf die verschiedenen WEA eingegangen. Hierzu werden zunächst die wichtigsten Komponenten aufgeführt:

- der Turm: in dessen Innerem verläuft meist die Kabelführung, bei Vertikalachswindturbinen (VAWT) durchaus auch die Rotorwelle
- der Generator mit der dazu notwendigen elektrischen Schaltanlage: je mehr Pole der Generator besitzt, desto geringer kann die Übersetzung ausfallen; ab etwa 36 Pole ist keine Übersetzung mehr nötig, die Rotordrehzahl reicht aus
- das Getriebe: die meisten modernen Anlagen arbeiten jedoch schon mit getriebeloser Direktübersetzung, trotz der dafür nötigen schwereren und teureren Generatoren wiegt die gute Netzverträglichkeit die Kosten wieder auf)
- schließlich der Rotor mit Rotorwelle: der je nach Bauart mit dem Generator direkt oder über ein Getriebe verbunden ist

Die Art des Rotors und seine Achslage sind zudem die optisch signifikantesten Merkmale der unterschiedlichen WEA: so wird hierbei zwischen vertikalen und horizontalen Windkraftanlagen unterschieden.<sup>25</sup>

## Horizontale WEA und ihre Vor- und Nachteile

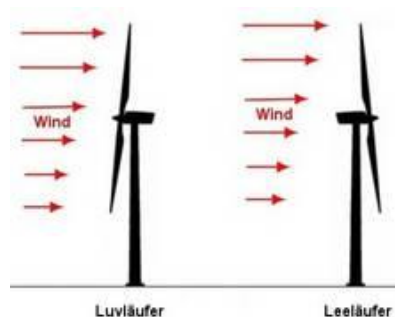


Abbildung 4: Lee- und Luvläufer

2

WEA mit horizontal liegender Rotorachse lassen sich in Lee- und Luvläufer unterscheiden (siehe Abbildung 4). Beim Leeläufer ist zumindest bei kleineren Anlagen keine Windnachführung nötig, da sich die Gondel selbständig in den Wind dreht. Der Luvläufer dagegen benötigt eine Nachführung, sei sie passiv durch eine Windfahne (v.a. bei Kleinwindanlagen) oder aktiv durch einen

e.V. (Konstruktiver Aufbau einer Windkraftanlage)

Elektromotor. Bei den großen Anlagen hat sich der Luvläufer durchgesetzt. Hauptsächlich aus dem Grund, weil die Rotorblätter beim Durchschreiten der Lee-Seite des Mastes (Windschatten) einen kurzzeitigen Luftstromabriss erfahren, welcher einerseits das Material stark belastet, andererseits zu Schwingungen führt.<sup>26</sup>

Auch die Anzahl der Flügel spielt eine große Rolle für die Wirtschaftlichkeit und Robustheit der Anlage. Eine gerade Zahl an Flügeln führt zu einer schlechten dynamischen Stabilität. Nur ein Flügel hinterlässt Schwingungsprobleme, die mit Gegengewichten schwer austarierbar sind. Aus diesen Gründen hat sich im modernen Anlagenbau der dreiflüglige Rotor meist durchgesetzt.<sup>27</sup>

#### *Vor- und Nachteile der Horizontalachsenanlagen (HAWT):*

HAWT, die fast ausschließlich in Propellerbauform realisiert werden, haben demnach den "technologische[n] Entwicklungsvorsprung der Propellerbauart" (Hau, S. 69) als entscheidenden Vorteil. Daraus resultierend ist der Wirkungsgrad dieser Rotoren erwiesenermaßen am höchsten im Vergleich zu allen anderen Bauarten. Eine Blatteinstellwinkelregelung (die zumindest bei den Großanlagen immer vorhanden ist) ermöglicht die Kontrolle über Drehzahl und Leistungsabgabe. Darüber hinaus ist dieser Mechanismus am wirkungsvollsten, den Luftstrom an den Rotoren abreißen zu lassen und sie somit vor Zerstörung durch zu hohe Windstärken zu schützen.<sup>28</sup>

