

# About the book “Small Wind Generators”

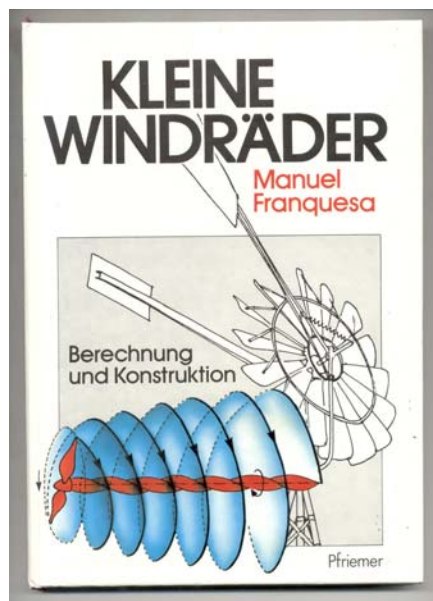
[Franquesa, Manuel: Kleine Windraeder : Berechnung u. Konstruktion - Wiesbaden ; Berlin : Bauverlag, 1989. ISBN 3-7625-2700-8]

175 pages

75 chapters

Approx. 120 illustrations and diagrams

Size approx. 24 x 17 cm



Cover & back cover

Book for the construction and calculation of the wings of small wind generators, especially of wings with simple shapes and profiles, which on one side will reduce their efficiency, but on the other side will be easier and cheaper to build.

In the most easy possible way, the book helps to calculate the main parts of the wind generator, using a great number of diagrams, tables and formulas. On purpose, the theoretical demonstration of most formulas has not been taken into consideration **to keep the book attractive for the practically orientated reader.**

The book is divided into three parts:

Part one is dealing with the “propeller” itself, i.e. the properties of its function and its adaptation to an energy producing device (generator) is presented as if the propeller was already built (my lectures at the university have shown that this is the best pedagogical way) .

Part two is dedicated to the calculation of the main parts of a wind generator system: the wings, the orientation of the machine in the wind, the devices for

the limitation of the tip speed etc. It also shows how to calculate in advance the efficiency and the characteristic curves of the wind machine.

Part three is dedicated to the wind climate. It shows how to optimally adapt a given wind generator to the existing wind climate and how to predict the daily, weekly, monthly or yearly energy production of a given machine knowing the wind statistics of the site with the help of many user friendly diagrams.

### **About the author**

Manuel Franquesa

Born 1948 in Zurich

MA of the Federal Institute of Technology Zurich (Switzerland)

Primary and secondary school in Barcelona (1955 – 1967)

1968-1975

Studies at the Federal Institute of Technology Zurich (electrical engineer)

1974-1976

Engineer at Brown, Boveri & Co. Zurich

1976-1978

Teacher at a professional school in Zurich (training of electrical technicians) and assistant at the Institute for Hydrodynamics of the Federal Institute of Technology Zurich (Prof. B. Chaix)

1979-1983

Freelance technical and scientific translator into Spanish.

1983-1985

Lecturer on ecological energy at the University of Madagascar.

1986-1987

Academical guest at the Institut for Geography of the Federal Institute of Technology Zurich. Lectures on wind energy and author of several papers.

Since 1988

Freelance technical and scientific translator into Spanish (from German, English and French).

My main hobby is to build wind sculptures with recycled materials. I had several exhibitions since 1988, the last in May 2006 in Austria (at "Waldfestival Niederösterreich 2006").

