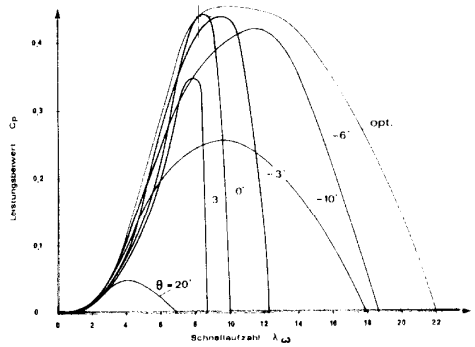
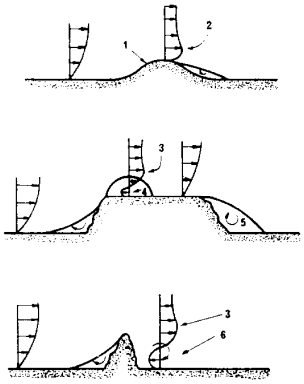
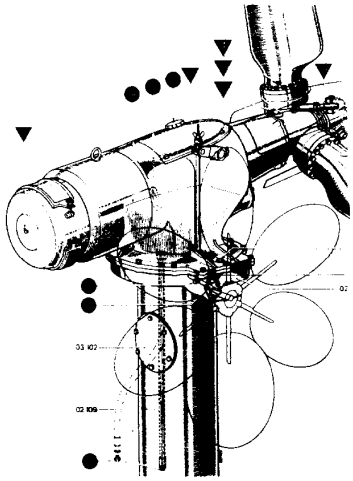
Freifahrende Turbinen
Windenergie

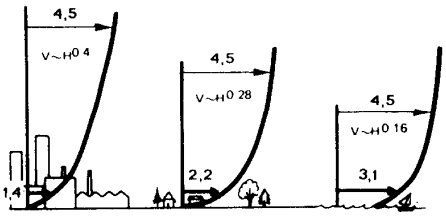
Vorlesungsmanuskript Version 9.0, ab WS 1999 / 00

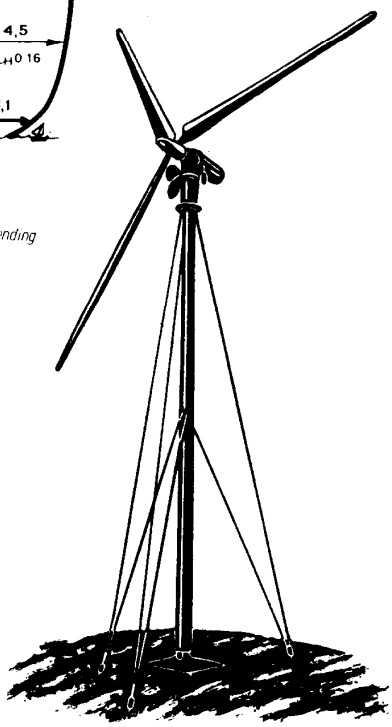
Heiner Dörner, Dipl. –Ing.
Fakultät Luft- und Raumfahrttechnik
Universität Stuttgart
Hauptdiplomstudium

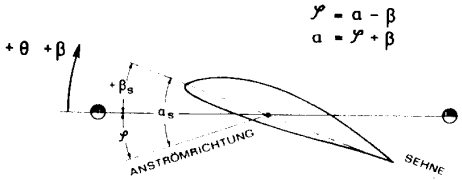


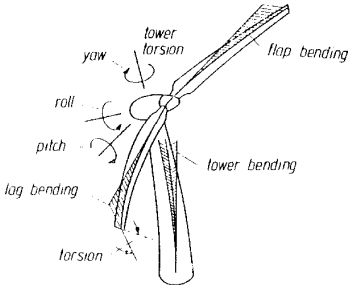


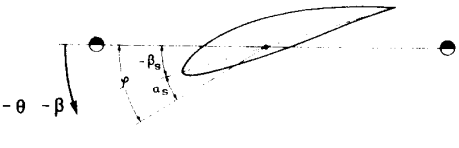


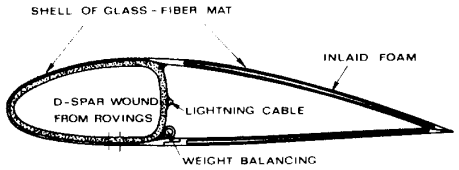


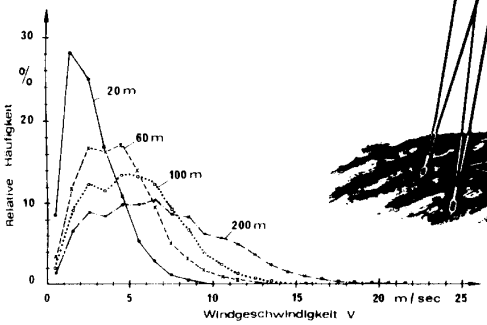


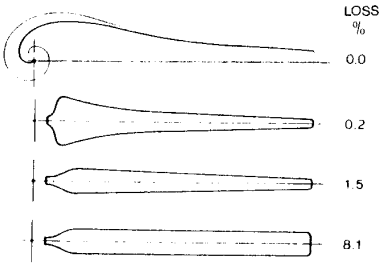












Verwendung des Manuskripts, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung des Verfassers

Windenergie - Potential

Die Bewegung der Atmosphäre wird durch Zufuhr von Strahlungsenergie der Sonne aufrechterhalten. Windenergie ist demnach eine sekundäre Form der Sonnenenergie. Die Größe der Bewegungsenergie die in allen Windströmungen enthalten ist, kann über Langzeitmessungen von Boden- und Höhenwinden sowie aus den Zuggeschwindigkeiten von Wetterfronten abgeschätzt werden. Ebenso kann man Grenzschichtmodelle mit variabler Bodenrauhigkeit zur Berechnung heranziehen.

Überlegungen dieser Art haben ergeben, daß 1,5 bis 2,5 % der auf die Erde eingestrahlten Sonnenenergie ($1{,}5 \cdot 10^9$ TWh/Jahr) ständig in Strömungsenergie der Atmosphäre umgewandelt werden. Das sind 2,3 bis $3{,}8 \cdot 10^7$ TWh/Jahr oder eine mittlere Leistung von 2,6 bis $4{,}3 \cdot 10^3$ Terrawatt.
Bis zu 3% dieser Energie, das sind 6,9 bis $11{,}4 \cdot 10^5$ TWh, könnten global durch Windenergie-Konverter aus der Atmosphäre entnommen werden. Dies entspricht einer mittleren Leistung von 130 Terrawatt .

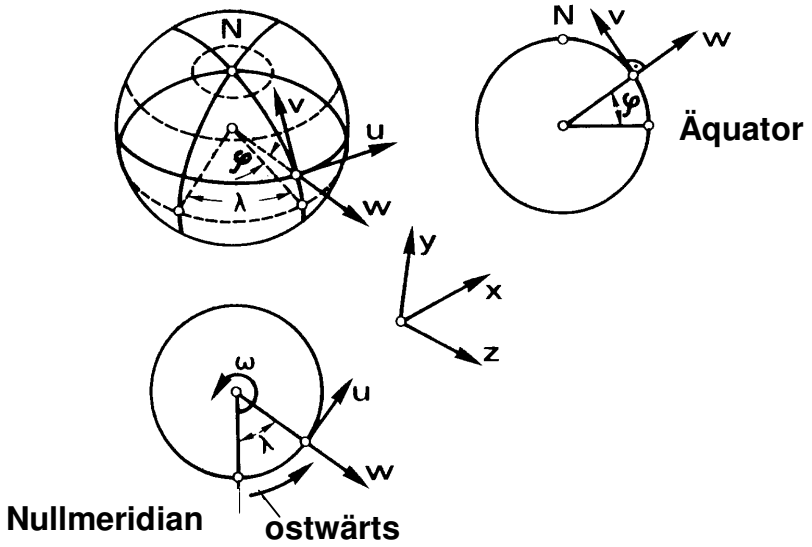
Es wurde ermittelt, daß ungefähr die Eintages - Strahlungsenergie der Sonne ständig in der Atmosphäre als kinetische Energie gespeichert ist. Das bedeutet, daß ohne Einstrahlung der Sonne, die Atmosphäre der Erde, betrachtet als riesiges Schwungrad, innerhalb von weniger als 10 Tagen vollständig zur Ruhe kommen würde. Bezogen auf die gesamte Erdoberfläche steht somit ständig eine Leistung von ca. 0,25 Watt/m^2 zur Verfügung.

In Westeuropa ergeben sich im Mittel pro Jahr $6{,}2 \cdot 10^3$ Terrawattstunden. Das ist etwa das Fünffache der in den letzten Jahren umgesetzten, elektrischen Energie. Hätte man in der Bundesrepublik Deutschland den elektrischen Endenergiebedarf aller Haushalte für ein repräsentativ Jahr der neunziger Jahre bereitstellen wollen, so wären dazu mindestens 20 000 Großanlagen des historischen GROWIAN-Typs notwendig gewesen. Flächenmäßig wäre diese Zahl allein auf der Fläche von Schleswig-Holstein unterzubringen. Die genannte Zahl stellt allerdings eine reine Energiemengen-betrachtung dar.

Berücksichtigt sind dabei nur Luftschichten, in die man aus technischen Gründen mit Großanlagen, wie dem genannten GROWIAN gelangen kann. Der Jahresertrag dieser Einzelanlage bewegt sich zwischen 8 und 12 GWh. Die Anlagen würden dabei in der voll turbulenten Grenzschicht stehen die bis zu 300 m Höhe dick ist. Der Grad der Turbulenz wird von der Bebauung am Boden, d. h. generell von der “ Bodenrauhigkeit “ (natürliche oder künstliche Hindernisse) abhängen.

Heute kann man Serienanlagen kaufen die sich den Dimensionen des alten GROWIAN nähern. Diese 3-flügeligen Windkraftanlagen erreichen 70 m Durchmesser und haben eine installierte Leistung von 1,5 bis 2 MW. (GROWIAN Ø 100 m, 3MW).

Im Vergleich zu anderen, regenerativen Energiequellen schneidet die Windenergie global gesehen enorm günstig ab. Ähnlich wie bei der Nutzung der Solarenergie werden jedoch flächenmäßig große Anlagen benötigt, da auch die Quelle Wind ein “ energie-dünnes “ Medium darstellt.



Definition von Atmosphärenkoordinaten und Geschwindigkeitskomponenten von Luftteilchen am Globus

Bewegungsgleichungen

$$\frac{du}{dt} - 2\,\omega\,(v \cdot \sin\varphi - w \cdot \cos\varphi) + \frac{1}{\varrho} \cdot \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\eta}{\varrho} \cdot \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right) = 0$$

$$\frac{dv}{dt} + 2\,\omega\,u \cdot \sin\varphi + \frac{1}{\varrho} \cdot \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\eta}{\varrho} \cdot \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right) = 0$$

$$\frac{dw}{dt} - 2\,\omega\,u \cdot \cos\varphi + g + \frac{1}{\varrho} \cdot \frac{\partial p}{\partial z} - \frac{\eta}{\varrho} \cdot \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) = 0$$

u, v, w sind Komponenten des Geschwindigkeitsvektors s mit den Lagekoordinaten $x = r\,\lambda$, $y = r\,\varphi$, $z = r + h$. λ ist die geographische Länge, φ die geographische Breite, r der mittlere Erdradius und h die Höhe über der mittleren Erdoberfläche. ω ist die Winkelgeschwindigkeit der Erdrotation, p der lokale Luftdruck, $\eta = \eta\,(\vartheta)$ die dynamische Zähigkeit der Luft und $\rho = \rho\,(p, \vartheta)$ die Luftdichte.

Die allgemeine Betrachtung führt zu einigen Sonderfällen der Bewegung von Luftkörpern.

Alle Luftbewegungen in freier Atmosphäre sind instationär. Die räumliche Temperaturverteilung weist Unstetigkeiten auf. Die Temperaturänderung vertikal bewegter Luftmassen erfolgt isentrop.

In der untersten Luftschicht, der Troposphäre, herrscht labile Schichtung vor. Kleine Störungen ergeben vertikale Luftbewegungen, *Auf- und Abwinde.*

Der *geostrophische Wind* ist die Bewegung von Luftteilchen in Höhen, die von der Bodenreibung unbeeinflußt sind (ab ca. 1000 Meter Höhe). Die Bewegung erfolgt tangential zu den gerade oder schwach gekrümmt verlaufenden Isobaren.

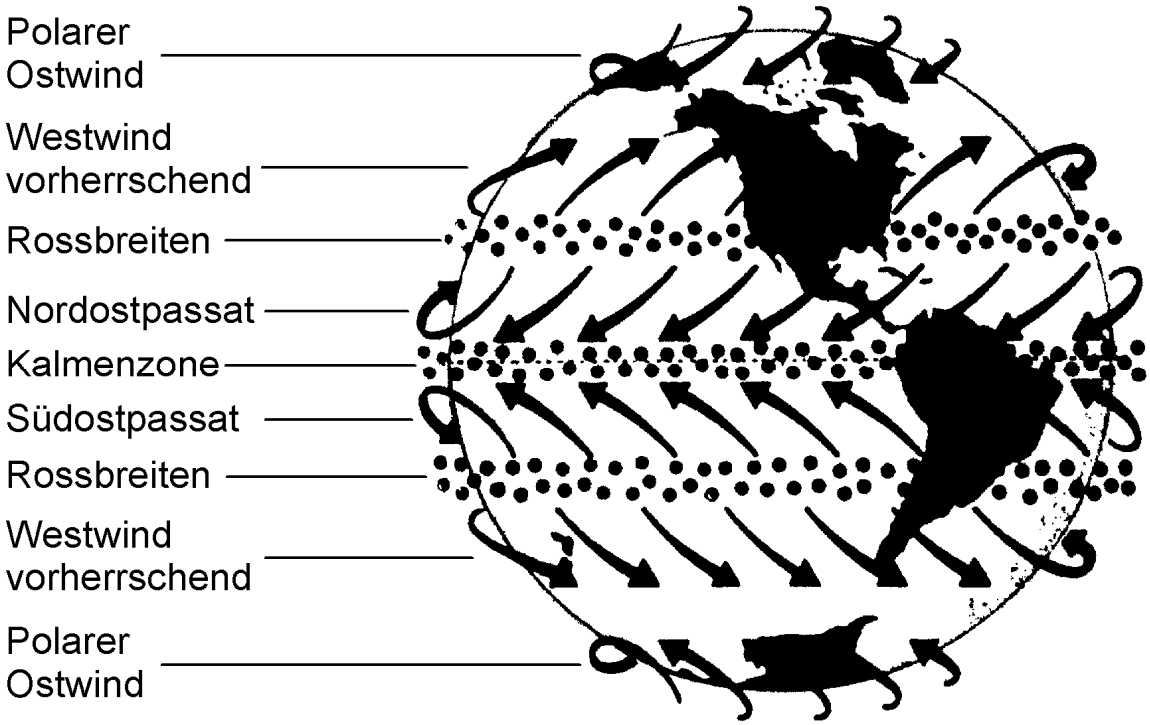
Bei stationärer Luftbewegung auf Bahnen mit annähernd konstanter, starker Krümmung wird $ds/dt \approx s^2/R$. Reibungsglieder dürfen vernachlässigt werden. Dies ist der sogenannte *Gradientwind.*

Die an bestimmte Tageszeiten gebundene Land- und Seewinde sowie Berg- und Talwinde sind sogenannte *antitriptische Winde.*

Bei Durchzug von Kaltluftfronten tritt der *zyklostrophische* oder *EULER-Wind* mit hohen Windgeschwindigkeitswerten auf.

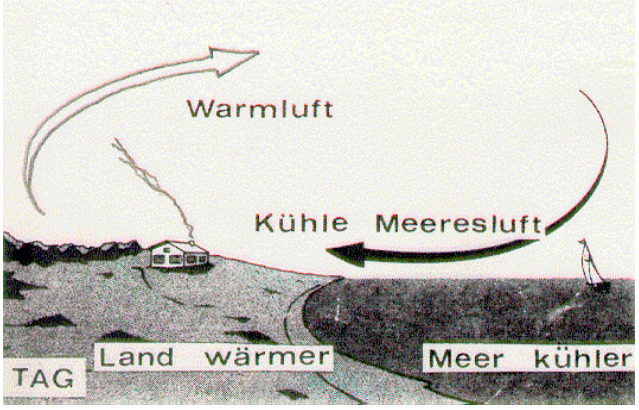
Besondere, globale Windströmungen

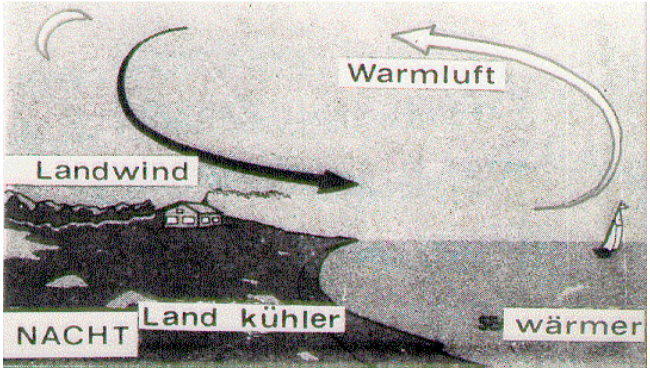
Entwicklung der Windströmung ohne Erdrotation



Entwicklung der Windströmung mit Erdrotation

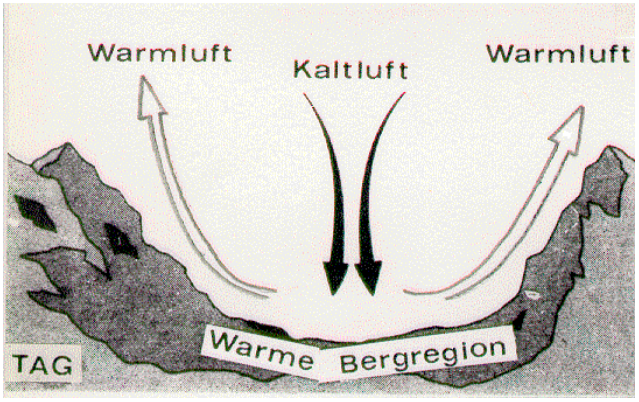
Entstehung von Landwind und Seewind

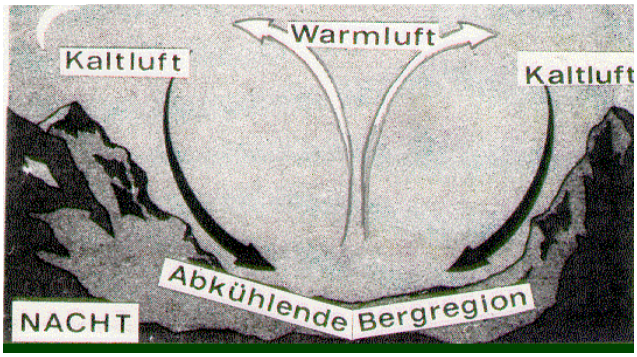




Antitriptische Winde

Entstehung von Bergwind und Talwind





Verlauf der Windgeschwindigkeit über Grund

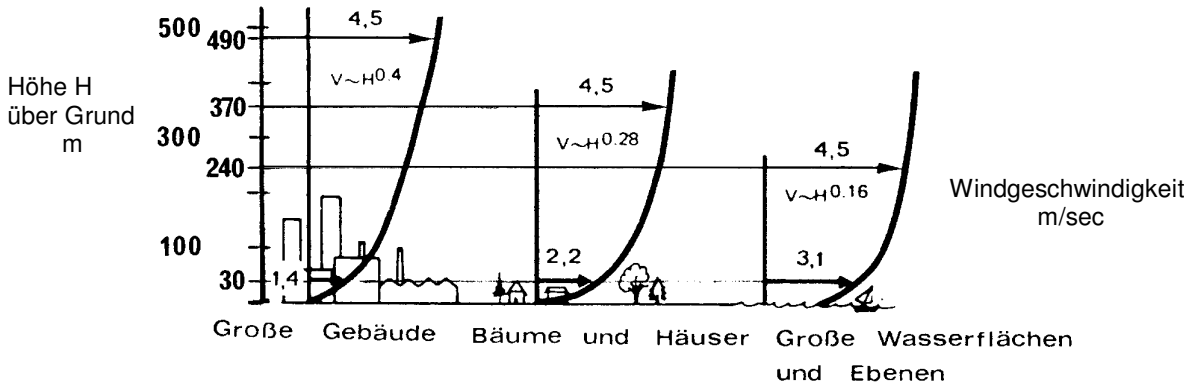
Die Zunahme der Windgeschwindigkeit über dem Erdboden hat idealisiert betrachtet einen parabolischen Verlauf. Es existieren zwei Verfahren zur näherungsweisen Berechnung der Windgeschwindigkeit über Grund.