Demgegenüber stehen Nachteile wie das Anfahrverhalten; durch die geringe Flügelzahl fällt es dem Rotor schwer, in Windschwächeren Gegenden selbständig anzulaufen. Die Komplexität des gesamten Aufbaus mit Vorrichtungen für Anstellwinkeländerung, Windnachführung, Drehzahlregulierung, Bremsvorrichtungen etc. machen ein Regelsystem unabdingbar. Dieses muss allerdings auch laufend überwacht werden, um einer möglichen Fehlfunktion schnell entgegenwirken zu können und die Anlage vor Schaden zu bewahren.<sup>29</sup>

---

<sup>26</sup> Vgl. Bundesverband WindEnergie e.V. (Luv- und Leeläufer)

<sup>27</sup> Vgl. Crastan, S. 353

<sup>28</sup> Vgl. Hau, S. 69

<sup>29</sup> Vgl. König, S. 89 f

Winfried Schatter weist in seinem Buch außerdem auf die Sturmanfälligkeit und damit verbundene Sicherungsproblematik von HAWT hin. Die notwendige Windnachführung erfordert eine weitere Lagerung (sog. Azimutlager).<sup>30</sup>

---

<sup>30</sup> Vgl. Schatter, S. 108 und Hau, S.78

## Vertikale WEA und deren Vor- und Nachteile

Trotz vieler Abwandlungen hinsichtlich der Geometrie oder gar Kombinationen der verschiedenen Bauformen sind Vertikalachsrotoren grundsätzlich in drei Kategorien zu unterteilen: der Savonius-Rotor, der Darrieus-Rotor und der H-Rotor (siehe Abbildung 5).

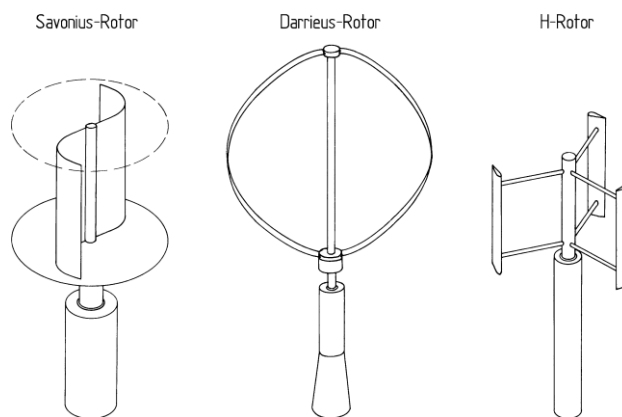


Abbildung 5: Rotorformen mit vertikaler Drehachse<sup>31</sup>

Der Savonius-Rotor, ein reiner Widerstandsläufer, stellt die älteste Variante dar, Windenergie zu nutzen. Neben dem bereits erwähnten Anemometer (in Kapitel 0) begegnet man diesem Rotor auch beispielsweise auf LKWs und Eisenbahnwaggons zur Belüftung<sup>31</sup>. Das Prinzip ist simpel: um die rotierende Achse des geschlossenen Savonius-Rotors sind zwei (durchaus aber auch drei oder mehr) Widerstandselemente um die Drehachse angeordnet; jeweils eine ihrer Kanten ist mit der Rotorachse verbunden (geschlossener Savonius). Beim offenen (englisch: split Savonius) Profil sind die Blätter etwas versetzt über die Achse hinaus platziert. Die dadurch entstehende Strömung durch den Luftspalt sorgt dafür, dass auf der dem Wind abgewandten Profilstärke entstehende Sog abgebaut wird, der die Rotation abbremsen würde.<sup>32 33</sup>

In einem Fachbeitrag wird der maximale Leistungsbeiwert moderner Savonius-Rotoren mit 0,28 und die Schnelllaufzahl mit etwa 1,6 angegeben<sup>34</sup>; den Berechnungen in Kapitel 0 zufolge ist es aber nicht möglich, einen Leistungsbeiwert größer als 0,193 zu erreichen. Auch die angegebene Schnelllaufzahl liegt höher als sie theoretisch für reine Widerstandsläufer möglich ist (siehe Kapitel 0). Solche Angaben könnten beispielsweise durch ein falsches Interpretieren von Herstellerangaben entstehen.