## Some pages of the book:

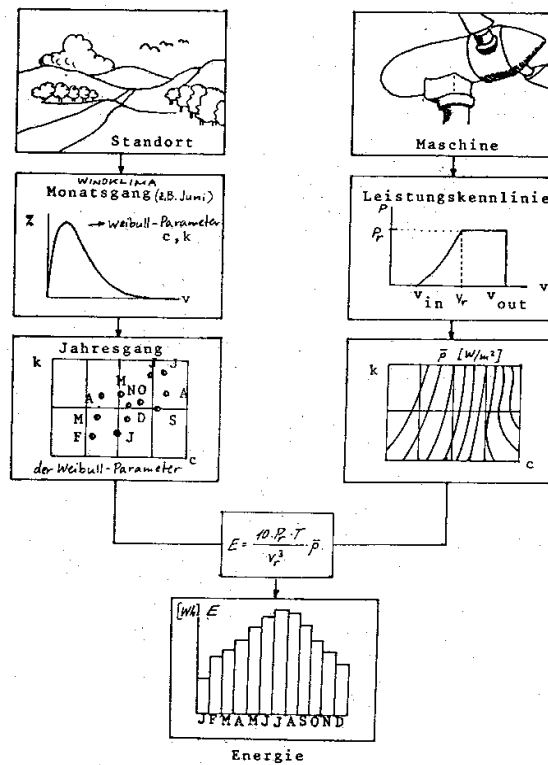


Bild 3.5-6 Bestimmung der Energieverteilung innerhalb eines Jahres, falls die Weibull-Parameter des Windklimas jeden Monats bekannt sind

Für  $v_{in} = 5 \text{ m/s}$  wird die Stillstandszeit ungefähr in der Mitte obiger Werte liegen, d. h.  $T_{st} \approx 0,62T = 0,62 \cdot 8760 \text{ h} = 5431 \text{ h}$ . Dieses Resultat stimmt sehr gut mit dem in Abschnitt 3.5.2 errechneten Wert überein.

Fig. 3.5-6 Calculation of the distribution of the produced energy in one year if you know the two Weibull parameters of the wind climate of each month

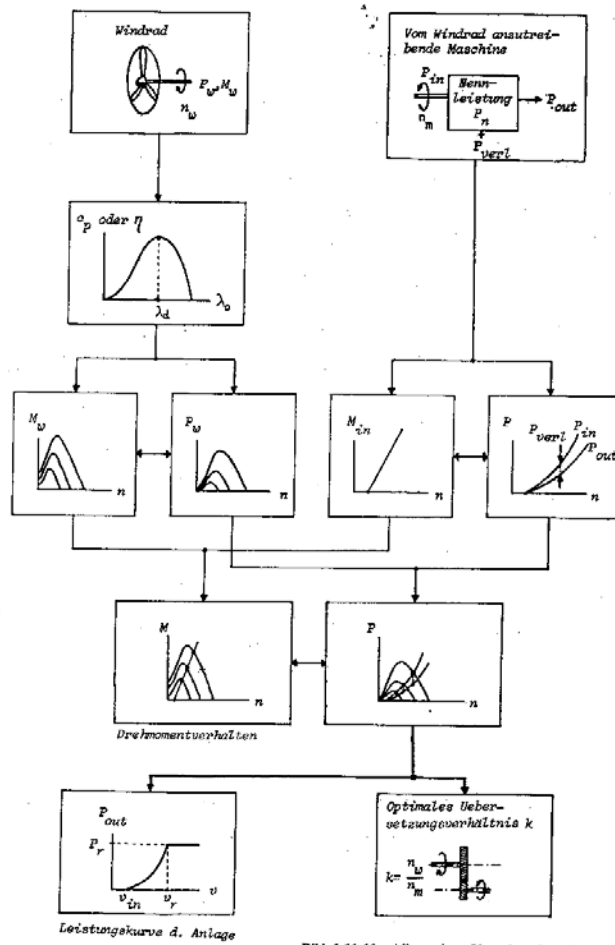


Bild 1.11-10 Allgemeines Vorgehen für die optimale Anpassung zwischen Windrad und Arbeitsmaschine.

Fig. 1.11-10 General procedure for the optimal adaptation of the propeller to the generator

(Winkel zwischen der Anströmungsgeschwindigkeit  $c$  und der Windradebene) besteht folgender wichtiger Zusammenhang (Bild 2.2.3-1):

$$\delta = \beta - \alpha \quad (2.2.4.5)$$

Damit das Flügелеlement mit maximaler Gleitzahl arbeitet, muß dafür gesorgt werden, daß der Anstellwinkel  $\alpha$  den optimalen Wert des gewählten Profils annimmt (Polare). Daraus folgt für die optimale Stellung des Flügелеlements:

$$\delta_{\text{opt}} = \beta_{\text{opt}} - \alpha_{\text{opt}} \quad (2.2.4.6)$$