1. Methode $V_H = V_{10} \cdot (H / 10)^{a}$

Der Exponent a ist für 3 typische Bodenkonfigurationen näherungsweise angegeben. V_{10} ist die Windgeschwindigkeit in der international festgelegten Meßhöhe von 10 Metern über Grund. Die gewünschte Höhe H wird in Metern eingesetzt.

a = 0,16	für glatte, ebene Flächen (Meer, unmittelbare Küstennähe)
a = 0,28	für nieder bewachsene, ebene Flächen (Küstenhinterland)
a = 0,40	für Grenzschichten z.B. über Städten mit hohen, künstlichen Hindernissen

Beispiele: Quickborn a = 0,20
Hamburg a = 0,23
Karlsruhe a = 0,35

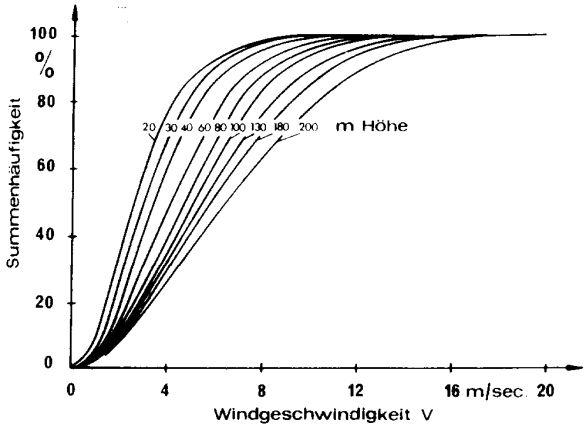


2. Methode

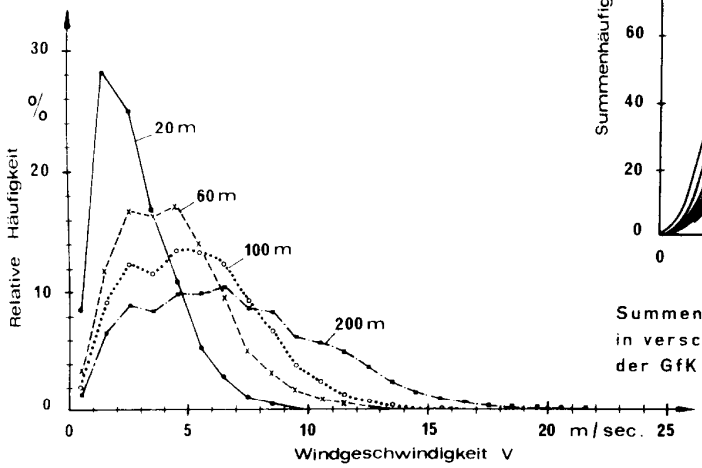
Es werden nicht einzelne Geschwindigkeiten, sondern Summenhäufigkeitslinien umgerechnet. Man bezieht sich auf eine bestimmte, prozentuale Summenhäufigkeit (Häufigkeitslinie), z.B.:

$$V_{H,20\%} = V_{10,20\%} \cdot (H / 10)^{b}$$

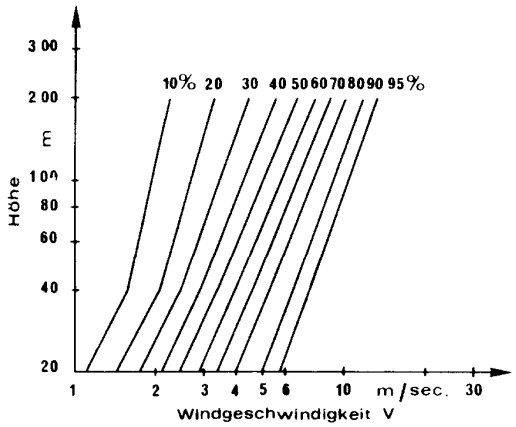
Es werden meist 10 Exponenten b ermittelt. Für jeden Summenhäufigkeitswert nimmt V nach einem Potenzgesetz zu, wobei steigende Summenhäufigkeit steilere Kurven ergibt, d.h. kleinere Exponenten b.



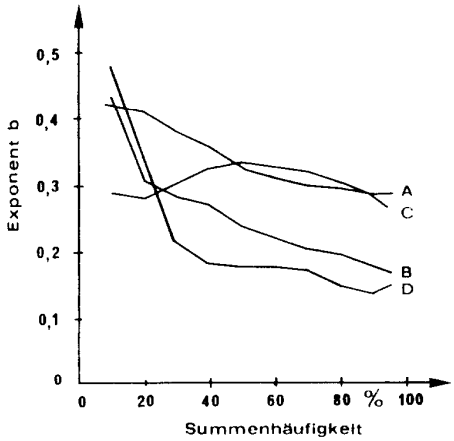
Summenhäufigkeit der Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen am meteorologischen Mast der GfK Karlsruhe



Absolute Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten in verschiedenen Höhen am meteorologischen Mast der GfK Karlsruhe



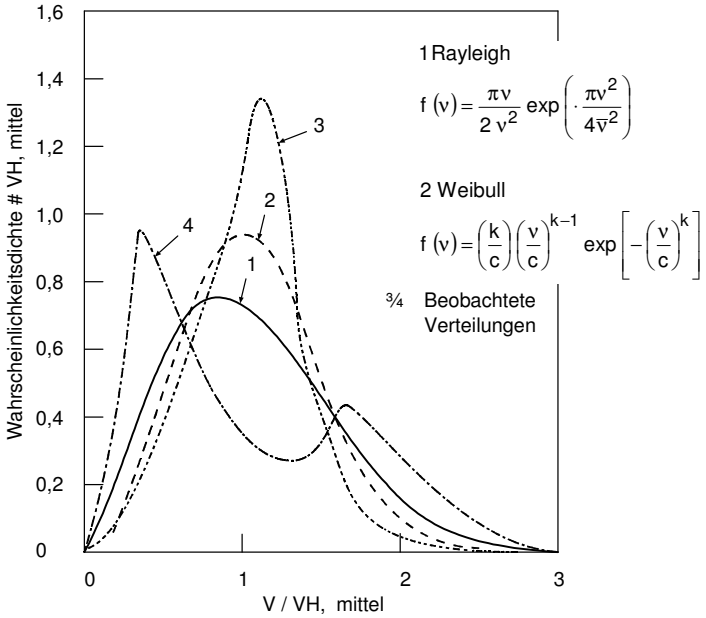
Abhängigkeit der Windgeschwindigkeiten für die verschiedenen Summenhäufigkeiten von der Höhe

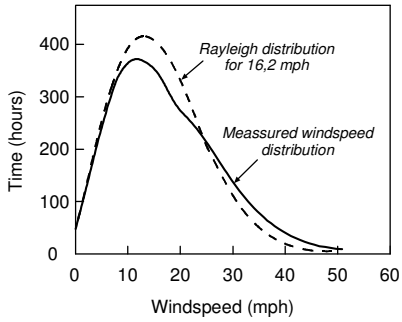


Abhängigkeit des Exponenten b der Höhenumrechnung von der Summenhäufigkeit

A Hamburg Funkturm
B Hamburg Flugplatz
C Karlsruhe Kernforschungszentrum
D Quickborn

Aus der Mathematik sind Wahrscheinlichkeits-Dichte-Funktionen bekannt die sich zur näherungsweisen Bestimmung von ortsspezifischen Windgeschwindigkeitshäufigkeits-verteilungen eignen.
Zur statistischen Beschreibung der Verteilung der Windgeschwindigkeiten wird z.B. die Weibull-Funktion benützt. 2 Form-Einstell-Parameter c und k sind dabei variabel. Für k = 2 erhält man den Spezialfall der Rayleigh-Verteilung.
Aus den unten gezeigten Diagrammen (englisch beschriftet) wird die breite Variations-möglichkeit der Form der Häufigkeitskurven ersichtlich. Der Bodenrauhigkeitseinfluß und der Höheneinfluß auf die Häufigkeitsverteilung der Windgeschwindigkeiten für spezielle Aufstellungsorte kann somit mathematisch berücksichtigt und vorhergesagt werden.





Comparsion of Rayleigh and measured wind-speed distributions for St. Ann's Head, England.

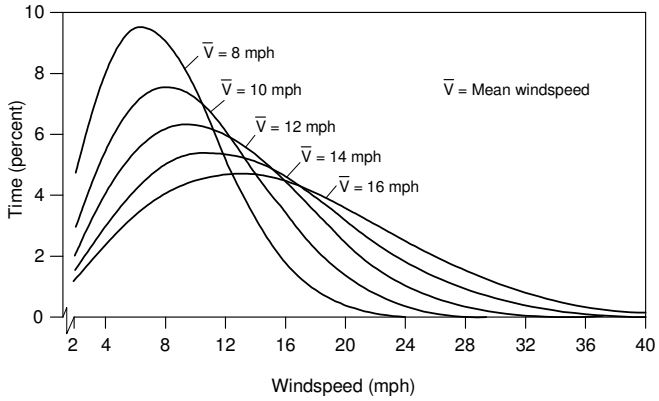
The Rayleigh distribution takes the following from:

$$\text{Hours} = 8{,}760 \times \frac{\pi}{2} \times \frac{V}{\bar{V}^2} \times e^{-k}$$

where V = windspeed
6 = mean windspeed
p = 3,1416
e = 2,718

$$k = \frac{\pi}{4} \times \left(\frac{V}{\bar{V}}\right)^2$$

This equation gives you the total number of hours per year you can expect the wind to blow at a windspeed`/ when the mean windspeed is 6 at that site.



The Rayleigh distribution versus windspeed for sites with mean windspeeds between 8 and 16 mph

Turbulenz

Moderne, sinnvolle und technisch machbare Windenergie-Konverter werden immer in einer voll turbulenten Grenzschicht (Mindestdicke 300 bis 500 m) stehen.
Die Schwingzeit der Turbulenz reicht von

a) wenigen Sekundenbruchteilen von kleingliedrigen Turbulenzballen (Einfluß auf: Lastannahmen der Einzelanlage, Energieverteilung über Rotorfläche)

b) einigen Sekunden bis Minuten, Dimension einige 100 Meter(Gewitterwolken und -walzen, Strömungsumkehr), (Einfluß auf: Gruppenaufstellung, Anlagen-Farmen, Energieausbeute der einzelnen Anlage in der Gruppe)

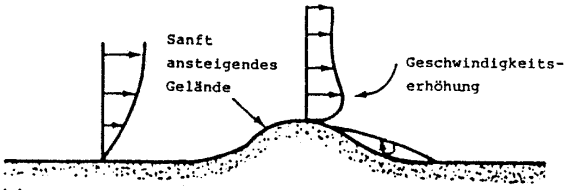
bis hin zu

c) Tages- und Wochenintervallen, Großwetterlagen (Einfluß auf: Mehrere Anlagen -Farmen mit einigen 100 km Abstand im Verbund, Speicherfragen)

Standortfragen und Empfehlungen

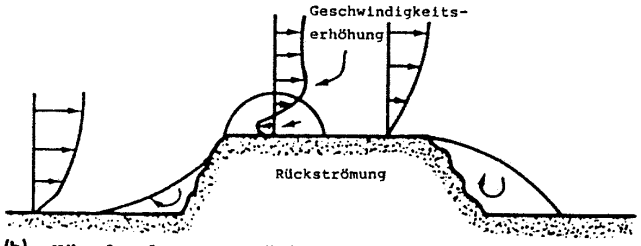
1. Windmessungen an Ort und Stelle; Extrapolation von nahegelegenen Wetterstationen für die Energieaussage mit großen Fehlern behaftet
   a) kontinuierlicher Schrieb
   b) Stundenmittel (8760 Werte/Jahr, Ermittlung 10 Minuten lang vor dem Meßzeitpunkt)
   c) Synoptische Einzelwertmessung (alle 3 oder 6 Stunden)
   d) Windmessungen 1 Jahr um jahreszeitliche Schwankungen zu erfassen (10-Jahresrythmus von windschwachen/windstarken Jahren ist bekannt)
2. Beurteilung der Umgebung, Topographie, Bebauung, Abschätzung der Höhenzunahme der Windgeschwindigkeit, Entscheidung über Turmhöhe
3. Spacing (Rasteraufstellung) bei Windenergie – Konverter - Farmen, Hauptwindrichtung beachten, 10 - 15 Rotordurchmesser Windlauflänge zur Stömungsauffrischung durch turbulenten Ausgleich aus energiereicheren, höheren Luftschichten

Standortfragen



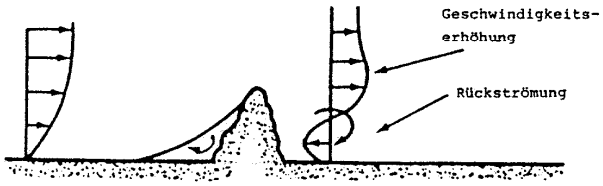
(a) Mäßig gewellte Hügel oder Bergrücken

(geeignete Standorte)



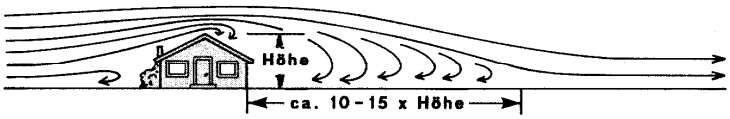
(b) Hügel oder Bergrücken mit steilen Flanken

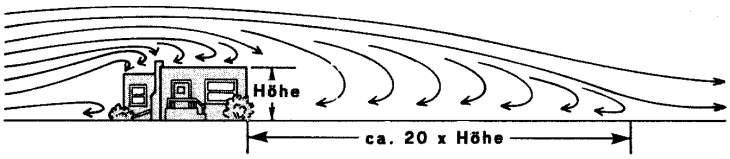
(ungeeignete Standorte)

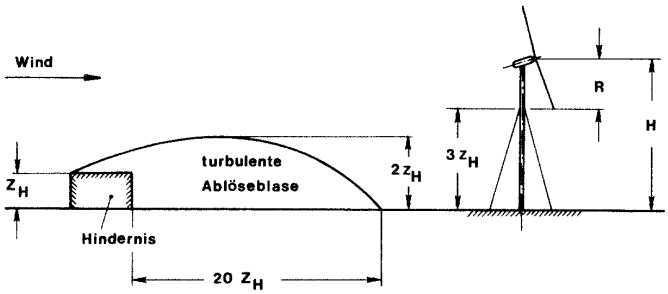


(c) Scharfe Erhebungen und Hindernisse

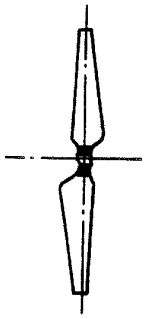
(können im Einzelfall geeignet sein)



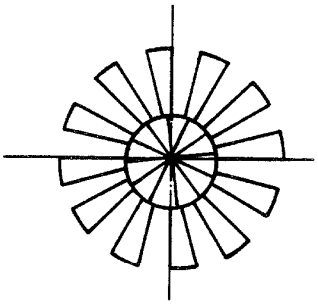




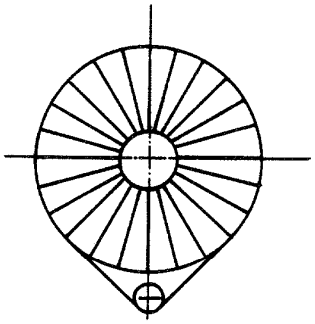
Horizontale Achse, auftriebnutzend ***Typologie***