---

<sup>31</sup> Vgl. Hau, S. 66

<sup>32</sup> Vgl. Schatter, S. 202

<sup>33</sup> Vgl. Anhang: Anlage 2.2 (Der Savonius-Rotor)

<sup>34</sup> Vgl. Wikipedia: Savonius-Rotor

Die wenigsten auf dem Markt erhältlichen Widerstandsläufer sind rein vom Widerstandsprinzip abhängig, sie besitzen eine Auftriebskomponente, welche durch windschnittige Rotorformen realisiert werden

Mit der gezielten Auseinandersetzung mit der Aerodynamik in Verbindung mit der Luftfahrt eröffnete sich die Möglichkeit, das Prinzip für die Windkraftnutzung anzuwenden. So wurde 1925 vom französischen Erfinder und Luftfahrtingenieur Georges Jean Marie Darrieus der Darrieus-Rotor entworfen. Dieser diente als Grundlage für den von Ernst Schneider und der Firma Voith ein Jahr später entwickelten Voith-Schneider-Antrieb (VSP), der in der Binnenschifffahrt als Kombination aus Ruder und Antrieb vor allem bei Hafenschleppern, Schwimmkränen etc. seine Anwendung findet. Der VSP ist mit beweglichen Blättern ausgestattet, um den Wirkungsgrad zu erhöhen; dies ermöglicht eine sehr gute Wendigkeit auf engstem Raum<sup>35</sup>. Darrieus dagegen nahm den Leistungsverlust durch unbewegliche Flügel gezielt in Kauf. Seiner Überlegung zufolge war bei einer Annahme einer hohen Rotordrehzahl demnach auch die Umfangsgeschwindigkeit groß. Je höher nun die Rotorgeschwindigkeit ist, desto „radialer“ liegt der effektive Wind. Durch diese Näherung erspart sich Darrieus bei der Auslegung seines Rotors aufwendige Vorrichtungen zur Einstellung des Anstellwinkels trotz des relativ geringen Verlusts, der damit einher geht. Darüber hinaus konstruierte er seine Rotorblätter von der oberen zur unteren Achslagerung oval gebogen (siehe Abbildung 5), um an jeder Stelle des Flügels nahezu reine Zugbelastung, keine Biegemomente zu erhalten.<sup>36</sup>

Trotz dieser zwischenzeitlich in Vergessenheit geratenen Entwicklung wurde sie Ende des 20. Jhdt. wieder aufgegriffen, da sie sich als ausbaufähiges und zukunftssträchtiges Modell erwies. So waren 1984 in Deutschland 20% aller errichteten WEA Darrieus-Rotoren.<sup>37</sup>

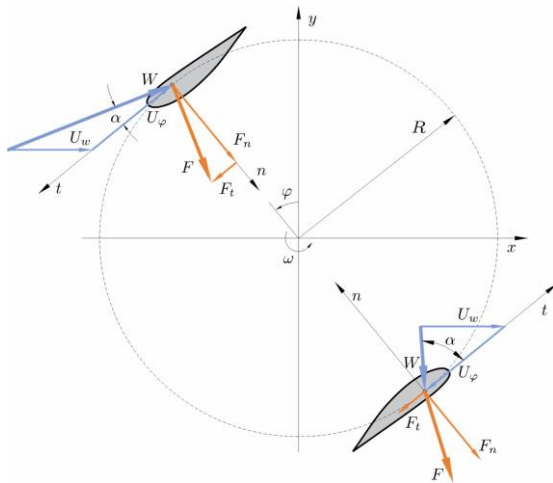
Einige Aspekte des Darrieus-Rotors konnten durch die Weiterentwicklung hin zum H-Rotor verbessert werden. Das Wirkungsprinzip ist identisch mit dem der Darrieus-Anlage. Hauptsächlich in Deutschland, England, Kanada und den USA setzt man auf eine kommerzielle Lösung im Vertikalachsen-Anlagenbau. Bei dieser Bauform sind die geraden Rotorblätter senkrecht angeordnet und bewegen sich auf einer zylindrischen Mantelebene um die Rotorachse. Die Herstellung der Rotorblätter ist um einiges einfacher als beim ursprünglichen Darrieus-Rotor (vgl. Abbildung 5); das Verfahren des Stranggießens beispielsweise ermöglicht das Herstellen von leichten, aerodynamischen Profilen in günstiger Meterware.<sup>37</sup>