Da  $\beta_{\text{opt}}$  gemäß Gleichung (2.2.4.4) vom Abstand  $r$ ,  $\alpha_{\text{opt}}$  hingegen nur vom gewählten Profil abhängig ist (Polare), wird wegen Gleichung (2.2.4.6) auch  $\delta_{\text{opt}}$  von  $r$  abhängen, d. h., optimal gebaute Flügel müssen einen entlang ihrer Länge veränderlichen Winkel zwischen der Sehne des Profils und der Windradebene aufweisen; sie müssen verwunden sein (Bild 2.2.4-2).

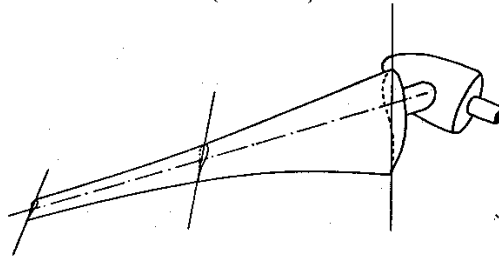


Bild 2.2.4-2  
Windradflügel mit  
Verwindung

### 2.2.5 Die optimale Flügelbreite

Die optimale Breite des Flügелеlements im Abstand  $r$  von der Windradachse kann mit folgender Formel [Lysen] berechnet werden:

$$t_{\text{opt}} = \frac{8\pi \cdot r}{z \cdot c_{a\text{opt}}} (1 - \cos \beta_{\text{opt}}) \quad (2.2.5.1)$$

worin  $z$  die Anzahl der Flügel oder Blätter des Windrades,  $c_{a\text{opt}}$  der zum optimalen Anstellwinkel  $\alpha_{\text{opt}}$  gehörende Auftriebsbeiwert des verwendeten Profils (Polare: maximale Gleitzahl) und  $\beta_{\text{opt}}$  der Winkel nach Gleichung (2.2.4.4) bedeuten.

Dabei muß allerdings eine Verminderung der Gleitzahl in Kauf genommen werden, denn jede Abweichung vom optimalen Anstellwinkel  $\alpha_{opt}$  bewirkt eine Abnahme der Gleitzahl.

Es kann aber auch umgekehrt vorgegangen werden: Bei vorgegebener Breite  $t$  wird die Stellung so bestimmt, daß an jedem Flügелеlement die optimale Umrißfunktion  $\vartheta_{opt}$  erfüllt wird. Allerdings ist die dabei resultierende, nichtlineare Verwindung konstruktiv schwierig zu realisieren.

Bild 2.2.7-2 veranschaulicht schematisch das Vorgehen für den Entwurf eines Flügels.

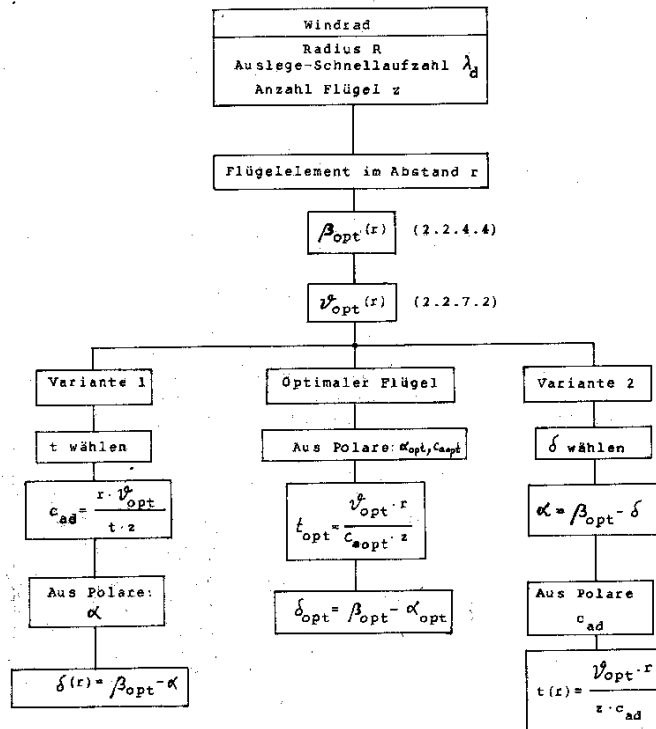


Bild 2.2.7-2 Vorgehen für den Entwurf eines Windradflügels ( $c_{ad}$  = Auslegewert des Auftriebbeiwertes)