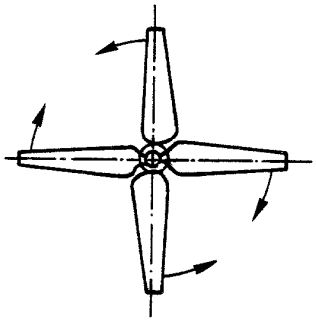
SCHNELLÄUFER



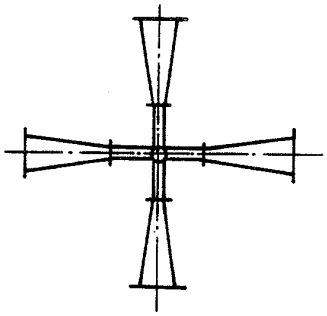
LANGSAMLÄUFER



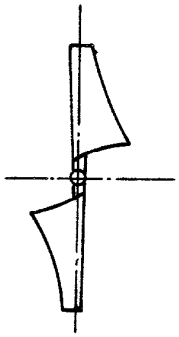
BICYCLE TYP



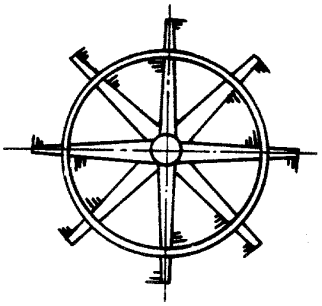
GEGENLÄUFIG



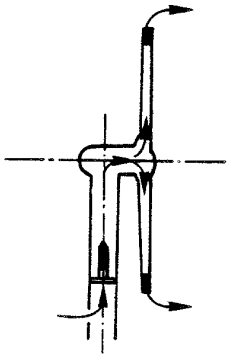
FLETTNER



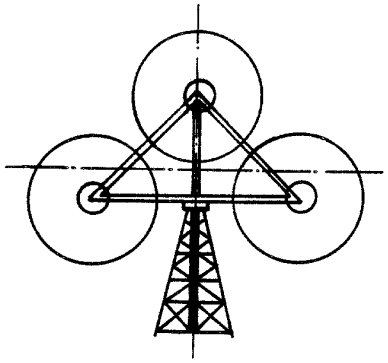
SEGEL-ROTORBLATT



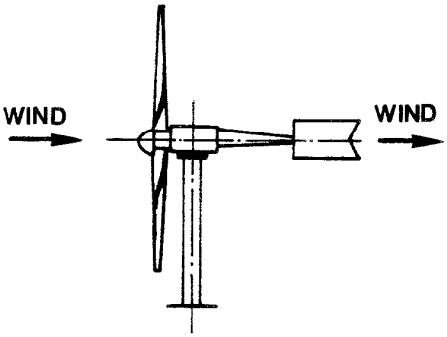
RINGGENERATOR



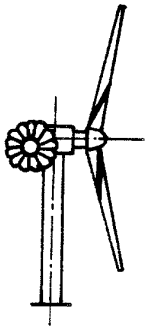
PNEUMATISCHE WELLE



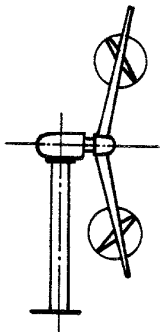
MEHRFACHROTOR



WINDFAHNE

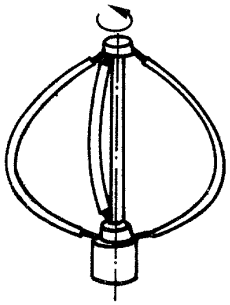


SEITENRAD

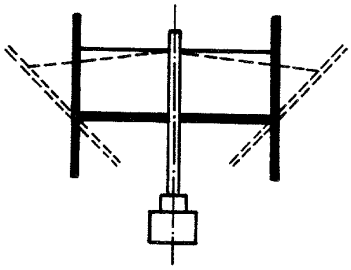


SCHLEPPTURBINE

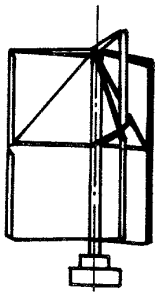
Vertikale Achse, auftriebnutzend



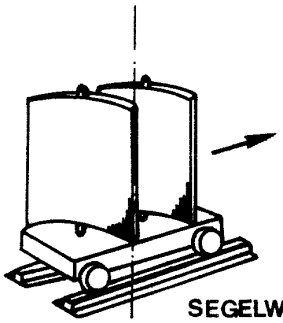
DARRIEUS



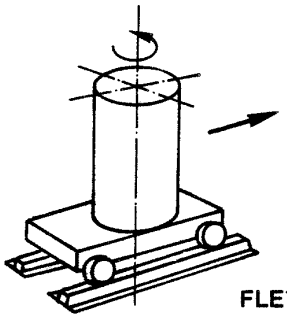
H – DARRIEUS



GIROMILL

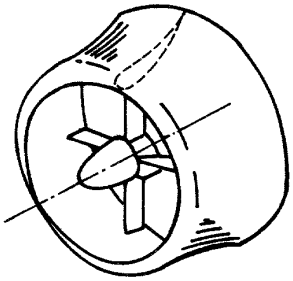


SEGELWAGEN

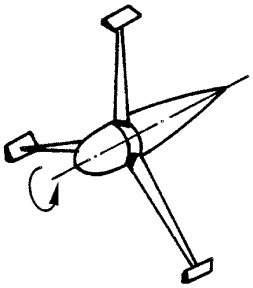


FLETTNER – WAGEN

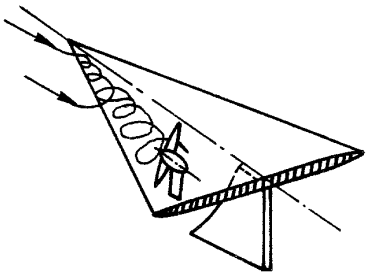
Konzentrierende Maschinen



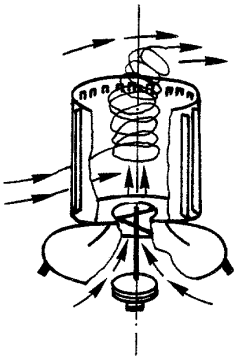
MANTELTURBINE



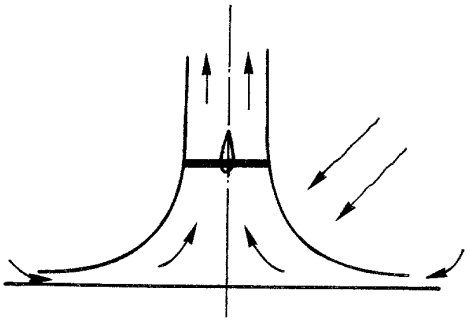
QUASI – MANTEL



VORDERKANTENWIRBEL

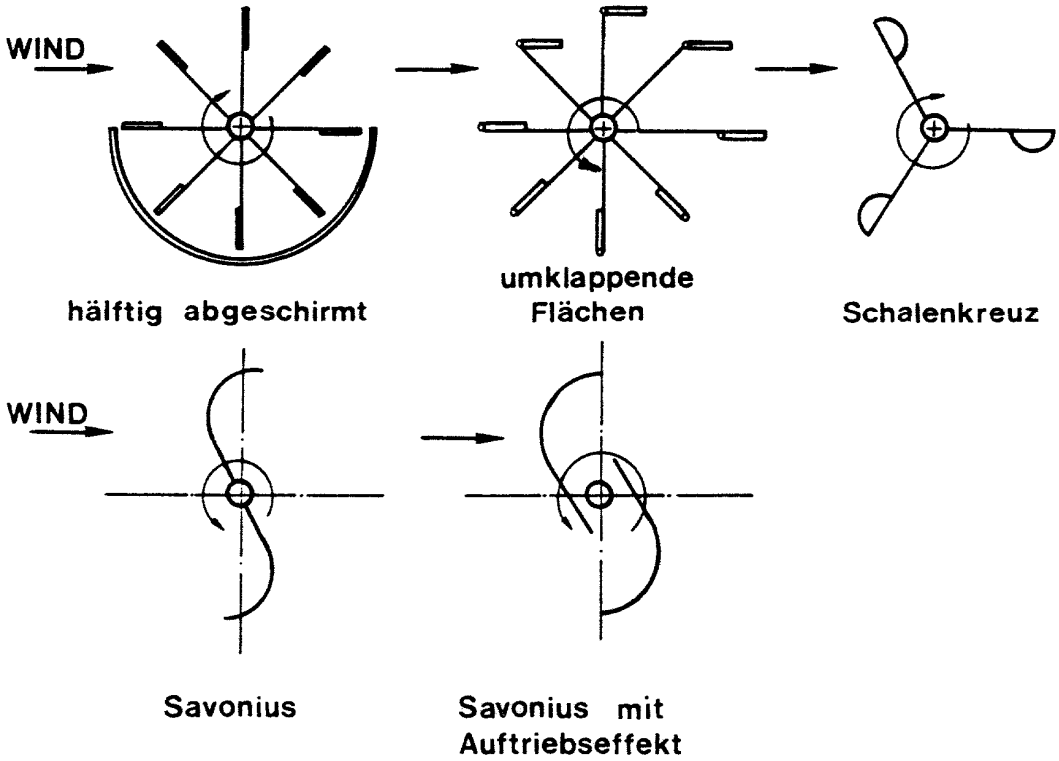


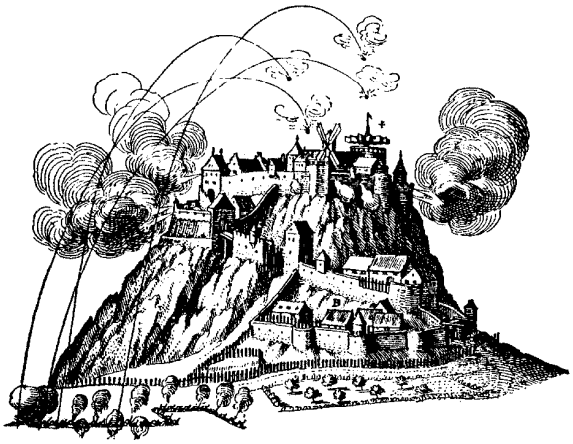
TORNADO TYP



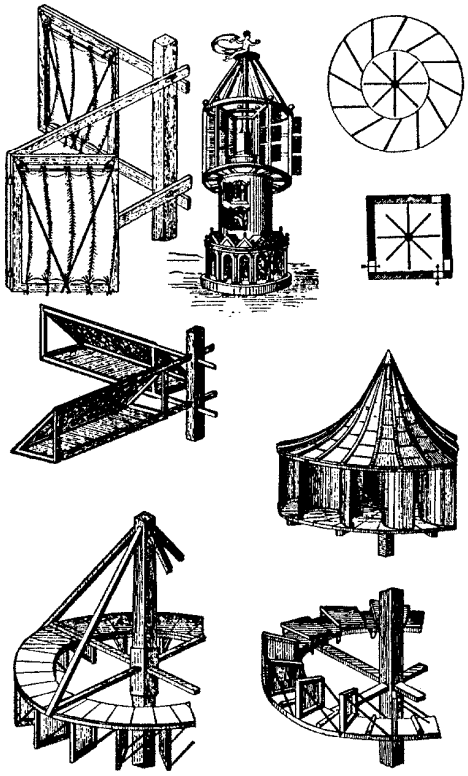
THERMIK – TURM

Horizontale oder vertikale Achse, widerstandnutzend



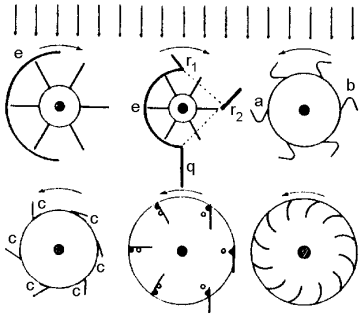


Windturbinen auf dem Hohentwiel 1641

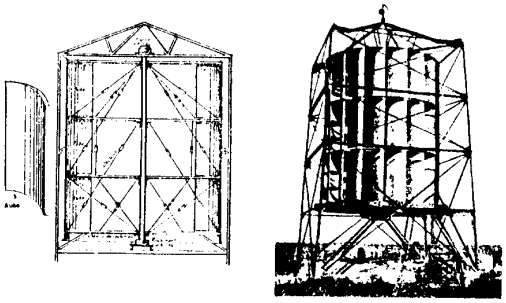


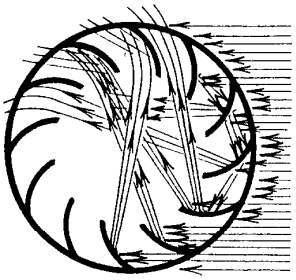
Alte, horizontale Windräder

<u>Historische Windmühlen - Typen</u>

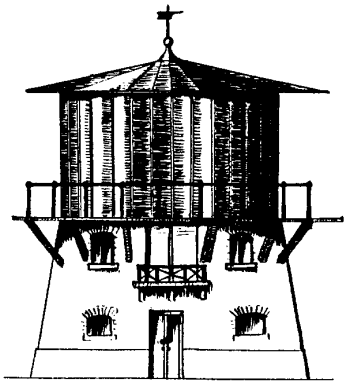


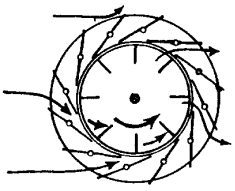
Pananemonen,
Vertikal-Achsen-Anlagen, schematisch



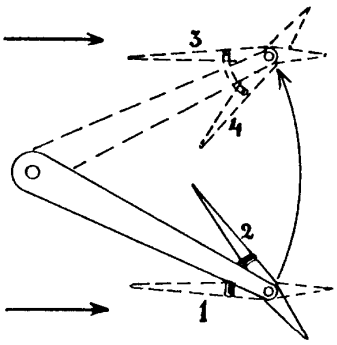


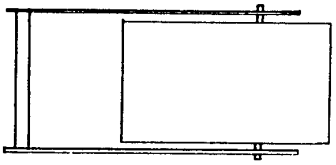
Vertikal-Achsen-Anlage von Lafond, Montpellier, 1930





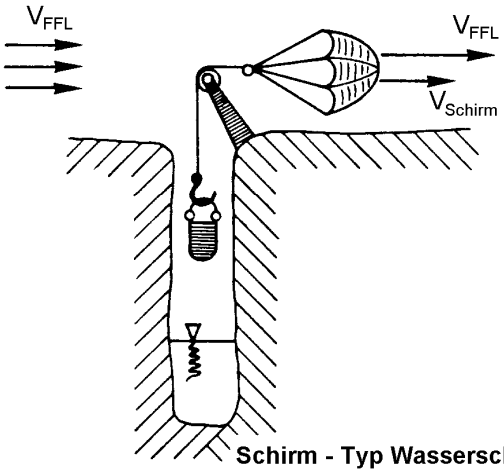
Vertikal-Achsen-Anlage von Wolf





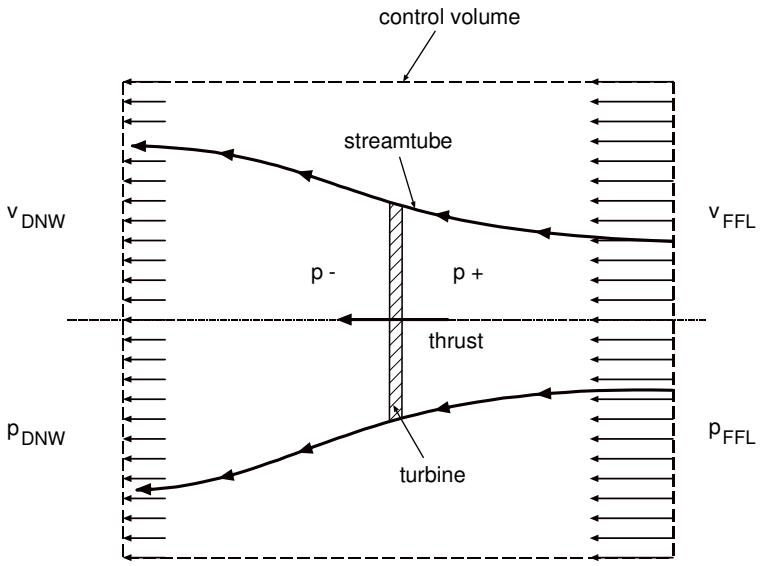
1 Tiefste Stellung der Fläche, die hierauf vom Wind in die begrenzte Stellung
2 umgelegt wird. Auftrieb
3 obere Umkehrgrenze. Der Wind legt die Fläche in die
4 Stellung. Abtrieb

Oszillierende, "schlagende" Windkraftanlage



Schirm - Typ Wasserschöpfwerk

Theorie



1. Annahmen:
   - keine Reibung
   - definierte, begrenzte Stromröhre
   - keine statischen Druckunterschiede
   - Schubbelastung über Querschnitt konstant
   - kein drehende Strömung hinter dem Rotor, ohne Drall

nach Betz ergibt sich: $P_{max} = C_{p,max} \cdot \rho/2 \cdot V_{FFL}^3 \cdot A_{\varnothing}$ (10)

$C_{P,max} = 16/27 \approx 0{,}59259...$ für $\varsigma = V_{DNW} / V_{FFL} = 1/3$ (11)

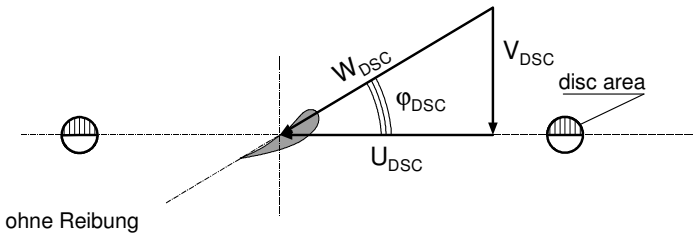
2. Annahmen wie unter 1. und zusätzlich:
   - Strömung hinter dem Rotor mit Drall
   - quasi unendlich viele Rotorblätter (Siebmodell)

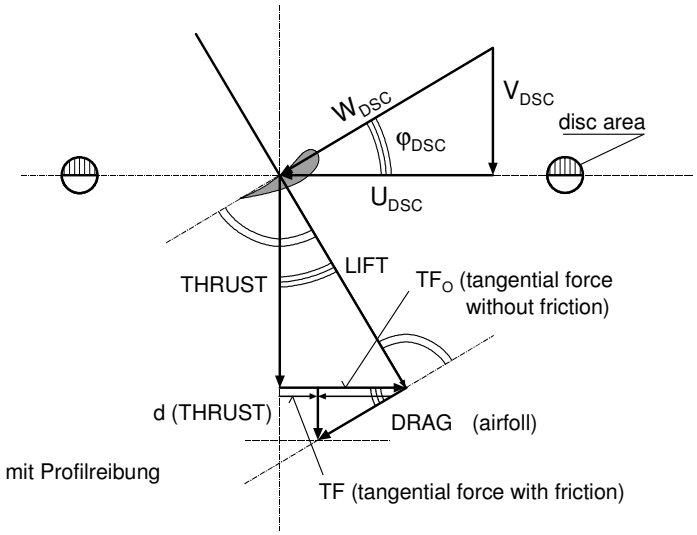
nach Prandtl/Betz: $C_{P,\,ideal} = \frac{\left(1-\varsigma^2\right)}{2} \cdot (1+\varsigma)$ (28)

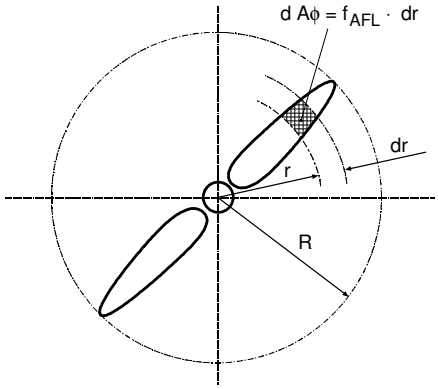
nach Hütter: $C_{P,ideal} = (1+\varsigma)\ \lambda_\omega^2\ [R-1]$ (26), $R = \sqrt{1+\frac{\left(1-\varsigma^2\right)}{\lambda_\omega^2}}$ (22)

