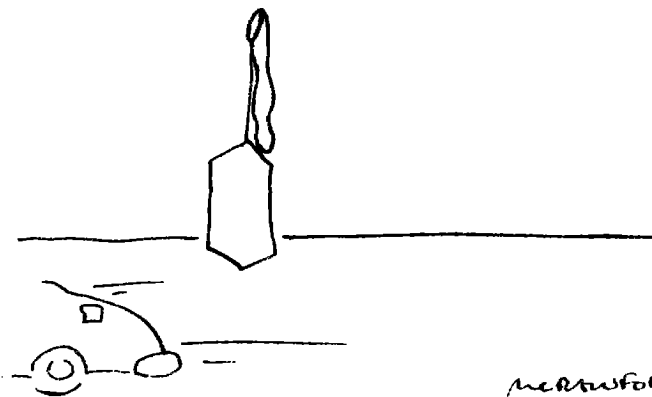
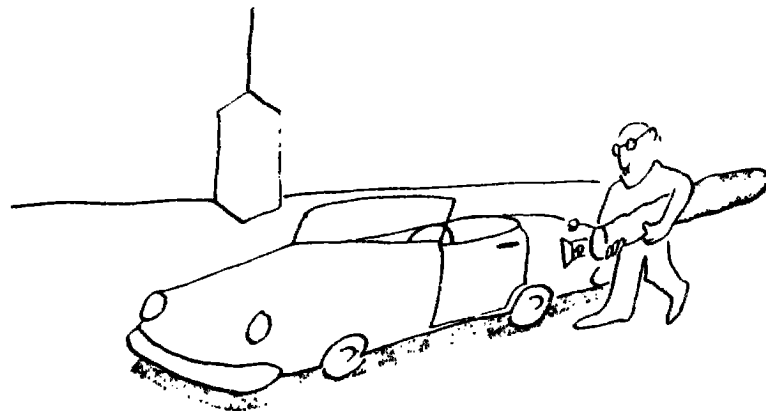
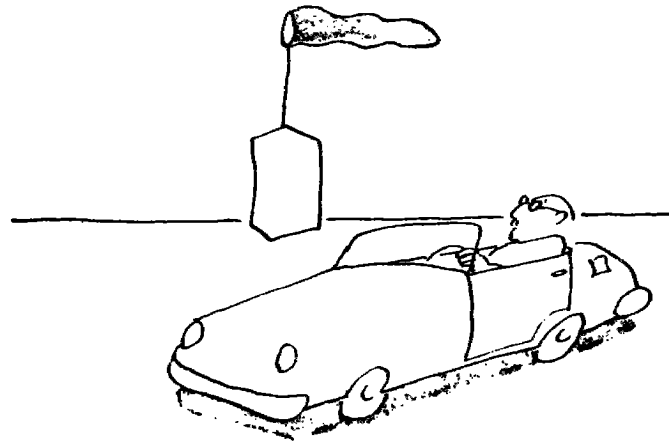


ÜBER DIE NUTZUNG DER WINDENERGIE



Mertensfort

Begleittext zum Versuch "Windenergie" im Rahmen
des Fortgeschrittenenpraktikums am II. Institut für Experimentalphysik
der Universität Hamburg