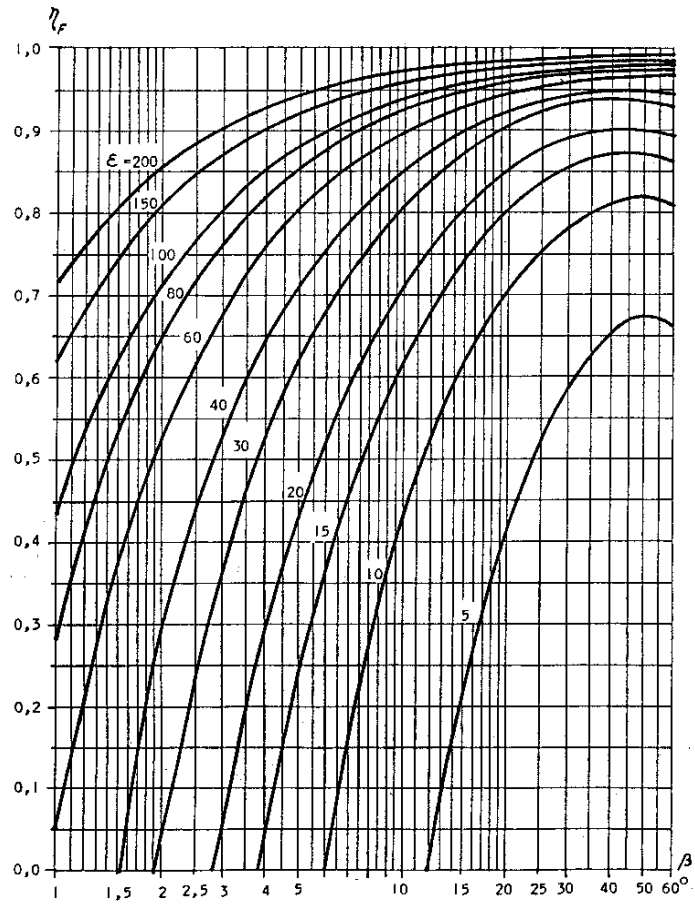
Fig. 2.2.7-2 General procedure to design the wings of a wind generator (...)