3. Annahmen wie unter 1. und 2. Jedoch jetzt mit Reibung und endlicher Rotorblattzahl z :

Strömungsverhältnisse am Rotorblatt – Schnitt







Leistungsbeiwert $C_P \equiv \dfrac{\text{Rotorwellenleistung}}{V_{FFL}^3 \cdot A\phi \cdot \rho/2}$ (58) (59)

Schub/Widerstands-Beiwert $C_{D,RTR} \equiv \dfrac{\text{Rotorschub / Widerstand}}{V_{FFL}^2 \cdot A\phi \cdot \rho/2}$

Drehmomentenbeiwert $C_{TRQ} \equiv C_P / \lambda_{\omega TIP}$

Flächenbelastung $\pi \equiv \dfrac{\text{Installierte Generatorleistung}}{A\phi}$

Leistung $P = M \cdot \omega$

Drehmornent $M = C_{TRQ} \cdot V_{FFL}^2 \cdot \dfrac{\rho}{2} \cdot A_\phi \cdot R_{TIP}$

$\lambda_{\omega TIP} = R_{TIP} \cdot \omega / V_{FFL}$

$\omega = V_{FFL} \cdot \lambda_{\omega TIP} / R_{TIP}$

Auflösung der Rotorfläche in Kreisringe

Indices

AFL	=	airfoil	=	aerodynamisches Profil
D	=	drag	=	Widerstand *W*
DNW	=	downwind	=	weit stromabwärts
DSC	=	disc	=	Rotorebene
FFL	=	free flow	=	ungestörte Strömung
L	=	lift	=	Auftrieb *A*
LDR	=	lift to drag ratio	=	Gleitzahl *E*
P	=	power	=	Leistung *P*
RTR	=	rotor	=	auf den Rotor bezogen
TIP	=	rotortip	=	die Flügelspitze betreffend
TRQ	=	torque	=	Drehmoment *M*
TRS	=	thrust	=	Schub *S*
Z	=	number of blades	=	Blattzahl *Z*
(1)	=	$C_{Lift} = 1$	=	Auftriebsbeiwert $C_a = 1$
Ø	=	rotor area	=	Rotorfläche im Wind $A_Ø$

Festlegung

(1) $$r_i = r_{TIP}\sqrt{i/n}$$

(2) $$r_{si} = r_{TIP}\frac{2}{3\sqrt{n}}\left(i^{3/2} - (i-1)^{3/2}\right);\ 1 \le i \le n$$

(3) $$\lambda_{\omega(r_{si})} = \lambda_{\omega r_{TIP})} \cdot (r_{(si)}/r_{TIP})$$

(4) $$\lambda_{\omega(r_{TIP})} \equiv \lambda_{\omega,RTR},\ r_{TIP} \equiv r_{RTR} \equiv D/2$$

(5) $$\zeta \equiv v_{DNW}/v_{FFL} \quad (11)$$

Abkürzungen

(6) $$E_{(r_{si})} \equiv (C_{L,AFL}/C_{D,AFL})_{(r_{si})} \equiv LDR$$

(7) $$Re^*_{(r_{si})} = r_{(Si)} \cdot v_{FFL}/\nu_{Luft};\quad \nu_{Luft} \approx 15{,}1 \cdot 10^{-6}\ [m^2/s]$$

(8) $$R_{(r_{si})} \equiv \sqrt{1 + [(1 - \zeta^2_{(r_{si})})/\lambda^2_{\omega,(r_{si})}]} \quad (22)$$

(9) $$K_{(r_{si})} \equiv (1 - \zeta^2_{(r_{si})})\,(LDR_{(r_{si})} \cdot \lambda_{DSC(r_{si})} + 1)/\ LDR_{(r_{si})} \cdot \lambda_{DSC(r_{si})} \equiv C_{TRS} \equiv C_{D,RTR} \quad (38)$$

Integrationen

(10) $$C_{P,RTR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} C_{P(r_{si})}$$

(11) $$C_{TRQ,RTR} = C_{P,RTR}/\lambda_{\omega,RTR} \quad (59)$$

(12) $$C_{D,RTR} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} K_{(r_{si})}$$

Formeln

(13) $$C_{P(r_{si})} = \eta_{Z,RTR} \cdot \eta_{LDR(r_{si})} \cdot C_{P(r_{si}),id.} \quad (28)$$

(14) $$\eta_{z,RTR} = (1 - (2 \ln 2 / z \cdot \sqrt{1 + \lambda^2_{DSC\,(r_{si})}}))^2 \quad (41)$$

(15) $$\eta_{LDR(r_{si})} = (1 + \sqrt{1 - K_{(r_{si})}}) \cdot (LDR_{(r_{si})} - \lambda_{DSC(r_{si})}) / LDR_{(r_{si})} (1 + \zeta_{(r_{si})}) \quad (39)$$

(16) $$C_{P(r_{si}),id.} = (R_{(r_{si})} - 1)(1 + \zeta_{(r_{si})}) \cdot \lambda^2_{\omega(r_{si})} \quad (26)$$

(17) $$Re_{(r_{si})} = R\overset{*}{e}_{(r_{si})} \cdot 4\pi (1 - \zeta_{(r_{si})}) / z \cdot \lambda_{DSC(r_{si})} \cdot C_{L,AFL(r_{si})}$$

(18) $$f_{AFL(r_{si})} = 8\pi r_{(si)} (1 - \zeta_{(r_{si})}) / z \cdot C_{L,AFL(r_{si})} \cdot (1 + \zeta_{(r_{si})}) \lambda_{DSC(r_{si})} \sqrt{1 + \lambda^2_{DSC(r_{si})}} \quad (49)$$

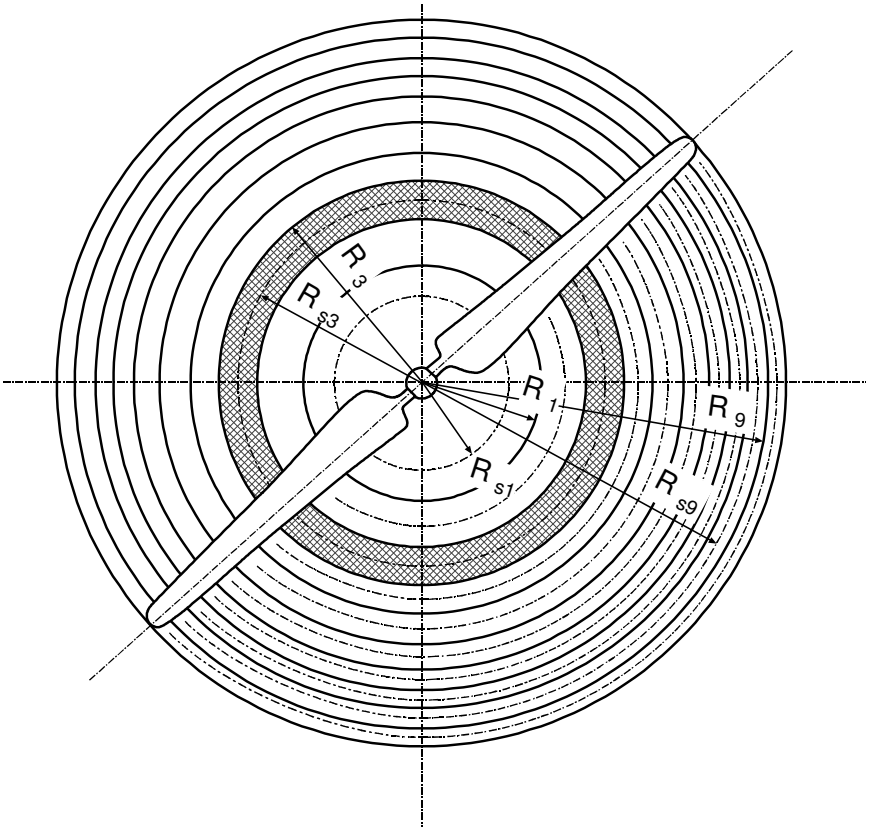
(19) $$\lambda_{DSC(r_{si})} = (1 + R_{(r_{si})}) \lambda_{\omega(r_{si})} / (1 + \zeta_{(r_{si})}) \quad (40)$$

(20) $$\varphi_{DSC(r_{si})} = \arctan 1/\lambda_{DSC(r_{si})} \quad (29)$$

Die Zahlen in Klammern verweisen auf die entsprechenden Formeln in der Herleitung während der Vorlesung

Beispiel GROWIAN:

Rotordurchmesser 100,4 m; Nenndrehzahl 18,5 U/min; Auslegungswindgeschwindigkeit 12,0 m/s; Auslegungsschnelllaufzahl λ_ω = 8,072; Umfangsgeschwindigkeit im Betriebspunkt U_{TIP} = 96,87 m/s; Nennleistung 3 MW.

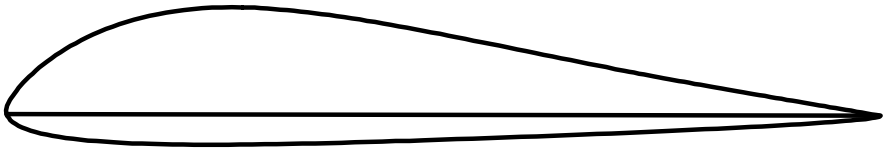


Punkt Nr. i = 10-1	Teilung	Profil	Blatt-Dicke [%]	Blatt-Radius [m] R_{si}	Blatt-Tiefe [mm] f_{AFI}
10	10/10	FX 77-W-153	15,2	48,728	1375
9	9/10	↑	15,5	46,091	1520
8	8/10		16,0	43,293	1680
7	7/10		16,5	40,301	1845
6	6/10		17,0	37,068	2028
5	5/10		17,5	33,524	2230
4	4/10	↓	18,3	29,555	2450
3	3/10	FX 77-W-153	20,5	24,958	2710
2	2/10	FX 77-W-270	23,0	19,273	3025
1	1/10	FX 77-W-400	39,0	10,541	3512

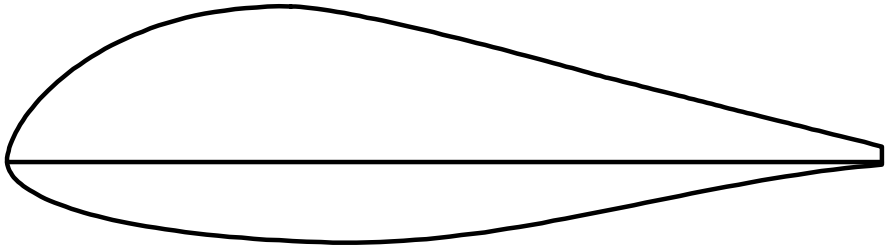
Koordinaten der bei GROWIAN verwendeten aerodynamischen Profile

		FX 77-W-153		FX 77-W-258 (FX 77-W-270 s)		FX 77-W-343 (FX 77-W-400 u. –500)	
Nr.	**x**	**YO**	**YU**	**YO**	**YU**	**YO**	**YU**
2	.99893	.00084	.00097	.00636	-.00503	.02139	-.02084
3	.99572	.00099	.00141	.00737	-.00563	.02244	-.02067
4	.99039	.00143	.00216	.00870	-.00535	.02383	-.02041
5	.99296	.00231	.00325	.01035	-.00512	.02557	-.02022
6	.97347	.00367	-.00464	.01240	-.00506	.02779	-.02025
7	.96194	.00561	-.00627	.01483	-.00521	.03044	-.02054
8	.94844	.00801	-.00793	.01773	-.00572	.03369	-.02130
9	.93301	.01090	-.00962	.02104	-.00656	.03743	-.02245
10	.91573	.01408	-.01115	.02495	-.00794	.04193	-.02429
11	.89668	.01758	-.01263	.02923	-.00969	.04688	-.02657
12	.87592	.02118	-.01397	.03420	-.01217	.05273	-.02979
13	.85355	.02503	-.01536	.03951	-.01508	.05901	-.03353
14	.82967	.02902	-.01662	.04565	-.01881	.06625	-.03828
15	.80438	.03339	-.01797	.05193	-.02296	.07390	-.04356
16	.77779	.03794	-.01914	.05890	-.02803	.08248	-.04996
17	.75000	.04291	-.02044	.06633	-.03360	.09141	-.05697
18	.72114	.04802	-.02152-	.07433	-.04010	.10124	-.06515
19	.69134	.05355	-.02276	.08246	-.04707	.11126	-.07387
20	.66072	.05913	-.02376	.09113	-.05409	.12203	-.08367
21	.62941	.06512	-.02490	.09963	-.06273	.13257	-.09343
22	.59755	.07113	-.02578	.10863	-.07070	.14370	-.10343
23	-56526	.07740	-.02601	.11728	-.07660	.15411	-.11093
24	.53270	.08363	-.02757	.12654	-.00155	.16510	-.11741
25	.50000	.08997	-.02846	.13530	-.08472	.17524	-.12169
26	.46730	.09606	-.02908	.144633	-.08732	.18562	-.12533
27	.43474	.10209	-.02984	.15263	-.00870	.19496	-.12738
28	.40245	.10758	-.03025	.16074	-.O0970	.20408	-.12883
29	.37059	.11280	-.03088	.16730	-.08959	.21126	-.12843
30	.33928	.11696	-.03105	.17185	-.00920	.21617	-.12758
31	.30866	.12040	-.03154	.17340	-.08785	.21750	-.12531
32	.27886	.12105	-.03143	.17316	-.08640	.21677	-.12282
33	.25000	.12037	-.03166	.17039	-.00401	.21303	-.11906
34	.22221	.11791	-.03134	.16616	-.08163	.20757	-.11521
35	.19562	.11449	-.03123	.15975	-.07832	.19952	-.11019
36	.17033	.10954	-.03064	.15241	-.07517-	.19034	-.10527
37	.14645	.10372	-.03021	.14329	-.07104	.17903	-.09919
38	.12408	.09639	-.02929	.13370	-.06724	.16710	-.09344
39	.10332	.08836	-.02849	.12248	-.06239	.15320	-.08650
40	.08427	.07928	-.02713	.11134	-.05803	.13928	-.08013
41	.06699	.07013	-.02590	.09869	-.05261	.12379	-.07250
42	.05156	.06014	-.02414	.06696	-.04787	.10884	-.06587
43	.03806	.05048	-.02255	.07397	-.04193	.09267	-.05777
44	.02653	.04032	-.02016	.06221	-.03699	.07799	-.05081
45	.01704	.03089	-.01817	.04961	-.03070	-06240	-.04218
46	.00961	.02143	-.01482	.03902	-.02524	.04911	.03430
47	.00428	.01365	-.01115	.02722	-.01764	.03419	-.02386
48	.00107	.00591	-.00464	.01752	-.01273	.02141	-.01624

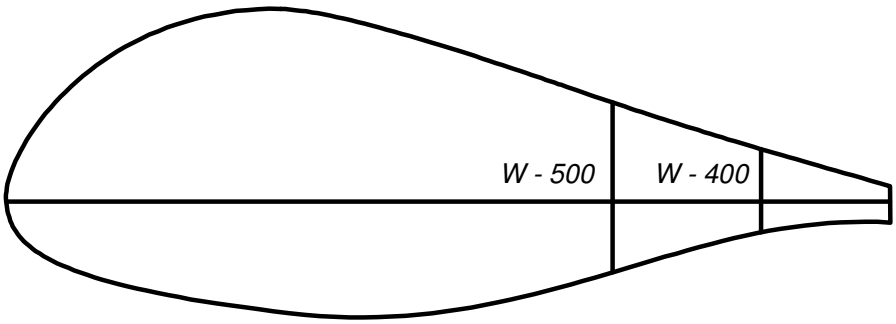
Aufrisse der bei GROWIAN verwendeten aerodynamischen Profile



Form des 15,3% dicken Profils **FX 77 - W - 153**



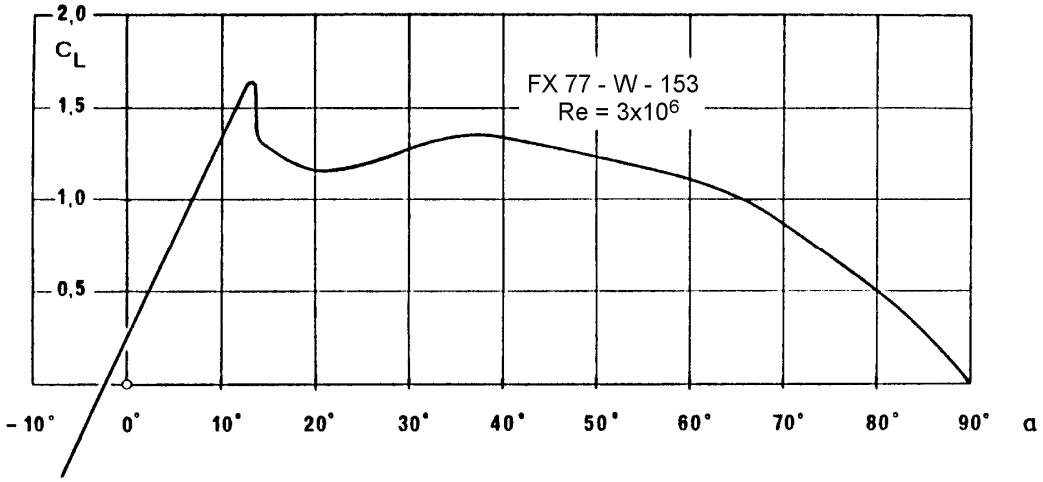
Form des 27% dicken Profils **FX 77 - W - 270 s**
(FX 77 - W - 258)