---

<sup>35</sup> Vgl. Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik Band 5, S. 4914

<sup>36</sup> Vgl. König, S. 125 ff

<sup>37</sup> Vgl. Khammas, Teil C: Vertikalachsen-Rotoren



**Abbildung 6 Auftriebsprinzip von vertikalen WEA<sup>38</sup>**

Abbildung 6 zeigt die Kraftwirkung bei der Rotation eines auftriebsnutzenden Vertikalachs-Rotors in der Draufsicht. Hier strömt der Wind von links den Rotor an ( $U_w$ ), der blaue Vektor  $W$  beschreibt die effektive Anströmgeschwindigkeit und der rote Vektor  $F$  ist die aerodynamische Kraft, die am Flügel wirkt.<sup>38</sup>

Trotz einiger Vereinfachungen durch das Erscheinen des H-Rotors ist eine solche Anlage im Megawattbereich wegen ihrer hohen Herstellungskosten bisher nicht Konkurrenzfähig. Die

Konstruktion und Rentabilität von vertikalen Windenergieanlagen beschränken sich momentan auf Größen bis einige hundert Kilowatt Leistung.<sup>39</sup> Trotzdem wird von verschiedenen Seiten in diese Richtung weiter geforscht und getestet: die Hochschule Bremerhaven entwickelte 2006 einen modifizierten H-Rotor mit gewundenen Blättern und Abstumpfung an den Blattspitzen, wodurch eine erhebliche Geräuschreduzierung erreicht wird<sup>40</sup>. Das Umgestalten der Blattenden verhindert die Bildung von Windwirbeln, die für ein surrendes Geräusch sorgen. Dies wurde später auch von vielen Herstellern kopiert und übernommen. 2008 rüstet die Firma Ericsson ihren "Tower Tube" in Schweden mit einem H-Rotor aus, der die Stromversorgung der Anlage unterstützen soll<sup>40</sup>. An dieser Stelle könnte man noch diverse Ideen und Innovationen erwähnen, die es teilweise auch über das Reißbrett hinaus zur Realisierung gebracht haben.<sup>41</sup>

Neben den oben genannten und von der Fachliteratur oft sehr detailliert beschriebenen Arten von WEA, wobei die VAWT oft nur der Vollständigkeit halber erwähnt ist, werden zwei Rotor-Arten ganz außer Acht gelassen: der Canstein-Rotor oder kurz C-Rotor, benannt nach seinem Erfinder Carl von Canstein; er sah das Anwendungsgebiet seines neuen Konzepts im Kleinwindanlagenbau. Dieser entdeckte 1989 durch Zufall eine bis dahin unbekannte Art der Gestaltung eines Vertikalachs-Rotors, was letztendlich 1991 auch zu einem Patent führte (Patentnummer: DP 41 20 908) (vgl. Abbildung 7). Nach 13 Jahren jedoch wurde das Patent freigegeben woraufhin sich schnell mit Hilfe einschlägiger

<sup>38</sup> Vgl. Pilotstudie: Kurzfassung des Abschlussberichts, S. 5

<sup>39</sup> Vgl. Schatter, S. 134

<sup>40</sup> Vgl. Anhang: Anlage 2.3 (Beispiele für realisierte VAWT)

<sup>41</sup> Vgl. Khammas, Teil C: Vertikalachsen-Rotoren

Internetforen<sup>42</sup> (mit von Canstein als Mitbegründer) eine Fangemeinde mit unterschiedlichen Kenntnissen und Fähigkeiten hervor tat. Erst durch die Patentfreigabe wurde, wenn auch nur von enthusiastischen und interessierten Privatpersonen, rege Forschung betrieben.<sup>43</sup>