$\lambda_0$	$\eta_w$	$c_{p,w}$	$c_m$	$v = 4 \text{ m/s}$			$v = 6 \text{ m/s}$			$v = 8 \text{ m/s}$			$v = 10 \text{ m/s}$			$v = 12 \text{ m/s}$			$v = \text{ m/s}$			$v = \text{ m/s}$						
				$n$	$P_w$	$M_w$	$n$	$P_w$	$M_w$	$n$	$P_w$	$M_w$	$n$	$P_w$	$M_w$	$n$	$P_w$	$M_w$	$n$	$P_w$	$M_w$	$n$	$P_w$	$M_w$	$n$	$P_w$	$M_w$	
-	-	-	-	$U/\text{min}$	$W$	$Nm$	$U/\text{min}$	$W$	$Nm$	$U/\text{min}$	$W$	$Nm$	$U/\text{min}$	$W$	$Nm$	$U/\text{min}$	$W$	$Nm$	$U/\text{min}$	$W$	$Nm$	$U/\text{min}$	$W$	$Nm$	$U/\text{min}$	$W$	$Nm$	
0	0	0	$(c_{mo})$ 0,0102	0	0	(Mo) 5	0	0	(Mo) 11	0	0	(Mo) 20	0	0	(Mo) 31	0	0	(Mo) 45	0	0		0	0		0	0		
1	0,025	0,0148	0,0148	15,3	11	7	22,9	39	16	30,6	33	29	38,2	181	45	45,9	373	65										
2	0,075	0,0444	0,0222	30,6	35	11	45,9	118	25	61,1	278	43	76,4	544	68	91,7	940	98										
3	0,16	0,0948	0,0316	45,9	74	15	68,8	251	35	91,7	594	62	114,6	1160	97	137,6	2004	139										
4	0,30	0,1778	0,0444	61,1	139	22	91,7	470	49	122,3	1114	87	152,9	2175	136	183,4	3758	196										
5	0,53	0,3141	0,0628	76,4	246	31	114,6	830	69	152,9	1867	123	191,1	3842	192	229,3	6640	277										
6	0,66	0,3971	0,0652	91,7	306	32	137,6	1034	72	183,4	2450	128	229,3	4785	199	275,2	8268	287										
7	0,70	0,4148	0,0593	107	325	29	160,3	1092	65	214	2598	116	267,5	5075	181	321	8770	261										
8	0,69	0,4089	0,0511	122,3	320	25	183,4	1081	56	244,6	2561	100	305,7	5002	156	367	8644	225										
9	0,65	0,3852	0,0428	137,6	302	21	206,4	1018	47	275,2	2413	84	343,9	4712	131	412,7	8743	189										
10	0,59	0,3496	0,0350	152,9	274	17	229,3	924	38	305,7	2190	68	382,2	4277	107	454,6	7392	154										
11	0,50	0,2963	0,0269	168,2	232	13	252,7	783	30	336,3	1856	53	420,4	3625	82	504,5	6264	119										
12	0,37	0,2193	0,0183	183,4	172	9	275,2	579	20	366,9	1373	36	454,6	2682	54	550,3	4635	80										
13	0,20	0,1185	0,0091	198,7	93	4	298,1	313	10	397,5	742	18	496,8	1450	28	596,2	2507	40										
14	0,00	0,0	0,0	214	0	0	321	0	0	428	0	0	535	0	0	642	0	0										

Bild 1.9-3 Numerische Werte der Berechnung der Betriebskennlinien des Windrades mit der Wirkungsgradcharakteristik von Bild 1.9-2

43

Fig. 1.9-3 Numerical values of the calculation of the characteristic curves of the wind generator with the properties described in Fig. 1.9-2



**Bild 2.2.8-1** Verlauf des Flügelwirkungsgrades infolge endlicher Gleitzahl in Abhängigkeit vom Anströmungswinkel

Fig. 2.2.8-1 Efficiency of the wing in function of the angel of attack of the wind

**Beispiel 2.2.11**

Ein Windrad mit optimal entworfenen Flügeln (Profil NACA 4412) habe folgende Kennzahlen:

$\lambda_d = 5$   
 $z = 3$   
 $D = 4 \text{ m}$

Man berechne die  $c_{p,\lambda_0}$ -Kennlinie des Windrades mit dem in der Tabelle von Bild 2.2.11-2 angegebenen Vorgehen.

Da die Flügel optimal entworfen wurden, kann angenommen werden, daß das Rad etwa die gleiche Kennlinie haben wird wie das Flügелеlement, das sich im Abstand  $r = 0,72R = 1,44 \text{ m}$  von der Achse befindet (wirksamer Radius).

Die Stellung des Flügелеlements bei  $r = 0,72R$  beträgt nach Gleichung (2.2.4.6):

$\delta = \beta_{opt} - \alpha_{opt}$   
 $\beta_{opt}$  berechnet sich mit Gleichung (2.2.4.4) zu:

$$\beta_{opt} = \frac{2}{3} \arctan\left(\frac{1}{5 \cdot 0,72}\right) = 10,35^\circ$$

Der optimale Anstellwinkel des NACA-4412-Profils beträgt  $\alpha = 6^\circ$ . Somit folgt für  $\delta$ :