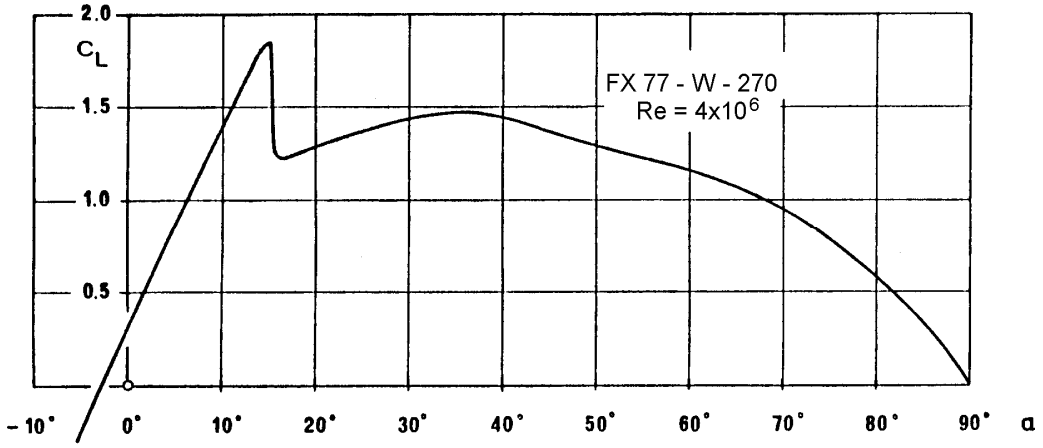


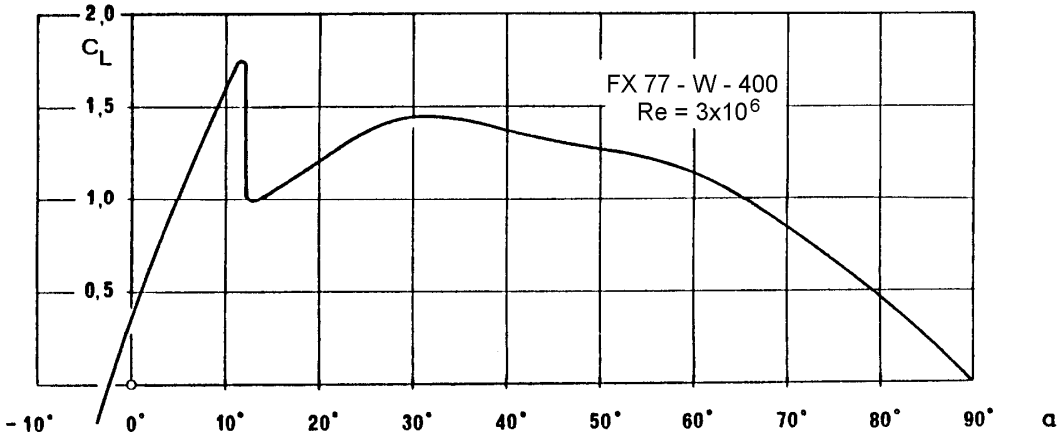
Form des 34,3% dickenProfils sowie der Profile 400 und 500 **FX 77 - W - 343**

Auftriebsbeiwert C_L über dem Anstellwinkel

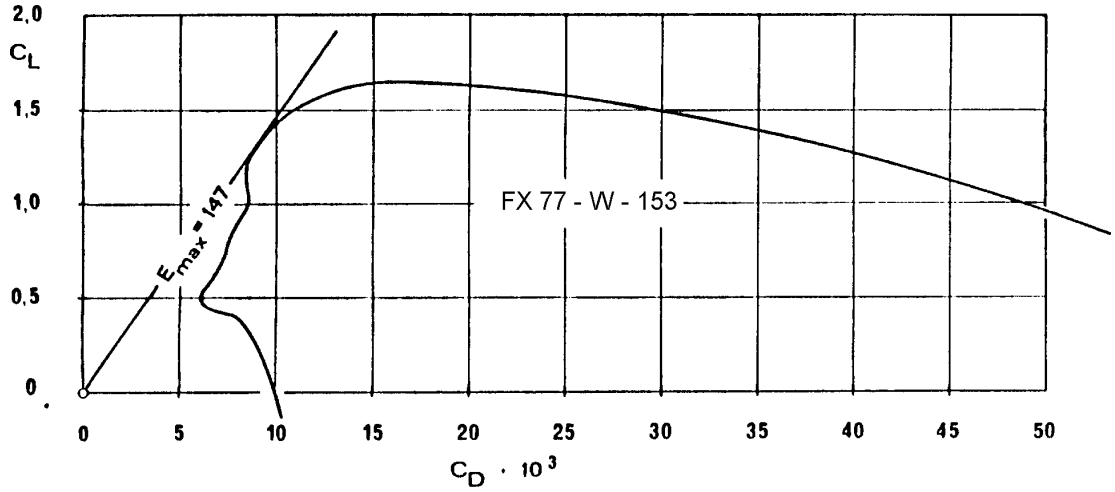
Der Verlauf wurde für Winkel $\alpha > 20°$ sinnvoll ergänzt, entsprechend bekannter Messungen an anderen Profilen

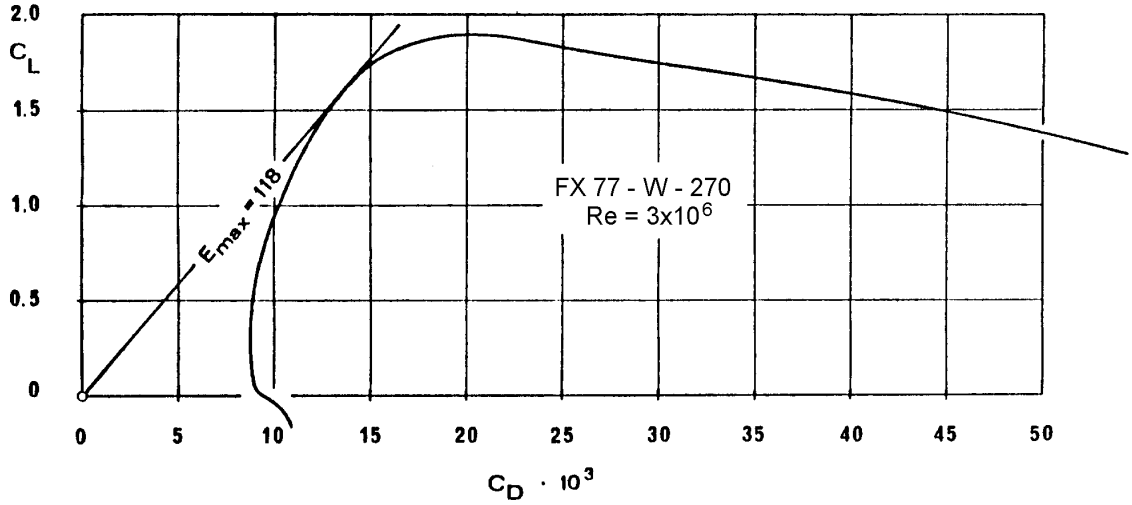


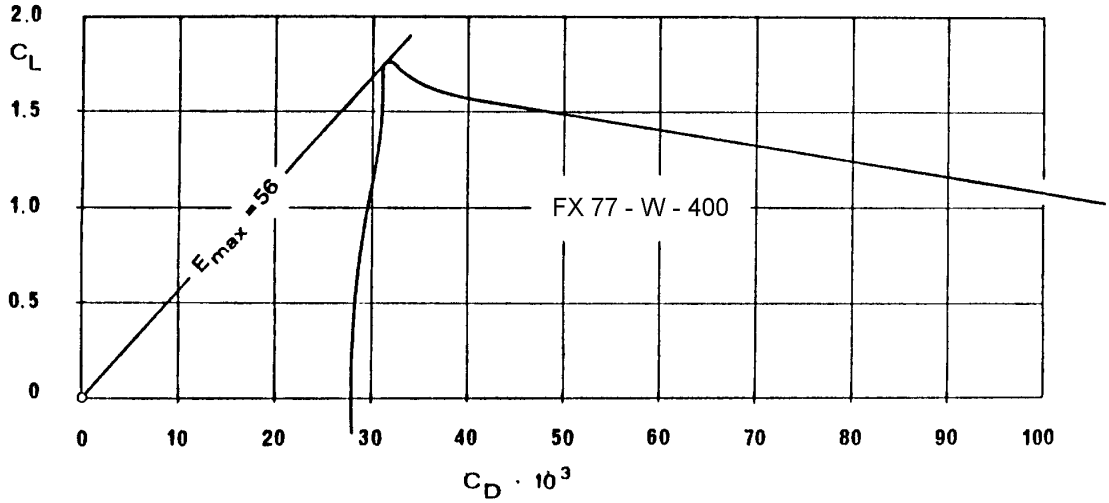




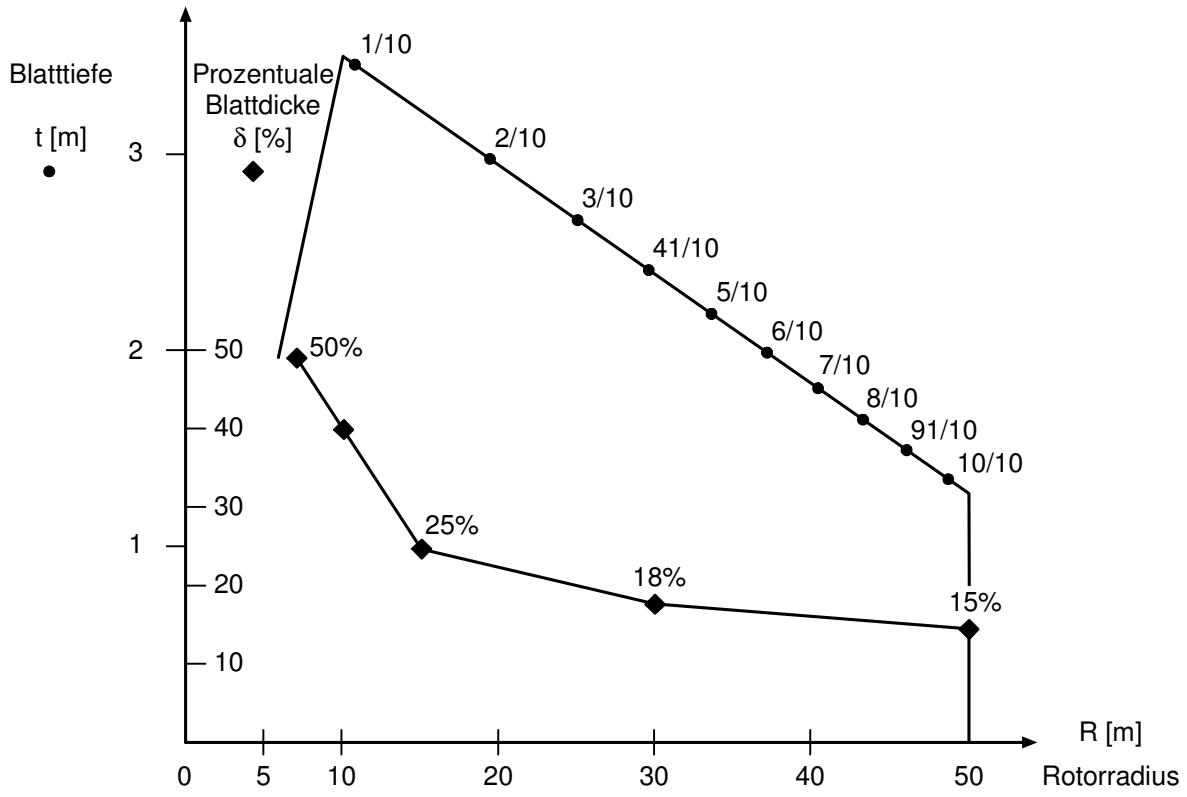
Polaren der bei GROWIAN eingesetzten aerodynamischen Profile



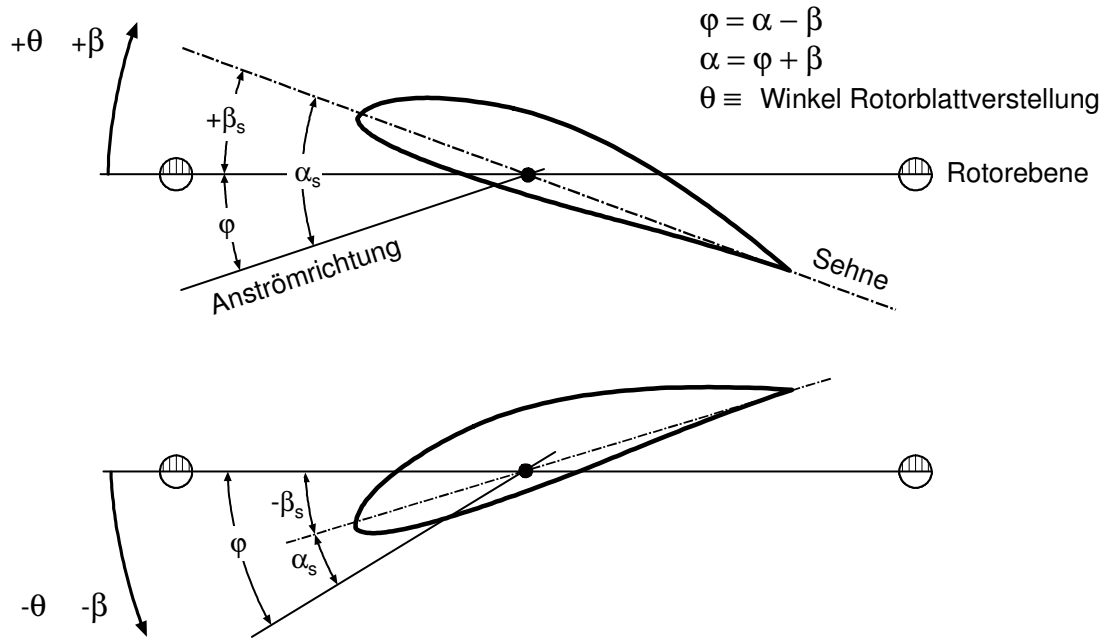




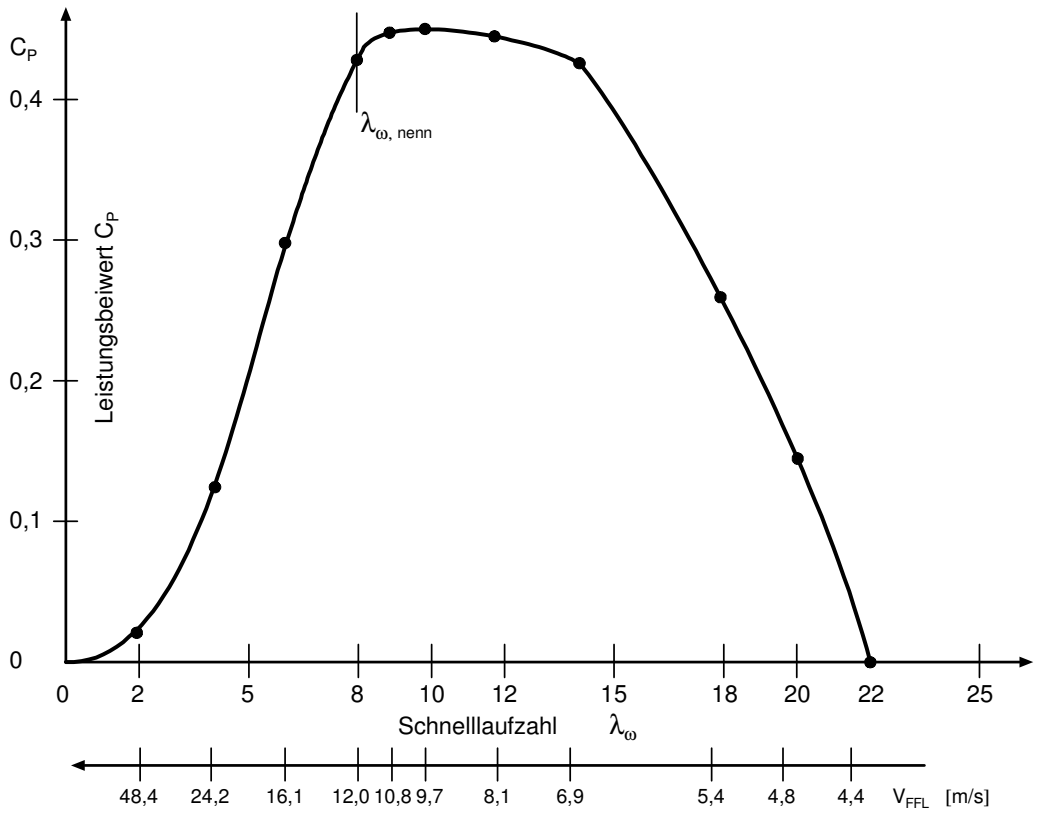
Flügelumriss des GROWIAN – Rotorblattes, *Verlauf von Blattdicke / Blatttiefe*



Winkeldefinitionen am Rotorblatt-Schnitt für Rotorblatt-Verwindung



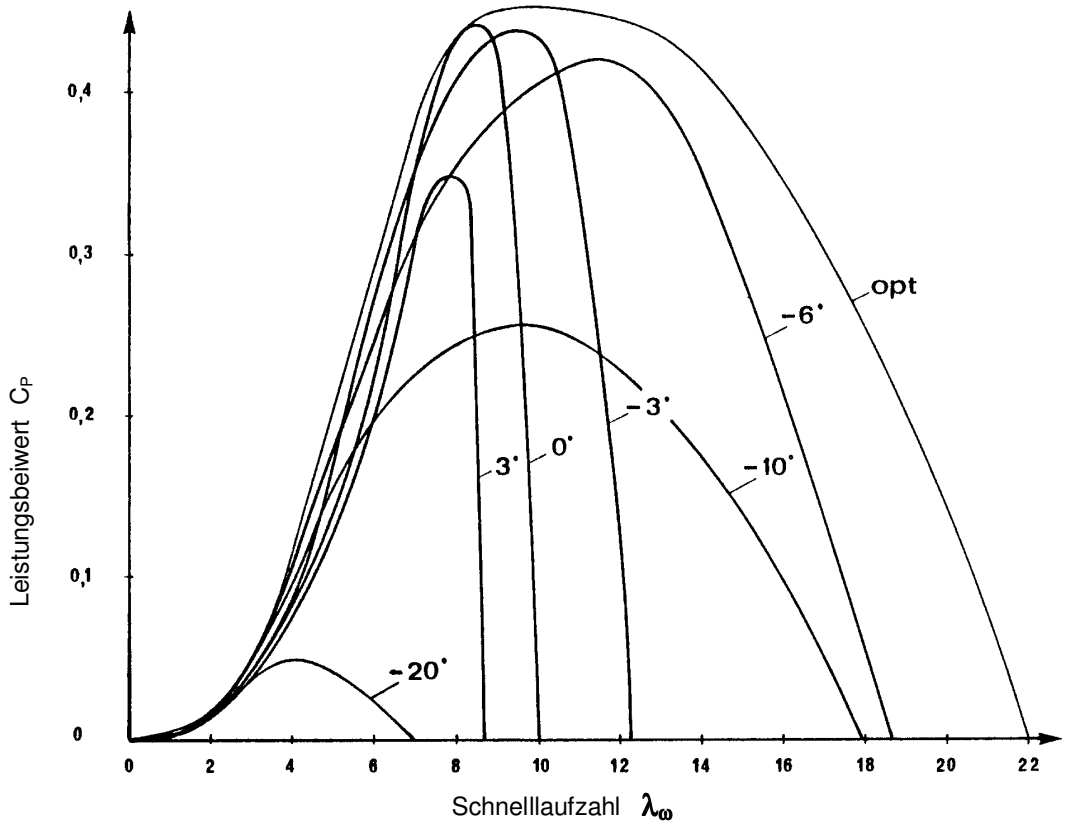
Rechnerergebnisse der optimalen C_P – λ_ω-Kurve



λ_ω	C_P
2	0,018
4	0,123
6	0,229
8,072	0,439
9	0,450
10	0,452
12	0,444
14	0,425
18	0,254
20	0,142
22	-0,004