von Martin Duttge

INHALTSVERZEICHNIS

0	EINLEITUNG	
	Zur Geschichte und Systematik von Windrädern	6
	Überblick über das Vorgehen	8
1	DER WIND	
1.1	Entstehen des Windes	10
1.2	Eigenschaften des Windes	11
	a) Energieinhalt	11
	b) Die örtliche Geschwindigkeitsverteilung	12
	c) Die zeitliche Geschwindigkeitsverteilung	16
2	EIN HAUCH VON AERODYNAMIK	
2.1	Die Luftkraft	19
	a) Die Widerstandskraft	20
	b) Die Auftriebskraft	22
2.2	Profildaten	24
2.3	Die Reynoldszahl	26
3	BETRACHTUNG DES ENERGIEFLUSSES	
3.1	Das Impuls-Modell	28
	a) Die Leistung	29
	b) Die auf den Wind wirkende Kraft	30
	c) Die Gegenkraft des Windes	30
	d) Druck und Geschwindigkeiten	31
	e) Die maximale Leistung	31
3.2	Erweiterung des Impulsmodells	
	Die Berücksichtigung der Rotation	34
4	ROTORBLATTBERECHNUNG	
4.1	Das Radelement-Modell	36
	a) Geschwindigkeiten und Kräfte	37
	b) Ergebnisse aus dem Impulsmodell	38
	c) Die optimale örtliche Blatttiefe	39
	d) Der Blattumriß	40
	e) Die Schränkung des Flügelblattes	40
4.2	Erweiterungen des Radelement-Modells	41
	a) Die Berücksichtigung der Reibung	41
	b) Der Einfluß der Blattzahl z	43
4.3	Zusammenfassung	45
5	DAS VERHALTEN AUSSERHALB DES ENTWURFBEREICHES	
5.1	Das Anlaufen des Windrades	48
5.2	Das Leistungsverhalten des Windrades bei $\lambda_0 \neq \lambda_A$	50
6	DIE WEITERE UMFORMUNG DER WINDENERGIE	
6.1	Die Regelung der Drehzahl	52
	a) Drehmoment und Leistung	52
	b) Betriebspunkte	53
6.2	Die Wahl der Generatorleistung	57
7	VERZEICHNIS DER BENUTZTEN SYMBOLE	60
8	LITERATUR	63
9	ANHANG	65

O. EINLEITUNG

Im Zeitalter der Dampfmaschine wurde in der Physik ein Begriff geprägt, durch den man tiefgreifende Zusammenhänge in der Natur aufdeckte: ENERGIE. Wie kaum ein anderer Begriff aus der Physik ist dieses Wort heutzutage in aller Munde, und die zukünftige Energieversorgung ist zu einem entscheidenden Thema unserer Gesellschaft geworden. Es herrscht Einigkeit darüber, daß eine ausreichende Energieversorgung Grundlage einer stabilen Volkswirtschaft ist. Doch gibt es unterschiedliche Meinungen, was die Größe des Bedarfs und die Art der Energieträger anbelangt.

So gibt es zu den begrenzten fossilen Energieträgern, die die Sonnenenergie von Jahrtausenden gespeichert haben, zwei Alternativen: Den Einsatz nuklearer Energieträger (durch Kernspaltung oder -verschmelzung) und die Nutzung regenerativer ("sich in kurzer Zeit selbst erneuernder") Energieträger, also im wesentlichen die direkte oder indirekte Nutzung der Sonnenstrahlung. Diese Alternativen werden oft sehr kontrovers diskutiert und die Verfechter von "harter" und "sanfter" Technologie stehen sich unversöhnlich gegenüber. Was macht eine Einigung so schwer?

Dies mag zum einen daran liegen, daß die Wissenschaft - und hier insbesondere die Physik - ihre großen Erfolge durch die Isolierung der Dinge aus einem Gesamtzusammenhang erzielt. Bei der Anwendung werden die Ergebnisse dann in einen neuen Zusammenhang gestellt und es entstehen viele und überraschende Beziehungen unmittelbarer und mittelbarer Art. In unserer analytischen Denkweise sprechen wir von ökonomischen, ökologischen, sozialen, politischen usw. Gesichtspunkten, die neben dem physikalisch/technischen Aspekt auftreten. Nicht zuletzt die Vielzahl der Methoden, mit denen dann solch vielschichtige Problemkreise wie etwa die Kernenergienutzung behandelt werden, machen eine Verständigung und Einigung so schwierig.

Zum anderen erwies sich aber auch bis heute die Hoffnung vieler Menschen als trügerisch, man könne durch eine Beschränkung auf physikalisch/technologische Fragestellungen zumindestens zu Teillösungen gelangen. Denn selbst hier kam es zu vielen Unklarheiten. So wurde etwa von einigen engagierten Wissenschaftlern beider Seiten manches behauptet, was wohl erst einmal nur gefühlsmäßig zu begründen wäre. Aber auch die enorme Größe des Gebäudes Physik macht es schwer, nur "sachlich" zu argumentieren (Denn mal ganz ehrlich: Gehört nicht eine Menge Vertrauen in die Lehrbücher und die Worte des Lehrers dazu, um dieses von Abertausenden von Menschen geschaffene Gebilde zu verstehen?).