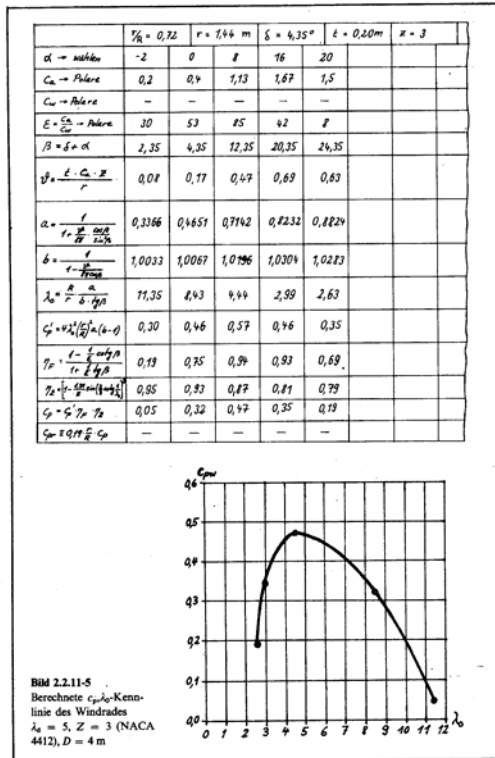
$\delta = 10,35 - 6 = 4,35^\circ$

Die Breite des Flügелеlements kann mit Gleichung (2.2.5.1) berechnet werden ( $c_{l,opt} = 0,96$  bei  $\alpha = 6^\circ$ )

$$l_{opt} = \frac{8 \cdot \pi \cdot 1,44}{3 \cdot 0,96} (1 - \cos 10,35) = 0,20 \text{ m}$$

Der Einfachheit halber soll angenommen werden, daß die Flügel eine unendliche Streckung aufweisen ( $A = \infty$ ). Somit kann die Polare von Bild 2.1.4-2 direkt benutzt werden.

In Bild 2.2.11-2 sind die berechneten Werte eingetragen worden, und Bild 2.2.11-5 stellt die berechnete Kennlinie graphisch dar.



Die Gleichgewichtsbedingung (2.4.3.1.3) liefert:

$$c_f = \left[ \frac{M_{ze}}{x(\varphi_e) \cdot y(\varphi_e)} - \frac{K_{f0}}{x(\varphi_e)} \right] \cdot 10^{-2} \quad [\text{N/cm}]$$

wobei  $M_{ze}$  durch Einsetzen von  $\Delta\delta = \Delta\delta_e$  und  $n = n_e$  in Gleichung (2.4.3.1.2) bekannt ist.

$x(\varphi_e)$  und  $y(\varphi_e)$  sind von der gewählten Geometrie des Systems abhängig und können entweder analytisch oder graphisch bestimmt werden (in [m] einsetzen!).

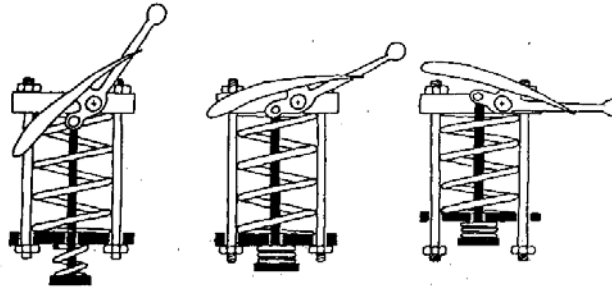
Die Bestimmung des Systemverhaltens  $\varphi(n)$  kann jetzt mit der in Abschnitt 2.4.2.3 erklärten Methode auf einfache Weise bestimmt werden.

**Bemerkung**

Diese Berechnungen liefern nur einen Anhaltspunkt für die Wahl der Feder. Die optimale Feder kann erst nach Betriebsversuchen gefunden werden.

**2.4.3.2 Weitere Beispiele von Regelungssystemen**

Bei Schnellläufern ab  $\lambda_d = 8$  ist wegen des kleinen Einstellwinkels  $\delta$  das Anfahren ohne Hilfseinrichtung problematisch. Im Stillstand ist die Geschwindigkeitskomponente  $u' = 0$  (Bild 2.2.3-1), und der Wind trifft die Flügel unter einem sehr großen Anstellwinkel  $\alpha$ , bei dem das Profil fast nur Widerstand und keinen Auftrieb mehr hat.



a Anfahren                      b Normalbetrieb                      c Starker Wind

**Bild 2.4.3-3** Kombiniertes Regelungssystem für das Anfahren und die Drehzahlbegrenzung  
a) Anfahren; b) Normalbetrieb; c) starker Wind