C_P – λ_ω-Kurven für verschiedene Blattverstellwinkel θ

Punkt Nr. i = 10 - 1	Teilung	Profilsehnen – Einstellwinkel β_{si} für 5 verschiedene Blattstelllungen θ					
		- 20°	- 10°	- 6°	- 3°	- 0°	+ 3°
10	10/10	- 12,37°	- 2,37°	1,63°	4,63°	7,63°	10,63°
9	9/10	- 13,04°	- 3,04°	0,96°	3,96°	6,96°	9,96°
8	8/10	- 13,77°	- 3,77°	0,23°	3,23°	6,23°	9,23°
7	7/10	- 14,51°	- 4,51°	- 0,51°	2,49°	5,49°	8,49°
6	6/10	- 15,19°	- 5,19°	- 1,19°	1,81°	4,81°	7,81°
5	5/10	- 15,67°	- 5,67°	- 1,67°	1,33°	4,33°	7,33°
4	4/10	- 16,05°	- 6,05°	- 2,05°	0,95°	3,95°	6,95°
3	3/10	- 16,43°	- 6,43°	- 2,43°	0,57°	3,57°	6,57°
2	2/10	- 17,69°	- 7,69°	- 3,69°	- 0,69°	2,31°	5,31°
1	1/10	- 32,97°	- 22,97°	-18,97°	-15,97°	-12,97°	- 9,97°



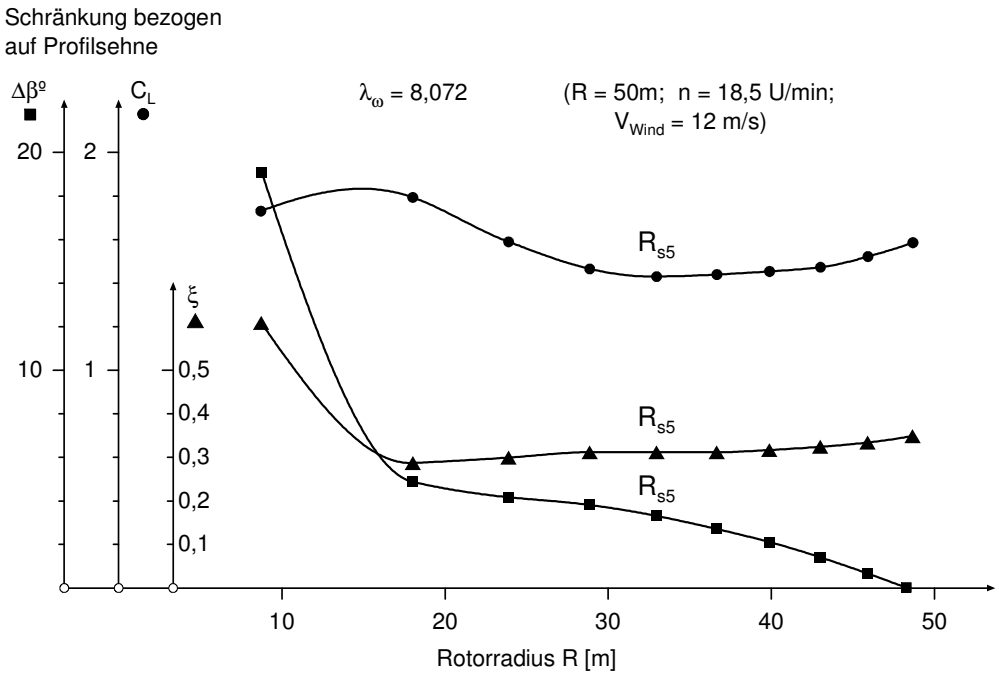
Ergebnisse für GROWIAN

Auslegungsschnelllaufzahl λ_ω = 8,072; Rotordurchmesser D = 100,4 m;
Nenndrehzahl n = 18,5 U/min; Windgeschwindigkeit V = 12,0 m/s

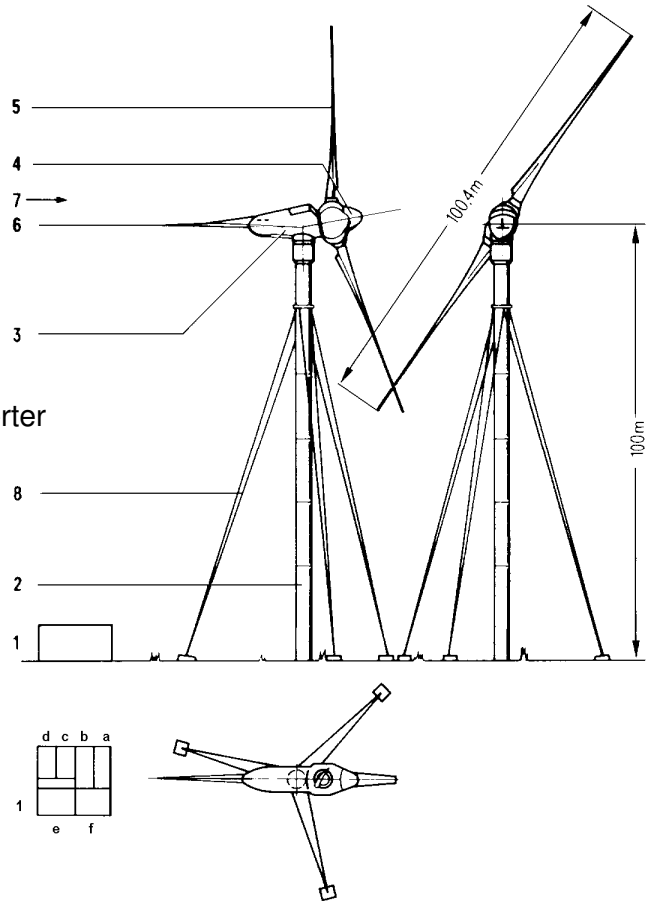
Teilung	R_{si} m	R_{si} %	$\lambda_{\omega i}$	ξ	λ_{DSCi}	η_{zi}	λ_{DSCi}	c_{Li}	E_i	η_{Ei}	c_{pi}	α_{si} °	β_{si} °	$\Delta\beta_{si}$ °
10/10	48,728	97,5	7,867	0,36	4,92	0,885	11,61	1,55	134	0,913	0,476	12,55	+7,63	0
9/10	46,091	92,2	7,441	0,34	5,12	0,880	11,15	1,50	139	0,920	0,478	12,08	+6,96	0,67
8/10	43,293	86,6	6,989	0,33	5,41	0,874	10,56	1,46	142	0,925	0,477	11,64	+6,23	1,40
7/10	40,301	80,6	6,506	0,33	5,81	0,865	9,03	1,42	143	0,931	0,474	11,30	+5,49	2,14
6/10	37,068	74,1	5,984	0,33	6,30	0,854	9,05	1,40	144	0,936	0,471	11,11	+4 81	2,82
5/10	33,524	67,1	5,412	0,32	6,90	0,840	8,26	1,42	143	0,942	0,465	11,23	+4,33	3,30
4/10	29,555	59,1	4,771	0,31	7,74	0,822	7,36	1,46	141	0,947	0,456	11,69	+3,95	3,68
3/10	24,958	49,9	4,029	0,30	9,04	0,794	6,28	1,56	133	0,951	0,441	12,61	+3,57	4,06
2/10	19,273	38,6	3,111	0,29	11,45	0,744	4,93	1,77	113	0,954	0,409	13,76	+2,31	5,32
1/10	10,541	21,1	1,702	0,60	24,07	0,515	2,24	1,72	54	0,956	0,239	11,10	-12,972	0,60

$\overline{C}_P = 0{,}439$

Verlauf von notwendigem Auftriebsbeiwert $\mathbf{C_L}$ und Abminderungsfactor ς
Sowie der Blattverwindung (-schränkung) β über dem Radius des
GROWIAN Rotorblattes

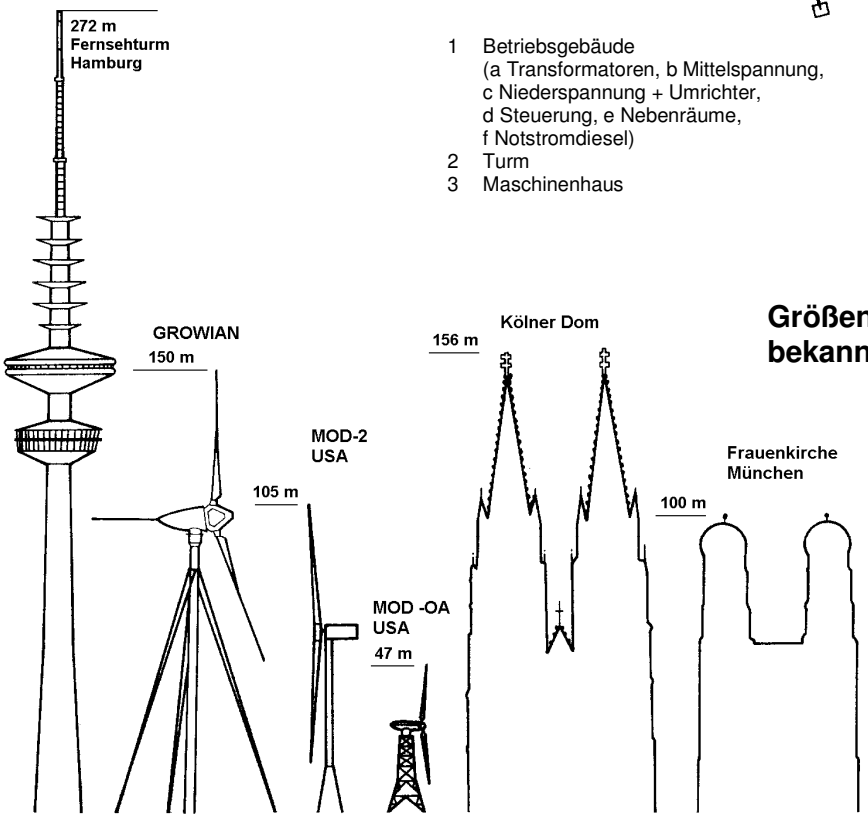


Der einst größte Windenergiekonverter der Welt: **GROWIAN**



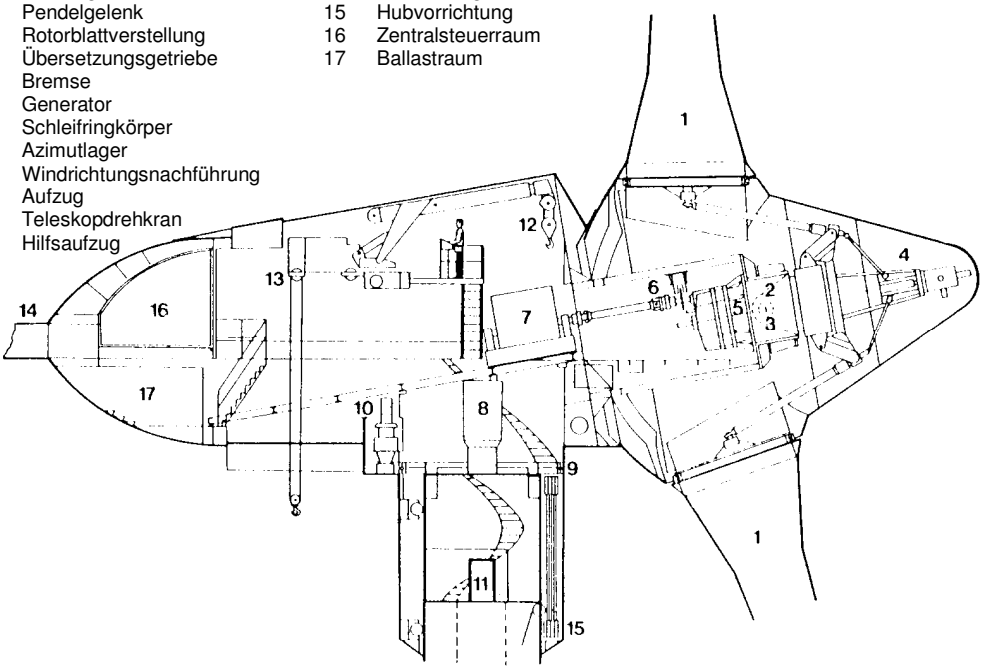
1 Betriebsgebäude
(a Transformatoren, b Mittelspannung,
c Niederspannung + Umrichter,
d Steuerung, e Nebenräume,
f Notstromdiesel)
2 Turm
3 Maschinenhaus
4 Nabe
5 Flügel
6 Windmeßsporn
7 Windrichtung
8 Abspannseile

Größenvergleich mit bekannten Bauwerken

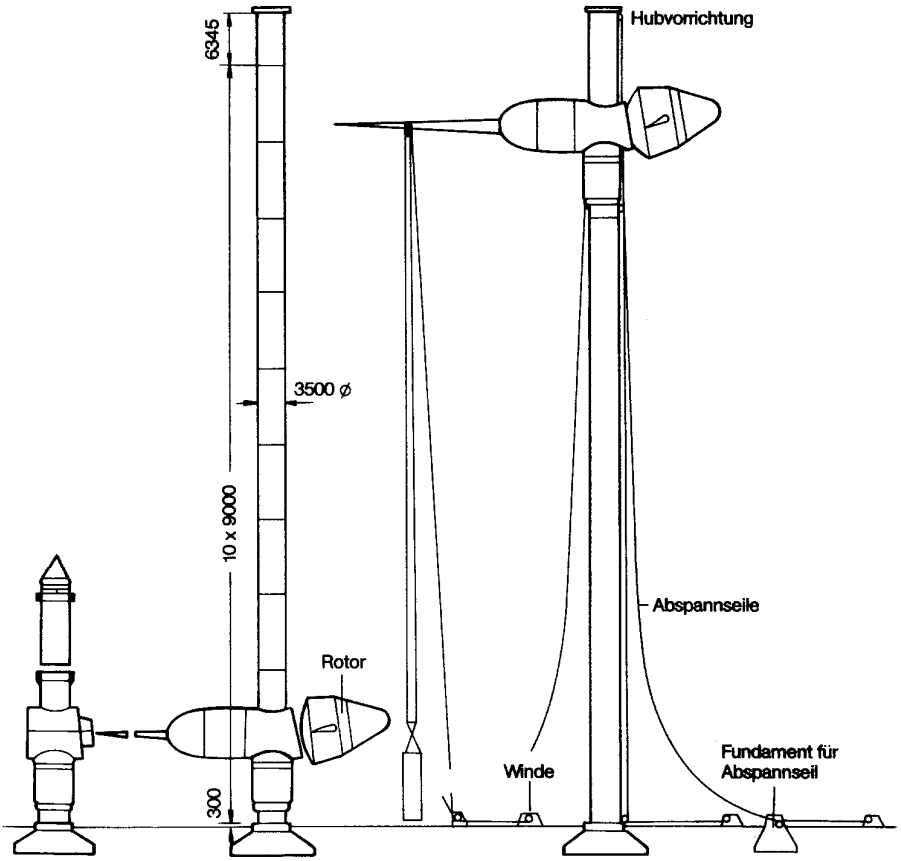


Untersysteme im Turmkopf

1 Rotorblatt
2 Rotorlager
3 Pendelgelenk
4 Rotorblattverstellung
5 Übersetzungsgetriebe
6 Bremse
7 Generator
8 Schleifringkörper
9 Azimutlager
10 Windrichtungsnachführung
11 Aufzug
12 Teleskopdrehkran
13 Hilfsaufzug
14 Ausleger für Windmeßgeräte und Montageballast
15 Hubvorrichtung
16 Zentralsteuerraum
17 Ballastraum



Montage des Maschinenhauses (Turmdurchdringung)

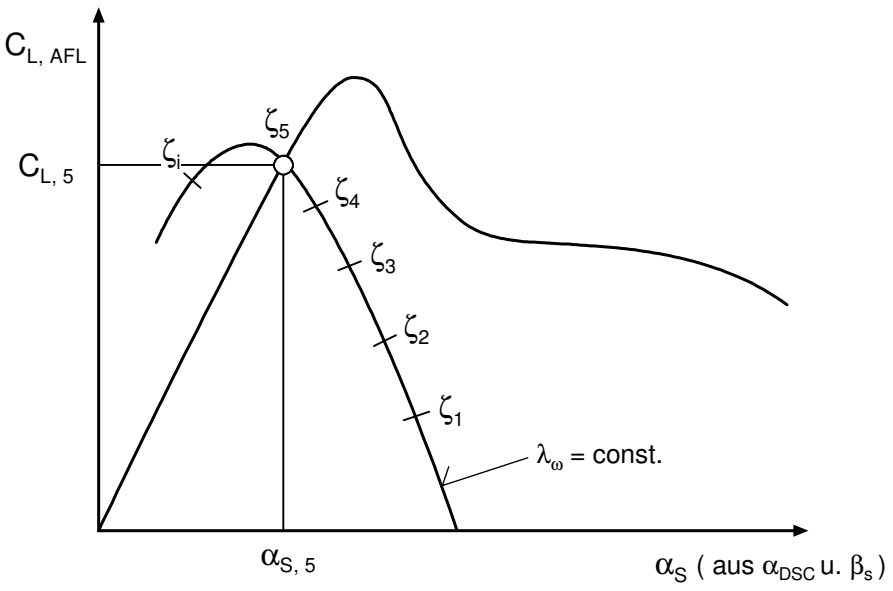


Vorgehensweise bei der Auslegung von Windenergie-Konvertern
(Beispiele in Klammern sind die GROWIAN-Werte)

1. Festlegung einer Rotorflächenbelastung π (Watt/m^2)
   - windschwache Gebiete 30 - 60 (Watt/m^2)
   - windstarke Gebiete 100 - 300 (Watt/m^2)

   Dies sind Erfahrungswerte; bei höheren Türmen die obere Grenzzahl wählen (379 Watt/m^2).
2. Aus der absoluten, gewünschten Leistung (3MW) ergibt sich ein notwendiger Durchmesser D (100,4 m).
3. Festlegung einer Nennwindgeschwindigkeit (12 m/s) bei der Nennleistung erzielt werden soll. Häufigste oder mittlere Windgeschwindigkeit wählen. Turmhöhe beachten sowie Geländefaktor a, Umdruck S4.
4. Festlegung der Rotorblattzahl z (z = 2).
   Für mechanische Energiewandlung: Vielblattrotor, Langsamläufer mit hohem Anlaufmoment, $\lambda_\omega \leq 3$
   Für elektrische Energiewandlung : 2 bis 3 – Blatt - Rotor, Schnellläufer, Anlaufprobleme, Blattverstellung notwendig zur Leistungsregelung und Sturmsicherung, $\lambda_\omega > 4$
5. Festlegung einer Nenndrehzahl (18,5 U/min). Einfluß auf Getriebegröße über die Wahl des Generators (1 500 U/min) beachten. (Falls eine Getriebeanlage gewählt wird)
6. Auswahl von geeigneten Profilen vornehmen. Bei Schnelläufern hohe Gleitzahlen anstreben. Bauweise beachten. Doppelseitig verwölbteProfile mit einwärts gewölbter Unterseite nicht für Metall- oder Holzbauweise geeignet. Eventuell gerade Unterkanten.
7. Mit Formeln 18, 8 und 19 erste Aussage über Blatttiefenverlauf entlang dem Radius machen. Dabei C_L sinnvoll einsetzen (1,4), ζ = 1/3 wählen und z aus Punkt 4 übernehmen.
8. Festlegung der endgültigen Blattumrissform. Kompromiß aus Statik, Dynamik, Aerodynamik und Bauweise. Kosten beachten.
9. Berechnung der C_P - λ_ω -Optimalkurve mit allen 20 Gleichungen (außer Gleichungen 4, 7, 11, 12, 17 aber mit 18 als Kontrollgleichung). Dabei Variation von ζ und damit des Geschwindigkeitsdreieckes für jede gewählte Radiusposition. Ermittlung von $\zeta_{opt.}$ mit Hilfe der aerodynamischen Kennwerte C_L, α, E bzw. LDR. Jeder λ_ω -Wert ergibt einen aufsummierten $C_{P,opt.}$-Wert und eine dazugehörende, optimale Rotorblattverwindung.
10. Für den Auslegungspunkt (GROWIAN λ_ω= 8,072) wird nun die Blattverwindung als eingefroren betrachtet. Der Auslegungspunkt ist auf der Optimalkurve frei wählbar und kann in die Iteration mit einbezogen werden. Meist wird der Auslegungspunkt etwas links vom Maximum der Optimalkurve positioniert. Mit der festgehaltenen, eingefrorenen Blattverwindung oder -schränkung wird das Rotorblatt gebaut. Die Betriebsstellung dieses Blattes im Nennpunkt wird als θ = 0° - Stellung bezeichnet. Ausgehend davon wird die Blattverstellung (positiv oder negativ) gerechnet.