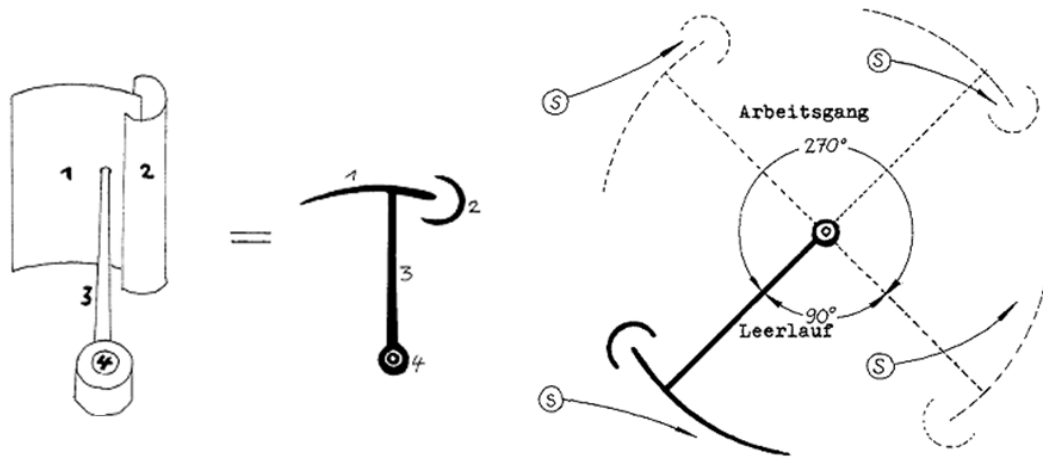


Abbildung 7: Prinzip des C-Rotors von Carl von Canstein<sup>44</sup>

Das Prinzip des durchströmten Flügelprofils ist ein Hybrid aus Darrieus- und Savonius-Rotor. Durch den vortriebsnutzenden Teil des Rotors (Abbildung 7, Halbmond, Nr. 2) wird die träge Anlaufphase überwunden und es ist ein Start schon bei geringen Windgeschwindigkeiten möglich.<sup>45</sup>

Die zweite erwähnenswerte aber relativ unbekanntere Rotorvariante ist der Lenz-Rotor (Abbildung im Anhang: Anlage 2.3). Ed Lenz aus Michigan stellt 2005 seinen äußerst leise arbeitenden dreiflügligen Widerstandsläufer vor und macht seine Konstruktion mit den Erfahrungen und Ergebnissen öffentlich. Der Lenz- und der Canstein-Rotor sind die in bereits erwähnten Internetforen am meisten diskutierten und nachgebauten VAWT.

<sup>42</sup> Vgl. [www.daswindrad.de](http://www.daswindrad.de) und [www.kleinwindanlagen.de](http://www.kleinwindanlagen.de)

<sup>43</sup> Vgl. Anhang: Anlage 1.2 (Im Gespräch: Carl von Canstein)

<sup>44</sup> Vgl. [www.dasWindrad.de](http://www.dasWindrad.de), der C-Rotor, Zusammenfassung (Stand Januar 2009)

<sup>45</sup> Vgl. Khammas, Teil C: Vertikalachsen-Rotoren

## ***Vor- und Nachteile der Vertikalachsenanlagen (VAWT):***

Der wohl größte Vorteile dieser Anlagenform besteht darin, dass sie windrichtungsunabhängig arbeitet, was letzten Endes eine erhebliche Vereinfachung bei der Konstruktion nach sich zieht, da im Gegensatz zu horizontalen WEA lediglich eine Rotationsachse vorhanden ist.

Nach der in diesem Kapitel bereits beschriebenen Theorie von Darrieus ist zumindest bei reinen Auftriebsläufern, ob Darrieus- oder H-Rotor, eine Blattverstellung nicht nötig; diese würde zwar den Leistungsbeiwert erhöhen aber auch die Komplexität der Konstruktion.

Die senkrecht stehende Rotorachse lässt sich bis zum Boden führen; dies ermöglicht eine statisch einfache Unterbringung des Generators in Bodennähe. Darüber hinaus erleichtert dies den Betrieb und die Wartung einer derartigen Anlage.

Verglichen mit HAWT ist die Schwerkraftbelastung der Rotorblätter immer gleichmäßig. Durch meist zweipunktgelagerte Rotoren können Schwingungen, Gewichts- und Rotationsbelastungen relativ gut gedämpft werden. Diese Art der Lagerung vereinfacht auch den Einsatz von Konzentratoren welche auf derselben Achse gelagert werden können; diese sind jedoch Windrichtungsabhängig und müssen demnach eine eigene Lagerung besitzen.