Trotzdem: In diesem Praktikum wollen wir versuchen, auf einem Gebiet der Energiebereitstellung gewisse physikalische Grundlagen nahezubringen. Ein Praktikum hat den Vorteil, daß man nicht nur liest, rechnet oder redet, sondern auch etwas sehen und anfassen, vielleicht sogar "begreifen" kann.

Das Thema des Praktikums ist die Windenergienutzung. Hier ist die Problematik noch einigermaßen überschaubar, auch was die Nebenwirkungen angeht. Sicherlich wird die Windenergie keinen großen Anteil an der Energieversorgung der Bundesrepublik haben - größenordnungsmäßig wären etwa 5 % zu erreichen. Aber für einzelne Gruppen und Anwendungen wird sie der ideale Energieträger sein, zumal die Umweltbelastung bei Produktion und Betrieb relativ klein ist. Ob sie nun besser der Bewässerung von Feldern, der Beheizung von Gebäuden oder der elektrischen Versorgung ganzer Landstriche dient, wird man am Ende des Praktikums hoffentlich auch einigermaßen beurteilen können.

Um sich nun noch eine gewisse Vorstellung von den Größenordnungen bei Energieumsetzungen machen zu können, sind die folgenden Diagramme hoffentlich nützlich.

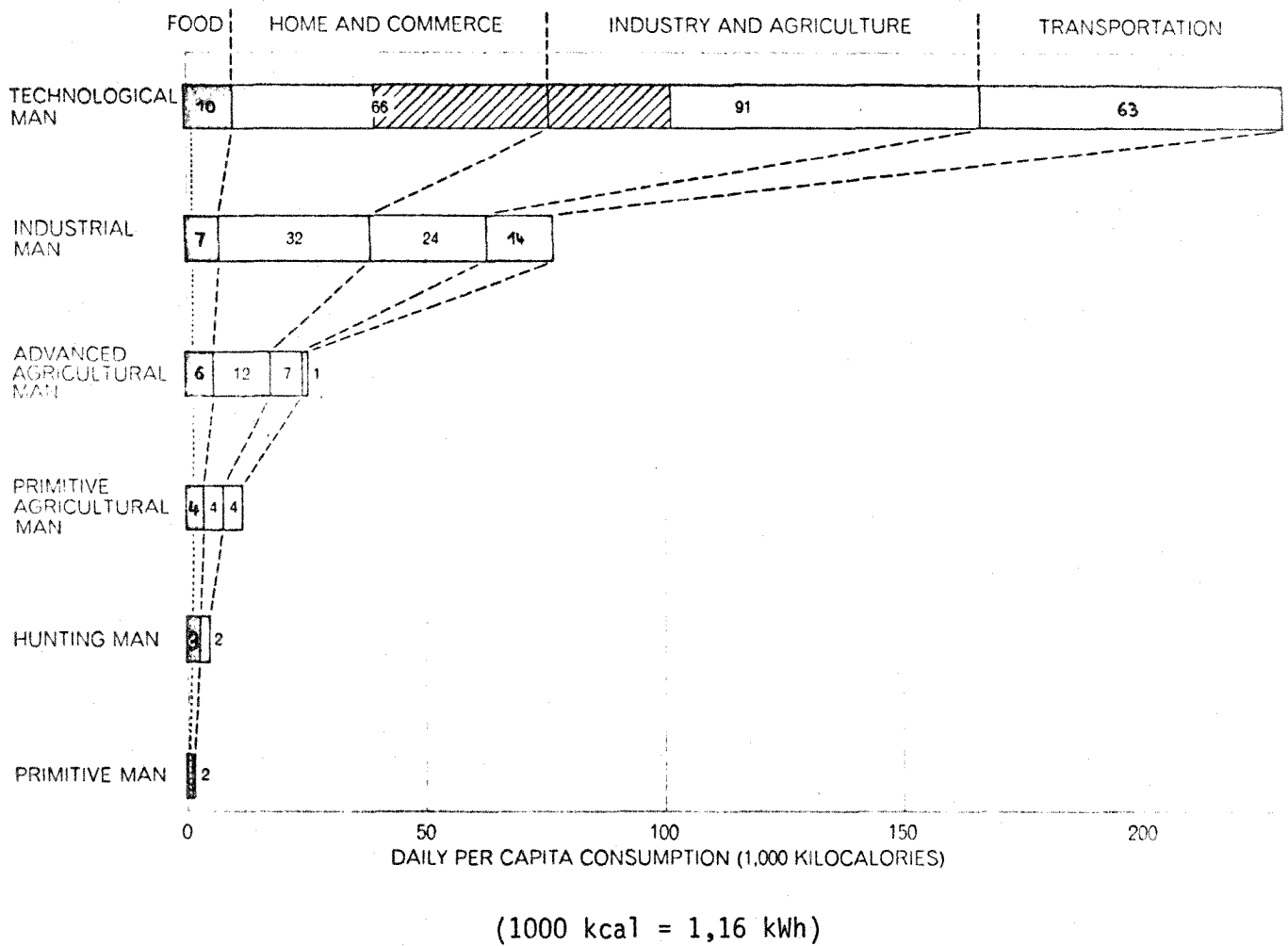


Abb. 0-1 Täglicher Energieverbrauch eines Menschen im Wandel der Zeiten (aus [3])