11. Berechnung der realen $C_P - \lambda_\omega$ Kurve für $\theta = 0°$. Die Kurve zeigt über den gesamten Windgeschwindigkeitsbereich die Anlagenleistung bei festgehaltenem, quasi starren Rotor. Diese reale $C_P - \lambda_\omega$ -Kurve berührt die Optimalkurve natürlich im Betriebspunkt ($\lambda_{\omega,nenn}$).
    Beim dazu notwendigen Iterationsverfahren wählt man beliebige λ_ω-Werte. Dabei bedeutet bei n = const. ein $\lambda_\omega > \lambda_{\omega,nenn}$ eine kleinere Windgeschwindigkeit und ein Wert $\lambda_\omega < \lambda_{\omega,nenn}$ eine größere Windgeschwindigkeit. Man untersucht für jeden Profilschnitt die Lage im Strömungsfeld (Winkel β_s) und sucht den ζ -Wert der den aerodynamischen Profileigenschaften entspricht und zwar über den Winkel φ_{DSC}. Nur für ein passendes ζ gibt es ein passendes Wertepaar C_L / α_s. (Siehe Diagramm).
    Dabei ergibt sich ein $\zeta > \zeta = 1/3$ für $\lambda_\omega < \lambda_{\omega,nenn}$ und $\zeta < \zeta = 1/3$ für $\lambda_\omega > \lambda_{\omega,nenn}$.
    Bei plötzlich auftretenden, großen λ_ω -Werten (bei n = const., also für kleine Windgeschwindigkeiten) wird die Strömung dabei im Innenbereich des Rotorblattes früher als im Außenbereich Nullauftrieb liefern, d.h. keinen Beitrag zur Leistung bringen.
    Bei plötzlich auftretenden, kleinen λ_ω -Werten (bei n = const., also für große Windgeschwindigkeiten), wird die Strömung früher im Innenbereich als im Außenbereich abreissen, d.h. die inneren Stützstellen liefern zuerst keinen Leistungsbeitrag. In beiden Fällen ist eine schnell reagierende Rotorblattverstellung von großem Vorteil.
12. Die Berechnung des gesamten C_P - λ_ω -Kennfeldes bei Rotorblatteinstellwinkel $\theta \neq 0°$ erfolgt wie unter Punkt 11 beschrieben. Der örtlicheWinkel β_s erhöht sich je nach Größe des Blattverstellwinkels um den entsprechenden θ -Wert (an allen Schnittstellen). Man variiert dabei wiederum den Abminderungsfaktor ζ solange bis das C_L / α_S –Wertepaar gefunden ist, das der Profilcharakteristik entspricht,



Darstellung des Iterationsverfahren zur Bestimmung des Kennfeldes bei Rotorblattverstellung (Siehe Punkt 11 und 12)

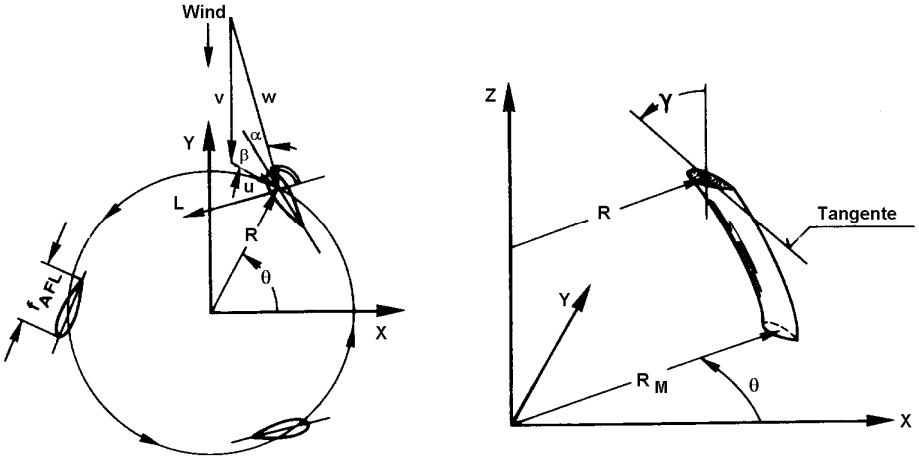
3/99 Leistungsstatistik aus der Betreiberdatenbasis *WIND KRAFT JOURNAL*

KW	Rotor ø	Rotor m2	Nabe m	m/s in 10 m	m/s in 30 m	Hersteller	Anzahl WKA	PLZ	Ort	Seit	kWh 1998	kWh 1999	kWh/m2 1999	kWh 1/99	kwh/m2 1/99	kWh 2/99	kWh/m2 2/99	kWh 3/99	kWh/m2 3/99	kWh 4/99	kWh/m2 4/99
500	40,3	1276	65,0	.	.	Enercon		59510 A	Lippberg	4/97	772000	259927	204	86733	67	82586	64	47388	37	43220	33
500	40,3	1276	65,0	.	4,5	Enercon		59514 D	Welver-Flerke	10/98	213900	310952	244	112337	88	103363	81	49656	38	45596	35
500	40,3	1276	50,0	.	.	Enercon		59581 F	Waldhausen	12/96	1070800	392682	308	128229	100	125933	98	78534	61	59986	47
500	40,3	1276	50,0	.	4,7	Enercon		59581 G	Suttrop	7/97	791400	305678	240	120479	94	84159	65	59479	46	41561	32
500	40,3	1276	50,0	4,6	5,4	Enercon		59602 H	Spitze Warte	10/96	1141000	405980	318	145076	113	122339	95	76331	59	62234	48
500	40,3	1276	51,0	.	5,9	Enercon		59602 I	Spitze Warte	11/96	1143500	426930	335	157690	123	112860	88	95390	74	60990	47
500	40,3	1276	50,0	.	.	Enercon		59602 J	Spitze Warte	11/96	1141600	446922	350	163573	128	142874	112	75008	58	65467	51
500	40,3	1276	65,0	.	.	Enercon		59602 K	Spitze Warte	11/96	1175200	440580	345	158210	124	122310	95	95610	74	64450	50
500	40,3	1276	65,0	.	5,0	Enercon		59609 L	Anröchte-Effeln	11/96	1097400	382613	300	138396	108	125646	98	60483	47	58088	45
500	40,3	1276	65,0	.	5,1	Enercon		59757 D	Arnsberg-Müschede	10/96	784300	289652	227	113648	89	84720	66	54346	42	36938	28
500	40,3	1276	65,0	.	.	Enercon		63633 A01	Birstein	11/97	343000	321117	252	102267	80	93609	73	69994	54	55247	43
500	40,3	1276	65,0	.	.	Enercon		63633 A02	Birstein	11/97	375200	351969	276	112821	88	103351	81	73731	57	62066	48
500	40,3	1276	65,0	.	.	Enercon		74523 A01	Schwäbisch-Hall	7/96	538500	211199	166	57765	45	83507	65	33846	26	36081	28
500	40,3	1276	65,0	.	.	Enercon		74523 A02	Schwäbisch-Hall	8/96	603200	241378	189	70404	55	87798	68	44184	34	38992	30
500	40,3	1276	65,0	.	4,7	Enercon		84140 A	Gangkofen	10/97	596500	242434	190	60906	47	95006	74	53036	41	33486	26
500	40,3	1276	65,0	.	4,6	Enercon		84140 B01	Gangkofen	11/98	55400	220525	173	52150	40	91623	71	47514	37	29238	22
500	40,3	1276	65,0	.	4,6	Enercon		84140 B02	Gangkofen	11/98	54900	222155	174	51464	40	94506	74	47269	37	28916	22
500	40,3	1276	50,0	4,3	4,7	Enercon		93339 A01	Riedenburg	1/95	553200	227603	178	59054	46	85644	67	44715	35	38190	29
500	40,3	1276	65,0	.	.	Enercon		93339 A02	Riedenburg	11/97	595500	245258	192	64357	50	90201	70	47690	37	43010	33
500	40,3	1276	65,0	.	4,8	Enercon		99189 A	Ringleben	9/97	910700	325059	255	96188	75	117352	92	58819	46	52700	41
500	40,3	1276	50,0	.	.	Enercon		99510 A	Stobra	1/95	972700	354118	278	125300	98	112840	88	59780	46	56198	44
500	37,5	1104	40,0	.	.	Jacobs		25715 A01	Süderbehmhusen	5/94	1012100	341387	309	98770	89	104219	94	69185	62	69213	62
500	41,0	1320	50,0	.	.	Jacobs		25715 A02	Süderbehmhusen	7/96	1263100	388211	294	123240	93	110177	83	67622	51	87172	66
500	37,5	1104	40,0	.	.	Jacobs	5	25899 V	Klixbüll/Wraagaard	10/95	5351000	1740611	315	613077	111	480462	87	335140	60	311932	56
500	43,0	1452	48,0	5,1	6,3	Micon		25709 AG	Kronprinzenkoog/P	8/96	1379100	461853	318	137510	94	126540	87	93283	64	104520	71
500	43,2	1466	47,0	.	.	Micon		33142 G01	Büren	12/95	1075400	373744	255	121000	82	122830	83	75640	51	54274	37
500	43,2	1466	47,0	.	.	Micon		33142 G02	Büren	10/96	1115800	380715	260	120562	82	125000	85	78609	53	56544	38
500	43,2	1466	46,0	.	.	Micon	5	35327 A	Ulrichstein	5/95	4738500	2132292	291	734234	100	582395	79	431096	58	384567	52
500	43,2	1466	46,0	.	.	Micon	6	35327 B	Ulrichst.-Helpers.	6/96	5150400	2410338	274	843363	95	725050	82	476337	54	365587	41
500	43,2	1466	46,0	.	.	Micon		59519 D03	Möhnesee	8/95	951100	349770	239	134790	91	84260	57	83580	57	47140	32
500	43,2	1466	47,0	.	5,2	Micon		59519 F01	Möhnesee/Thein.	8/95	996600	367590	251	142390	97	87860	59	86390	58	50950	34
500	43,2	1466	46,0	.	5,7	Micon		59602 F	Rüthen-Menzel	7/95	1060500	283270	193	-0	0	115550	78	101010	68	66710	45
500	43,2	1466	51,0	3,8	4,9	Micon		59602 G	Rüthen	11/95	1252200	426202	291	142880	97	135268	92	84380	57	63674	43
500	43,2	1466	46,0	.	.	Micon		59602 L02	Rüthen-Kellinghsn.	11/96	753600	404850	276	137670	93	110660	75	96480	65	60040	40
500	43,2	1466	47,0	.	.	Micon		59602 L03	Spitze Warte	12/96	921500	270940	185	-0	0	115260	78	96450	65	59230	40
500	43,2	1466	46,0	.	.	Micon		59602 L04	Spitze Warte	11/96	1123200	409570	279	143230	97	105660	72	98840	67	61840	42
500	43,0	1452	46,0	.	.	NEG Micon		24994 D04	Weesbydamm1	9/98	275800	405721	279	129700	89	86625	59	81647	56	107749	74
500	43,8	1507	50,0	4,3	.	NedWind		33039 A	Nieheim-Holzhausen	10/95	683800	241820	160	90670	60	76664	50	46900	31	27586	18
500	43,8	1507	65,0	.	.	NedWind	5	50151 A	Kerpen	12/96	3172000	854536	113	0	0	355735	47	259441	34	239360	31
500	41,0	1320	53,0	.	.	Nordtank		24855 B02	Bollingstedt	3/95	1055700	377721	286	113375	85	98527	74	71431	54	94388	71
500	41,0	1320	52,0	4,1	.	Nordtank		24855 B03	Bollingstedt	11/95	1038200	367320	278	110485	83	96939	73	68342	51	91554	69
500	41,0	1320	52,0	4,1	.	Nordtank		24855 B04	Bollingstedt	11/95	1064900	377739	286	113452	85	99295	75	70684	53	94308	71
500	41,0	1320	51,0	.	.	Nordtank		24881 B	Nübel	12/94	1123200	391213	296	120634	91	104992	79	72203	54	93384	70
500	41,0	1320	50,0	.	.	Nordtank		24885 A01	Süderschmedeby1	2/95	1354000	477270	361	146380	110	116300	88	93010	70	121580	92
500	41,0	1320	50,0	.	.	Nordtank		24885 A02	Süderschmedeby2	2/95	1336500	472590	358	146260	110	114250	86	91530	69	120550	91
500	41,0	1320	52,0	.	.	Nordtank		24887 C02	Espertoftfeld	6/95	1070900	378106	286	116914	88	98960	74	70352	53	91880	69
500	41,0	1320	51,5	4,3	.	Nordtank		24891 B01	Struxdorf	12/94	1225800	431450	327	133210	100	114940	87	81550	61	101750	77
500	41,0	1320	51,5	4,3	.	Nordtank		24891 B02	Struxdorf	12/94	1202500	400120	303	123190	93	103700	78	74520	56	98710	74
500	41,0	1320	50,0	4,8	.	Nordtank		25541 N	Brunsbüttel	7/95	1293300	436354	331	122523	92	127781	96	89620	67	96430	73
500	37,0	1075	36,5	4,9	.	Nordtank		25693 C01	Volsemenhusen	9/93	943400	336610	313	90962	84	106923	99	61265	56	77460	72
500	37,0	1075	35,0	.	.	Nordtank		25704 D	Hemmingstedt	12/93	1073000	354660	330	100740	93	107640	100	66240	61	80040	74
500	37,0	1075	50,0	.	.	Nordtank		25704 L	Barsfleth	10/94	1244100	435735	405	131445	122	124200	115	82800	77	97290	90
500	37,0	1075	35,0	6,2	.	Nordtank		25704 Q	Harmswöhrden	12/94	1057300	374191	348	111330	103	108104	100	71090	66	83667	77
500	41,0	1320	50,0	4,9	.	Nordtank		25704 S	Imfelde	5/95	1505400	496872	376	149264	113	133523	101	99186	75	114899	87
500	41,0	1320	50,0	.	.	Nordtank	5	25709 AA	Kronprinzenk./WeG3	9/96	3919500	2173861	329	651447	98	587146	88	438467	66	496801	75
500	37,0	1075	36,5	5,2	.	Nordtank		25764 O06	Friedrichsgabekoog	12/94	1123000	278039	259	117286	109	-0	0	73838	68	86915	80
500	37,0	1075	36,5	5,2	.	Nordtank		25764 O07	Friedrichsgabekoog	12/94	1008300	246576	229	105292	97	-0	0	64552	60	76732	71
500	37,0	1075	36,5	5,2	.	Nordtank		25764 O08	Friedrichsgabekoog	12/94	1104200	268740	250	112868	104	-0	0	71229	66	84643	78
500	37,0	1075	35,0	5,1	6,1	Nordtank		25821 N05	Breklumer Koog8	1/93	1099500	414462	385	124371	115	109176	101	79788	74	101127	94
500	37,0	1075	35,0	5,1	6,1	Nordtank		25821 N06	Breklumer Koog7	1/93	1096600	403433	375	125648	116	99254	92	76863	71	101668	94
500	37,0	1075	35,0	5,1	6,1	Nordtank		25821 N07	Breklumer Koog6	1/93	1085200	399695	372	122656	114	103934	96	78105	72	95000	88
500	37,0	1075	35,0	5,1	6,1	Nordtank		25821 N08	Breklumer Koog5	1/93	1050000	391979	365	121817	113	100938	93	76955	71	92269	85
500	41,0	1320	50,0	5,1	.	Nordtank		25821 S01	Struckum/B	2/96	1459000	405127	307	145611	110	127006	96	-0	0	132510	100
500	41,0	1320	50,0	5,1	.	Nordtank		25821 S02	Struckum/B	2/96	1471600	529586	401	158142	119	134292	101	105395	79	131757	99
500	41,0	1320	50,0	5,1	.	Nordtank		25821 S03	Struckum/B	2/96	1505900	534319	405	161543	122	130910	99	110277	83	131589	99
500	37,0	1075	35,0	.	.	Nordtank	7	25924 H	Brollingsee	8/94	9810500	3391161	451	1035318	137	854419	113	650216	86	851207	113
500	41,0	1320	50,0	3,6	4,2	Nordtank		33181 C	Wünnenberg-Helmern	8/95	1007100	363200	275	122480	92	121570	92	65210	49	53940	40
500	41,0	1320	50,0	.	.	Nordtank	5	34519 D	Vasbeck	12/94	4309500	1575173	239	527960	79	543208	82	288534	43	215471	32
500	41,0	1320	50,0	4,9	5,8	Nordtank		66629 A08	Freisener Höhe	9/95	994700	407242	308	148021	112	101486	76	89072	67	68663	52
500	41,0	1320	50,0	4,9	5,8	Nordtank		66629 A09	Freisener Höhe	9/95	1044200	220266	167	135769	102	84497	64	0	0	0	0
500	41,0	1320	50,0	4,9	5,8	Nordtank		66629 A10	Freisener Höhe	9/95	1015400	395882	300	139614	105	95560	72	92592	70	68116	51
500	41,0	1320	50,0	4,9	5,8	Nordtank		66629 A11	Freisener Höhe	9/95	914800	356936	270	135416	102	83029	62	81988	62	56503	42
500	37,0	1075	40,0	.	5,1	Tacke		21109 A02	HH-Georgswerder	3/95	695700	236235	220	63094	58	75065	69	50273	46	47803	44
500	37,0	1075	43,0	.	.	Tacke		21109 A03	HH-Georgswerder	5/96	556800	228722	213	60446	56	75858	70	44574	41	47844	44