Der Geräuschpegel ist speziell beim Widerstandsläufer sehr niedrig, dies liegt hauptsächlich an der geringen Schnelllaufzahl. Hinzu kommt aufgrund seiner Robustheit, dass er nahezu wartungsfrei funktioniert.<sup>46</sup>

Speziell für Widerstandsläufer gilt eine gute Böen- und Turbulenzverträglichkeit; diese Windverhältnisse herrschen an nahezu allen relevanten Standorten vor allem in Bodennähe. Dadurch kann auch eine potenzielle Nutzung von Strömungen erfolgen, die von Hindernissen wie Dachkanten, Schluchten und Tunnels verursacht werden. Kreisbahnlagerung am Boden lässt gegenüber der konstruktiv begrenzten Horizontaldrehachse theoretisch unbegrenzte Größenordnungen zu.<sup>47</sup>

Gravierender Nachteil sind die durch Lastwechsel resultierenden Schwingungen, die zu Problemen in der Statik führen können und zusätzliche Geräuschentwicklung und Materialbelastungen nach sich ziehen. Dies wirkt sich aber hauptsächlich auf den weniger robusten Darrieus-Rotor aus.

---

<sup>46</sup> Vgl. Schatter, S. 133 und Khammas, Teil C: Vertikalachsen-Rotoren

<sup>47</sup> Vgl. Khammas, Teil C: Vertikalachsen-Rotoren



Eine geringe Bauhöhe wirkt sich vor allem beim Auftriebsläufer sehr negativ aus: bodennahe Böen oder Turbulenzen, die für Widerstandsläufer kein Problem darstellen, sorgen beim Darrieus- oder H-Rotor für einen sofortigen Strömungsabriss am Rotorblatt. Erst bei bestimmten Höhen sind kaum mehr Böen und damit eine relativ konstante Windgeschwindigkeit zu verzeichnen.<sup>48</sup>

Die für eine konstante Leistungsabgabe notwendige Drehzahl- und Leistungsregelung ist bei VAWT oft nur durch die Generatorbremse bzw. einer zusätzlichen Bremsvorrichtung realisiert, da eine Rotorblattverstellung für eine derartige Regelung meist nicht vorhanden ist. Während die beweglichen Rotoren einer HAWT aus dem Wind genommen werden können, ist es einer Vertikalachsanlage nicht möglich, eine sturmsichere Stellung einzunehmen.<sup>49</sup>

Abbildung 7 beschreibt auch die für alle Auftriebsläufer geltende Theorie des energetischen Nutzens. So bewegt sich  $\frac{1}{4}$  des Rotordrehkreises dort, wo strömungstechnisch der Widerstand seiner Ausbeute überwiegt. Bestenfalls  $\frac{3}{4}$  des Drehkreises sind in der Lage, aus dem Wind Energie zu ziehen. Logisch betrachtet gilt für den reinen Widerstandsläufer ein Arbeitsgang von maximal der Hälfte des Drehkreises.

Ein alleiniges Anlaufen des Auftriebsrotors ist durch sein träges Startverhalten nur sehr schwer möglich<sup>50</sup>; hierzu wurde bereits früh mit Hybriden experimentiert. Der Widerstands-Anteil diene hierbei als Anlaufhilfe da dieser im Vergleich zum Rotor mit Auftriebsprinzip schon bei geringen Windstärken selbständig anlaufen kann.

---

<sup>48</sup> Vgl. Wikipedia: Darrieus-Rotor

<sup>49</sup> Vgl. Hau, S.68

<sup>50</sup> Vgl. Schatter, S. 133

## Literaturverzeichnis

*BWE - Marktübersicht 2010 (Zeitschrift)*; Berlin: Bundesverband WindEnergie e.V.

*BWE - Wind Energy Market 2009 (Zeitschrift), engl. Fassung*; Berlin: Bundesverband WindEnergie e.V.