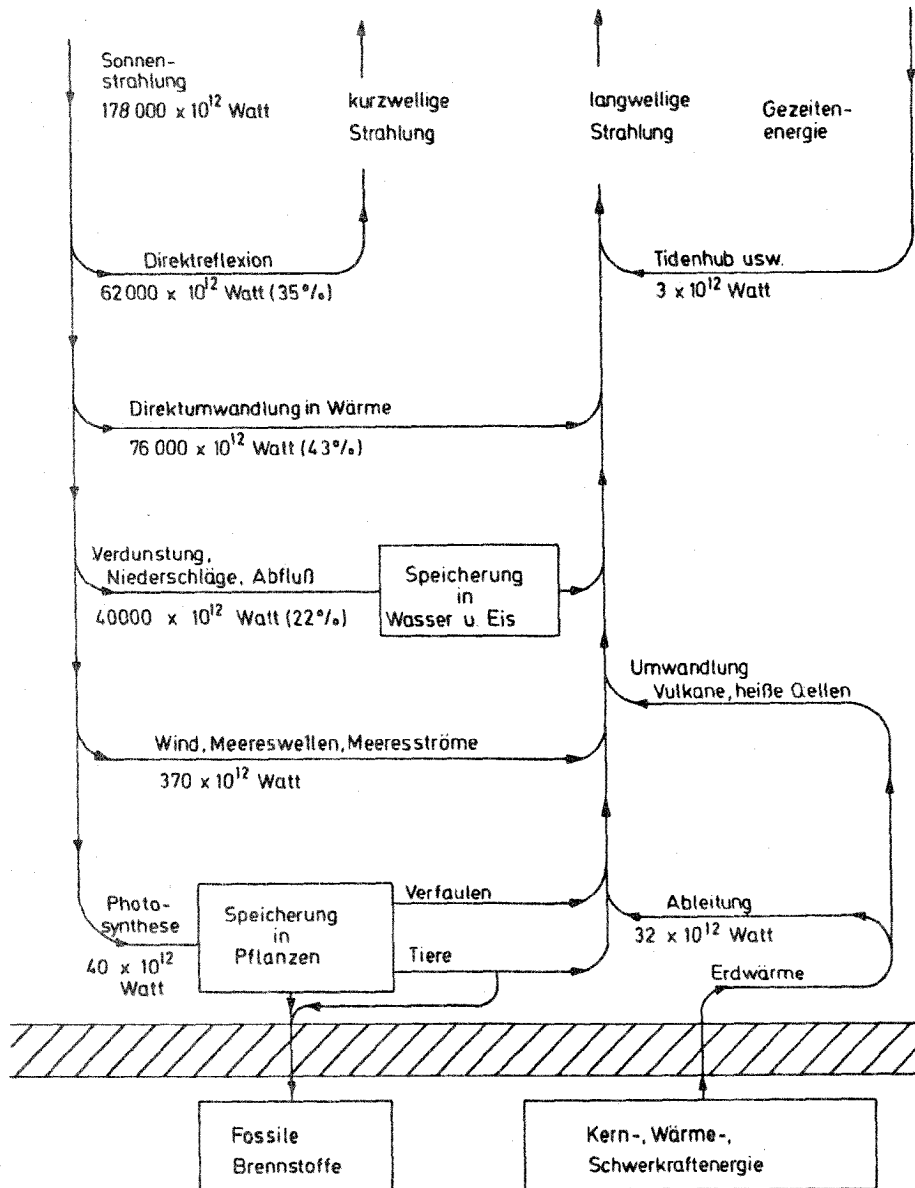


Abb. 0-2 Energieflußdiagramm für die Erde (nach [3])

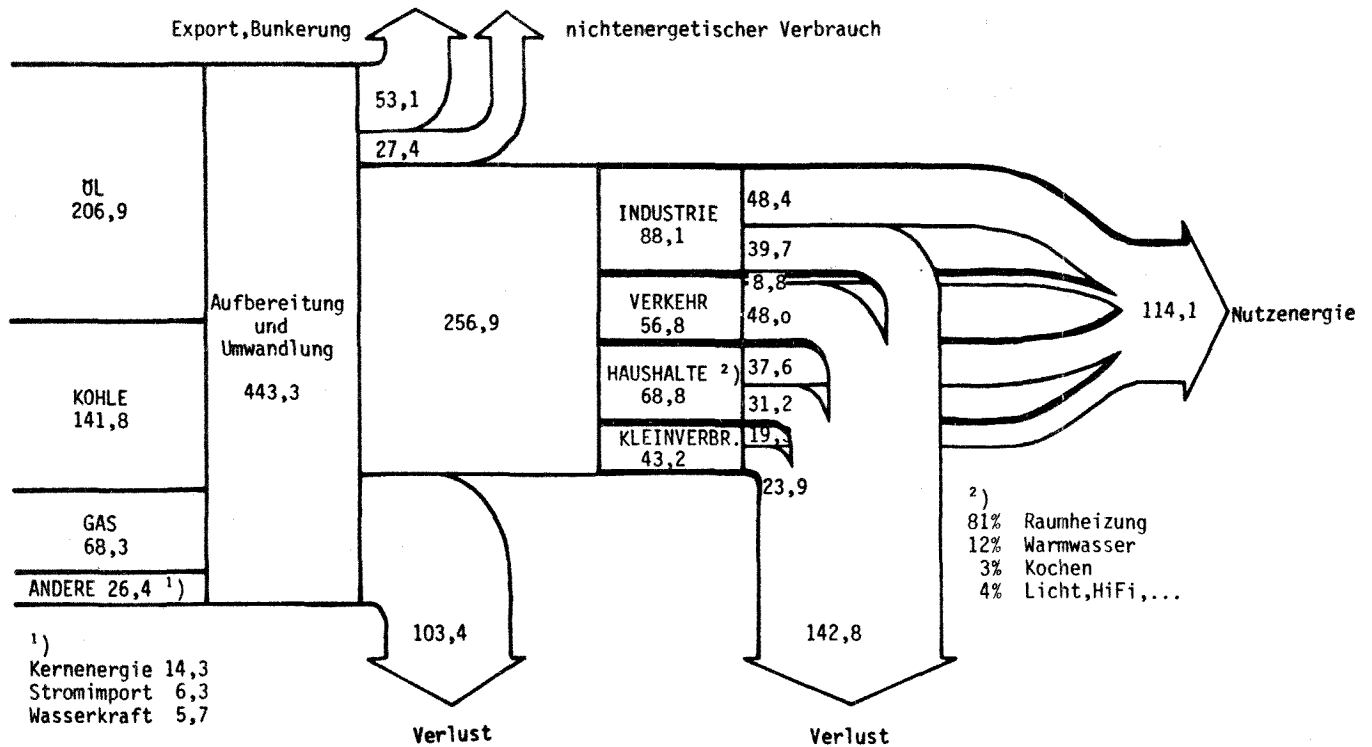


Abb. 0-3 Energieflußdiagramm für die Bundesrepublik Deutschland (1980)
Energieeinheit: 1 Mio t SKE (=8130 Mio kWh) (nach [4])