Fig. 2.4.3-3 Combined control system for the start and limitation of the tip speed  
a) start; b) normal performance; c) strong wind

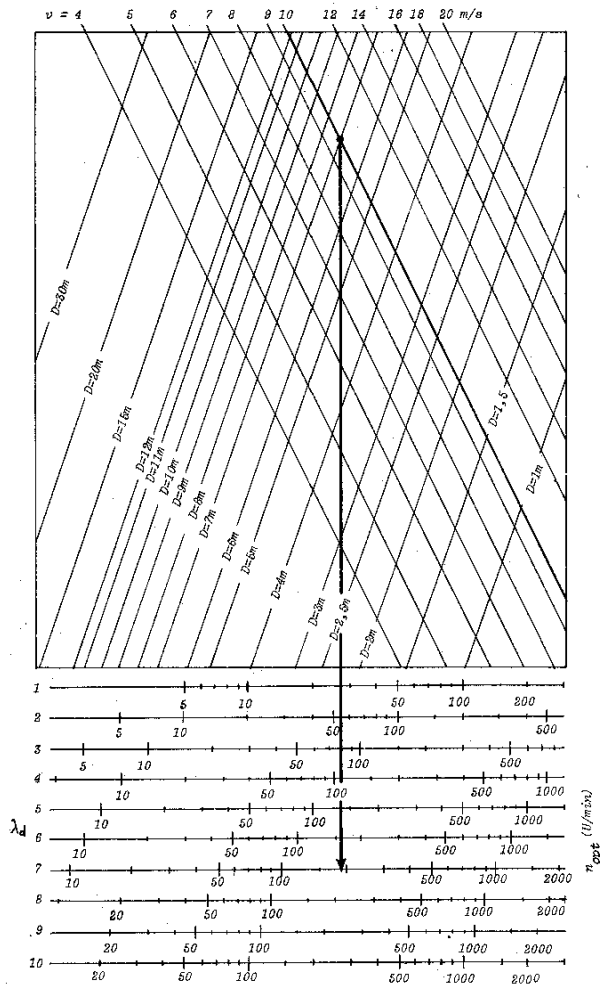
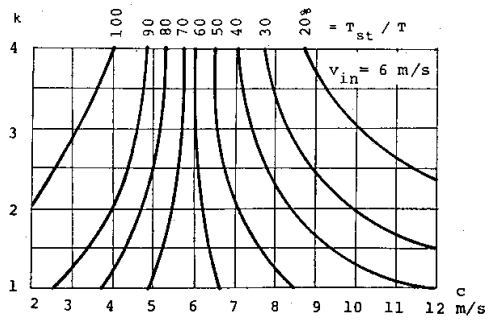
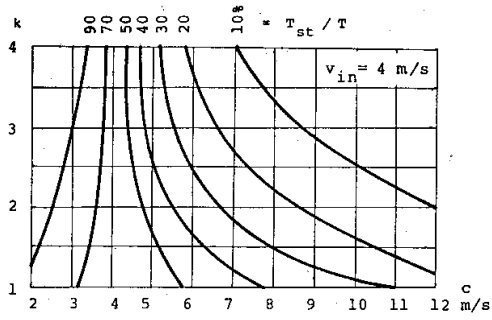


Bild 1.7-1 Diagramm zur Bestimmung der optimalen Drehzahl von Windrädern

36

Fig. 1.7-1 Diagram of the optimal tip speed of wind generators



**Bild 3.5-5** Relative Stillstandszeiten für 2 verschiedene Cut-in-Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von den Weibull-Parametern

Die oben besprochene Anlage hat eine Cut-in-Windstärke von 5 m/s. Mit den Weibull-Parametern  $c = 5 \text{ m/s}$  und  $k = 1,7$  folgt aus Bild 3.5-5:

für  $v_{in} = 4 \text{ m/s}$ :  $T_{st}/T \approx 50\% = 0,5$

für  $v_{in} = 6 \text{ m/s}$ :  $T_{st}/T \approx 74\% = 0,74$

Fig. 3.5-5 Diagram for the calculation of times of no production of energy for 2 different cut-in speeds of the wind machine in function of the Weibull parameters of the wind statistics of the site