WIND KRAFT JOURNAL **Leistungsstatistik aus der Betreiberdatenbasis** 3/99

KW	Rotor ø	Rotor m2	Nabe m	m/s in 10 m	m/s in 30 m	Hersteller	Anzahl WKA	PLZ	Ort	Seit	kWh 1998	kWh 1999	kWh/m2 1999	kWh 1/99	kwh/m2 1/99	kWh 2/99	kWh/m2 2/99	kWh 3/99	kWh/m2 3/99	kWh 4/99	kWh/m2 4/99
660	47,0	1735	65,0	.	.	Vestas		25764 AC04	Süderdeich	12/98	0	137927	79	-0	0	-0	0	-0	0	137927	79
750	49,0	1886	60,0	.	.	Fuhrländer		35759 I	Hohenroth	5/97	800700	202580	107	-0	0	137580	72	-0	0	65000	34
750	52,0	2124	73,9	.	4,6	Wind World		47574 B01	Goch-Pfalzdorf	1/99	0	329660	155	-0	0	140440	66	93770	44	95450	44
750	52,0	2124	73,9	.	4,6	Wind World		47574 B02	Goch-Pfalzdorf	1/99	0	318308	150	-0	0	113088	53	99770	46	105450	49
800	49,0	1886	60,0	.	.	Fuhrländer		63697 A	Hirzenhain	8/97	749100	350782	186	123052	65	109556	58	66681	35	51493	27
800	52,0	2124	60,0	.	.	Nordex		15326 B	Podelzig	12/95	1727300	594082	280	189975	89	184196	86	119578	56	100333	47
800	52,0	2124	60,0	.	.	Nordex		17111 A	Sarow	10/97	1823600	628543	296	206636	97	176096	82	126150	59	119661	56
800	52,0	2124	63,5	.	.	Nordex		24235 B	Laboe	10/95	1827900	539613	254	100613	47	161240	75	140800	66	136960	64
800	52,0	2124	60,0	4,5	5,6	Nordex		25554 C01	Dammfleth	12/95	2097600	706063	332	207704	97	197731	93	145824	68	154804	72
800	52,0	2124	60,0	4,5	5,6	Nordex		25554 C02	Dammfleth	5/96	2118900	718008	338	220424	103	196559	92	145090	68	155935	73
800	52,0	2124	60,0	.	.	Nordex		26826 A	Weener	12/95	1966900	694606	327	235676	110	200196	94	132150	62	126584	59
800	52,0	2124	60,0	.	.	Nordex		32469 M	Petershagen-Südf.	4/96	1343700	410428	193	159956	75	92120	43	86333	40	72019	33
800	52,0	2124	60,0	.	.	Nordex		39167 A02	Hohendodeleben	2/96	1970900	629738	297	177302	83	208608	98	130156	61	113672	53
1000	54,0	2290	60,0	.	5,0	AN BONUS		14913 H	Werbig	12/98	0	585740	256	199440	87	155800	68	123540	53	106960	46
1000	54,0	2290	60,0	.	.	AN BONUS	17	17337 A	Wilsickow	12/98	3088900	9954601	256	2847010	73	3251826	83	1815369	46	2040396	52
1000	54,0	2290	60,0	.	.	AN BONUS		28197 F	Bremen	4/98	956800	586896	256	170623	74	187623	81	116059	50	112591	49
1000	54,0	2290	70,0	.	.	AN BONUS		31241 B02	Klein Solschen	12/98	0	685259	299	140698	61	275903	120	140275	61	128383	56
1000	54,0	2290	50,0	.	.	AN BONUS		33184 D03	Altenbeken-Winterb	10/97	1707700	627293	274	227257	99	203019	88	109219	47	87798	38
1000	54,0	2290	70,0	.	.	AN BONUS		41517 B01	Grevenbroich	12/98	0	285075	124	-0	0	99084	43	104991	45	81000	35
1000	54,0	2290	70,0	.	.	AN BONUS		41517 B02	Grevenbroich	12/98	0	85978	38	-0	0	11530	5	74362		32 86	0
1000	54,0	2290	70,0	.	.	AN BONUS		41517 B03	Grevenbroich	1/99	0	212337	93	-0	0	5878	2	107580	46	98879	43
1000	62,0	3019	68,5	.	.	DeWind		54611 G	Scheid	11/98	0	273669	91	113041	37	-0	0	75254	24	85374	28
1000	62,0	3019	70,0	.	.	DeWind		67823 A	Unkenbach	3/99	0	155436	51	-0	0	-0	0	29448	9	125988	41
1000	54,0	2290	70,0	.	.	HSW	6	23847 A	Westerau	12/97	2787000	3423793	249	1074827	78	1040540	75	619906	45	688519	50
1000	57,0	2552	60,0	.	.	HSW		25873 C	Oldersbek	11/97	2653500	938098	368	298068	116	228444	89	190807	74	220779	86
1000	54,0	2290	55,0	.	.	HSW		25899 W01	Bosbüll	12/95	2711600	965045	421	268735	117	255259	111	198603	86	242448	105
1000	54,0	2290	55,0	.	.	HSW		25899 W02	Bosbüll	12/95	2497700	898674	392	253072	110	240416	104	181852	79	223334	97
1000	54,0	2290	55,0	.	.	HSW		25899 W03	Bosbüll	12/95	2657000	898350	392	264341	115	232716	101	173605	75	227688	99
1000	54,0	2290	55,0	.	.	HSW		25899 W04	Bosbüll	12/95	2755300	946868	413	289345	126	236151	103	183813	80	237559	103
1000	57,0	2552	60,0	.	.	HSW		25924 L01	Emmelsbüll-Horsb.	11/97	3569900	1206429	473	357023	139	283372	111	253947	99	312087	122
1000	57,0	2552	60,0	.	.	HSW		25924 L02	Emmelsbüll-Horsb.	11/97	3448800	1166177	457	355020	139	283372	111	253207	99	274578	107
1000	57,0	2552	70,0	.	.	HSW		33100 N01	Paderborn	11/97	2158400	729686	286	234586	91	218168	85	155855	61	121077	47
1000	57,0	2552	70,0	.	.	HSW		33100 N02	Paderborn	11/97	2169400	739225	290	240242	94	222144	87	156256	61	120583	47
1000	57,0	2552	70,0	.	.	HSW		83530 B	Schnaitsee-Edenhub	8/98	385400	472111	185	120518	47	200848	78	93306	36	57439	22
1000	54,0	2290	60,0	2,1	5,5	Nordex		01723 C	Wilsdruff (A4)	6/96	2059900	633387	277	141888	61	256363	111	133504	58	101632	44
1000	52,0	2124	60,0	.	.	Nordex		04509 A	Selben	12/96	1776100	609650	287	206028	97	188735	88	121751	57	93136	43
1000	54,0	2290	60,0	.	.	Nordex		08684 A01	Bad Brambach	8/96	956800	330428	144	124915	54	98103	42	63570	27	43840	19
1000	54,0	2290	60,0	.	.	Nordex		08684 A02	Bad Brambach	8/96	876800	317585	139	129845	56	89657	39	59431	25	38652	16
1000	54,0	2290	60,0	.	.	Nordex		08684 A03	Bad Brambach	8/96	824000	287629	126	111140	48	78735	34	56035	24	41719	18
1000	54,0	2290	70,0	.	.	Nordex	6	09337 A	Bernsdorf/Gersdorf	4/98	3078600	3607245	263	1238341	90	1290109	93	593395	43	485400	35
1000	54,0	2290	70,0	.	.	Nordex	7	17098 A	Friedland	6/97	10411000	3955864	247	1349874	84	910625	56	762985	47	932379	58
1000	54,0	2290	70,0	.	.	Nordex		17291 J	Blindow	8/98	700400	574062	251	156040	68	190478	83	113632	49	113912	49
1000	52,0	2124	60,0	.	.	Nordex		18182 B	Bentwisch	2/95	1907300	558424	263	174368	82	140067	65	122929	57	121060	57
1500	66,0	3421	70,0	6,4	.	Enercon		18556 I01	Bohlendorf	7/97	5233500	1652400	483	432600	126	476580	139	318300	93	424920	124
1500	66,0	3421	70,0	6,4	.	Enercon		18556 I02	Bohlendorf	7/97	5272600	1711920	500	465540	136	487140	142	323820	94	435420	127
1500	66,0	3421	**,*	.	4,2	Enercon		21109 B	HH-Georgswerder	8/98	965000	992973	290	280111	81	304258	88	201942	59	206662	60
1500	66,0	3421	67,0	.	.	Enercon	7	21734 E	Oederquart	9/98	0	3829483	160	0	0	1211292	50	998265	41	1619926	67
1500	66,0	3421	68,0	.	.	Enercon		25541 T	Brunsbüttel-Süd	3/97	3973000	1285124	376	372488	108	357064	104	276382	80	279190	81
1500	66,0	3421	66,8	.	.	Enercon		25709 AS	Kaiser-Wilhelm-Kg	8/97	4727400	1674534	489	539361	157	438028	128	362823	106	334322	97
1500	66,0	3421	60,0	.	.	Enercon		25924 F28	Lübke-Koog XIV	3/97	5630800	1856640	543	551220	161	477900	139	357180	104	470340	137
1500	66,0	3421	60,0	.	.	Enercon		25924 F29	Lübke-Koog BWP	4/98	3102200	1764360	516	514200	150	455640	133	340740	99	453780	132
1500	66,0	3421	60,0	.	.	Enercon		25924 F30	Lübke-Koog BWP	4/98	3097700	1766700	516	517560	151	456180	133	334560	97	458400	133
1500	66,0	3421	60,0	.	.	Enercon		25924 F31	Lübke-Koog BWP	5/98	2972200	1814100	530	531780	155	465900	136	360060	105	456360	133
1500	66,0	3421	67,0	.	5,2	Enercon		32699 B01	Extertal-Goldbeck	3/99	0	153642	45	-0	0	-0	0	-0	0	153642	45
1500	66,0	3421	67,0	.	5,2	Enercon		32699 B02	Extertal-Goldbeck	12/98	0	855325	250	287674	84	218212	63	209037	61	140402	41
1500	66,0	3421	68,0	.	.	Enercon		33100 Q	Paderborn-Dahl	7/98	0	738040	216	-0	0	369960	108	209880	61	158200	46
1500	66,0	3421	70,0	.	.	Enercon		36341 A01	Frischborn	12/97	1326400	609281	178	242008	70	146339	42	127124	37	93810	27
1500	66,0	3421	70,0	.	.	Enercon		36341 A02	Frischborn	3/98	1068200	635007	186	249684	72	165707	48	122537	35	97079	28
1500	66,0	3421	70,0	.	.	Enercon		36341 A03	Frischborn	4/98	1058000	584431	171	229459	67	137158	40	120818	35	96996	28
1500	66,0	3421	67,0	.	4,7	Enercon		37083 A	Geismar	5/98	861600	620445	181	183312	53	212022	61	129890	37	95221	27
1500	66,0	3421	67,0	.	.	Enercon		96199 B	Sassendorf	6/98	0	82291	24	-0	0	-0	0	-0	0	82291	24
1500	60,0	2827	60,0	.	.	Nordtank		33181 G	Wünnenberg-Helm.	6/97	2602800	938970	332	316920	112	329940	116	165810	58	126300	44
1500	65,0	3318	67,0	.	.	Tacke		04703 C01	Bockelwitz	11/98	0	454913	137	-0	0	237336	71	98398	29	119179	35
1500	65,0	3318	67,0	.	.	Tacke		04703 C02	Bockelwitz	11/98	0	207245	62	-0	0	-0	0	99177	29	108068	32
1500	65,0	3318	67,0	.	.	Tacke	7	04703 D	Bockelwitz	12/98	0	3058197	132	0	0	1476740	63	715742	30	865715	37
1500	70,5	3904	85,0	.	.	Tacke		26434 AM	Hooksiel (Wangerla	12/98	0	464891	119	-0	0	-0	0	300884	77	164007	42
1500	65,0	3318	67,0	.	.	Tacke		26723 G	Emden	4/96	4894000	1652834	498	571422	172	437767	131	308683	93	334962	100
1500	65,0	3318	67,0	.	.	Tacke		36355 A09	Hartmannshain	1/99	0	316100	95	-0	0	-0	0	146380	44	169720	51
1500	65,0	3318	80,0	.	.	Tacke		46399 B01	Bocholt	8/98	303000	845113	255	292964	88	256542	77	142093	42	153514	46
1500	65,0	3318	80,0	.	.	Tacke		46399 B02	Bocholt	8/98	251000	426741	129	212845	64	61734	18	69806	21	82356	24
1500	65,0	3318	80,0	.	.	Tacke	16	49762 D	Sustrum	9/98	0	10092615	190	0	0	4344067	81	2542810	47	3205738	60
1500	65,0	3318	80,0	.	.	Tacke		91781 A	Weißenburg	3/98	1026000	504539	152	165499	49	149944	45	94015	28	95081	28
1650	66,0	3421	67,0	.	7,2	Vestas		18556 J	Bohlendorf	3/98	1442600	1637105	479	442392	129	479027	140	288345	84	427341	124
1650	66,0	3421	67,0	.	.	Vestas	5	25917 C	Sprakebüll	10/98	2930500	6262018	366	2173869	127	1592377	93	1052770	61	1443002	84
1650	66,0	3421	67,0	5,1	6,4	Vestas		25920 D01	Risum-Lindholm	12/98	0	1024583	299	-0	0	243817	71	374985	109	405781	118
1650	66,0	3421	67,0	5,1	6,4	Vestas		25920 D02	Risum-Lindholm	12/98	0	934206	273	-0	0	188288	55	369227	107	376691	110

Vertikal-Achsen-Windenergie-Konverter: kurzer, theoretischer Überblick



Definition zur Umströmung des *Darrieus*-Rotors

Werden folgende, erhebliche Vereinfachungen getroffen:

$\beta = 0$	Profilsehne läuft tangential um
$C_D = 0$	kein Rotorblattwiderstand
$C_L = 2\,\pi \sin\alpha$	stationäre Aerodynamik
$f_{AFL} << R$	Blatttiefe sehr viel kleiner als Rotor radius
$\gamma = 0$	gerade Rotorblätter, H-Rotor

Für das Drehmoment gilt:

$$Q_{H-Darrieus} = \rho \cdot \pi \cdot f_{AFL} \cdot R_{TIP} \cdot \ell \cdot v_{FFL}^2 \cdot \left(1 - a^2\right) \sin^2\theta$$

mit einem mittleren Drehnoment von:

$$\bar{Q}_{H-Darrieus} = \rho \cdot \pi \cdot z \cdot f_{AFL} \cdot R_{TIP} \cdot \ell \cdot v_{FFL}^2 \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{4}{3\pi}\frac{z \cdot f_{AFL} \cdot \lambda_{\omega,TIP}}{R_{TIP}} + \frac{3}{32}\frac{z^2 \cdot f_{AFL}^2 \cdot \lambda_{\omega,TIP}^2}{R_{TIP}^2}\right]$$

A ist die bestrichene Windfläche, für den H-Rotor ist das $A = 2 \cdot R \cdot l$ [m²] wobei l [m] die Länge des geraden Rotorblattes darstellt. Der genannte Leistungsbeiwert ergibt sich weiter unter der Annahme, daß $V_{DSC} = V_{FFL}$ (1 - a) ist, mit dem achsialen Induktionsfaktor a zu:

$a_{H\text{-}Darrieus} = z \cdot f_{AFL} \cdot \boldsymbol{\lambda}_{\omega,TIP} \cdot / \sin\theta/2 \cdot R_{TIP}$

so erhält man für den geraden, ***H-Darrieus-Rotor*** folgenden Leistungsbeiwert:

$$C_{P,H-Darrieus} = \pi \cdot \lambda_{\omega,TIP} \cdot \frac{z \cdot f_{AFL}}{R_{TIP}} \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{4}{3\pi}\frac{z \cdot f_{AFL} \cdot \lambda_{\omega,TIP}}{R_{TIP}} + \frac{3}{32}\frac{z^2 \cdot f_{AFL}^2 \cdot \lambda_{\omega,TIP}^2}{R_{TIP}^2}\right]$$

Damit ergibt sich für den geraden H-Darrieus ein C_P von 0,554 bei einem $a_{opt.}$ von 0,401. Durch Reibungseffekte übertrifft jedoch C_P den Wert von 0,36 nicht.

Kreisförmig gebogener Darrieus - Rotor:

Induktionsfaktor: $a_{K-Darrieus} = z \cdot f_{AFL} \cdot \lambda_{\omega,TIP} \cdot \cos\gamma \sin\theta / R_m$

Der Drehmomentenbeitrag, erzeugt durch eine Scheibe mit der Breite dz (Drehachsrichtung z), beträgt:

$$d\bar{Q}/dz = \rho \cdot \pi \cdot z\, f_{AFL} \cdot v_{FFL}^2 \cos\gamma \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{8}{3\pi} \cdot \sigma \cdot \lambda_{\omega,TIP} \cdot \cos\gamma + \frac{3}{8}\sigma^2\, \lambda_{\omega,TIP}^2\, \cos^2\gamma\right]$$

wobei $\sigma = z \cdot f_{AFL} / 2\, R_m$ als Blattbreitenfunktion oder Dichtefaktor bezeichnet werden kann.

Der Leistungsbeiwert -Anteil der endlich dünnen Scheibe dz ist:

$$dC_P/dz = \frac{4\pi \cdot \sigma \cdot \lambda_{\omega,TIP}}{A_\phi} \cdot R_{TIP} \cdot \cos\gamma \cdot \left[\frac{1}{2} - \frac{8}{3\pi} \cdot \sigma \cdot \lambda_{\omega,TIP} \cdot \cos\gamma + \frac{3}{8}\sigma^2\, \lambda_{\omega,TIP}^2\, \cos^2\gamma\right]$$

Der einfache Fall des kreisförmigen *Darrieus*-Rotors liefert für $a_{opt} = \sigma\lambda_{\omega,TIP} = 0{,}461$ einen Leistungsbeiwert von $C_{P,max} = 0{,}536$.

Die Formeln gelten nur für den reibungsfreien Fall!