Crastan, V. (2009). *Elektrische Energieversorgung 2: Energie- und Elektrizitätswirtschaft, Kraftwerktechnik, alternative Stromerzeugung, Dynamik, Regelung und Stabilität, Betriebsplanung und -führung*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

Hau, E. (2008). *Windkraftanlagen - Grundlagen, Technik, Einsatz, Wirtschaftlichkeit; 4., vollständig neu bearbeitete Auflage*. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.

*Knaurs Lexikon in zehn Bänden*. (1979). München: Lexikographisches Institut München.

König, F. v. (1977). *Wie man Windräder baut - Konstruktion und Berechnung - Ein Informationswerk zur modernen Nutzung der Windenergie*. München: Udo Pfriemer Verlag GmbH.

Molly, J.-P. (1990). *Windenergie: Theorie - Anwendung - Messung*. Karlsruhe: Verlag C. F. Müller GmbH.

Schatter, W. (1987). *Windkonverter: Bauart, Wirkungsgrade, Auslegung*. Braunschweig: Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH.

Dr. Schriever, K.-H., & Dr. Schuh, F. (1981). *Enzyklopädie Naturwissenschaft und Technik*. Landsberg a. Lech: Moderne Industrie, Wolfgang Dummer & Co.

Thommen, J.-P., & Achleitner, A.-K. (2009). *Allgemeine Betriebswirtschaftslehre: Umfassende Einführung aus managementorientierter Sicht*. Wiesbaden: Gabler GWV Fachverlag GmbH.

Wöhe, G. (1993). *Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre - 18. überarb. und erw. Aufl. unter Mitarbeit von Ulrich Döring*. München: Verlag Franz Wahlen GmbH.

Zahoransky, R. A. (2007). *Energietechnik: Systeme zur Energieumwandlung. Kompaktwissen für Studium und Beruf*. Wiesbaden: Friedr. Vieweg & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH.

## weitere Informationsquellen

*BWE (Internetauftritt), Stand: Juni 2010; Berlin: Bundesverband WindEnergie e.V.*

<http://www.wind-energie.de/de/technik/>

*www.dasWindrad.de, Der C-Rotor (Internetforum), Stand: Juni 2010; Vechelde: Bernd Hagemann*

<http://www.daswindrad.de/forum/viewtopic.php?f=2&t=21>

*Marktforschung für die Bau- Installations- und Immobilienbranche (Internetauftritt),  
Pressemitteilung: SHK-Handwerker konsultieren Fachzeitschriften zur Produktinformation, Stand: Juli  
2008; Düsseldorf: BauInfoConsult GmbH*

<http://www.bauinfoconsult.de/Default.aspx?PageNode=328&PageID=848>

*Datenbank des BMWi (Internetauftritt), Stand: Juli 2010; Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft  
und Technologie*

<http://www.bmwi.de/BMWi/Navigation/Energie/Statistik-und-Prognosen/energiedaten.html>

*Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz - EEG) (Internetauftritt),  
Stand: September 2010; Berlin: Bundesministerium der Justiz*

[http://bundesrecht.juris.de/eeg\\_2009/BJNR207410008.html](http://bundesrecht.juris.de/eeg_2009/BJNR207410008.html)

*Gründerleitfaden Multimedia, Marktanalyse (Internetauftritt), Stand: Juli 2010; Berlin: VDI/VDE  
Innovation + Technik GmbH*

<http://www.gruenderleitfaden.de/todo/vorbereitung/marktanalyse.html>

*Buch der Synergie (Internetauftritt), Stand: Juni 2010; Damaskus / Syrien: Achmen A. W. Khammas*

<http://www.buch-der-synergie.de/>

*Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen: Arbeitspaket Marktanalyse "Kleine  
Windkraft", 2009 (PDF-Dokument), Heidelberg: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung  
Heidelberg GmbH*

<http://www.ifeu.de/index.php?bereich=ene&seite=windkraftanlagen>

*Pilotstudie zur Akzeptanz vertikaler Windenergieanlagen: Kurzfassung des Abschlussberichts, 2009  
(PDF-Dokument), Halle: ifeu – Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH*

<http://www.ifeu.de/index.php?bereich=ene&seite=windkraftanlagen>

Wikipedia, die freie Enzyklopädie, Stand: August 2010; San Francisco: Wikimedia Foundation Inc.

<http://de.wikipedia.org>