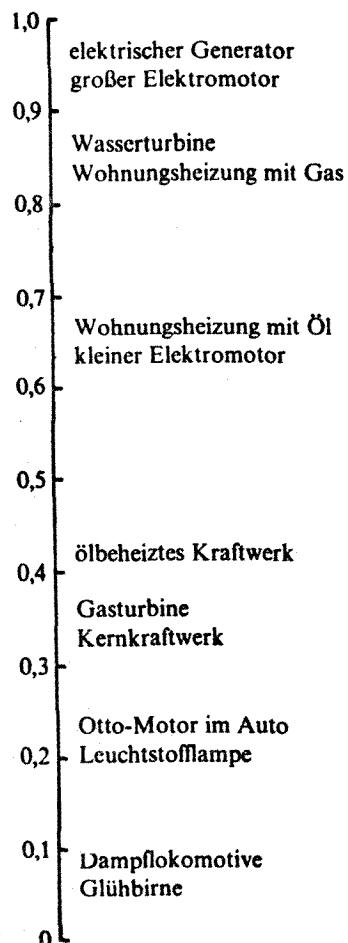


Abb. 0-4 Wirkungsgrade verschiedener Maschinen

Zur Geschichte und Systematik von Windrädern

Während Schiffe schon im 4. Jahrhundert v. Chr. mit Segeln den Nil befuhren, kann die erste Windmühle erst um 950 n. Chr. im persisch-afghanischen Grenzgebiet nachgewiesen werden (Abb. 0-5). Sie besaß eine senkrechte Welle und arbeitete - ähnlich einem unterschlächtigen Wasserrad - nach dem Widerstandsprinzip (siehe Kap. 2).

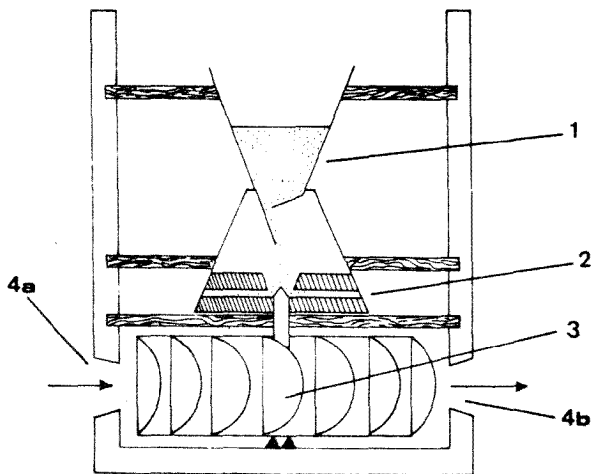


Abb. 0-5 (aus [8])
Schematische Darstellung einer Horizontalmühle aus Seistan nach einer Zeichnung von al-Dimashqi

- 1 Mahltrichter
- 2 Mahlgang
- 3 Windrad
- 4a Lufteintrittsöffnung
- 4b Luftaustrittsöffnung



Abb. 0-6 Horizontalmühle in Afghanistan (aus [8])

In Europa finden sich die ersten Windmühlen um 1180 in der Normandie. Sie hatten eine horizontale Welle und glichen damit schon eher unser heutigen Vorstellung von einer Windmühle. In den folgenden Jahrhunderten wurde eine Reihe von Verbesserungen eingeführt. So wurde bei der Bockwindmühle (Abb. 0-7) das Mühlenhaus auf einen Bock gelagert und konnte nun vom Müller in den Wind gedreht werden. Später entstanden Konstruktionen, bei denen nur noch der Turmkopf gedreht wurde, bald durch ein zusätzliches Steuerrad sogar automatisch (Abb. 0-8). Dauerhafte Getriebe reibungsarme Lager, Bremsen und andere Kontrollmechanismen für die gewaltigen Beanspruchungen wurden entwickelt. Der Stärke des Windes entsprechend, wurde das auf dem Lattengerüst des Flügels befestigte Segel vom Müller dabei mehr oder weniger entfaltet.

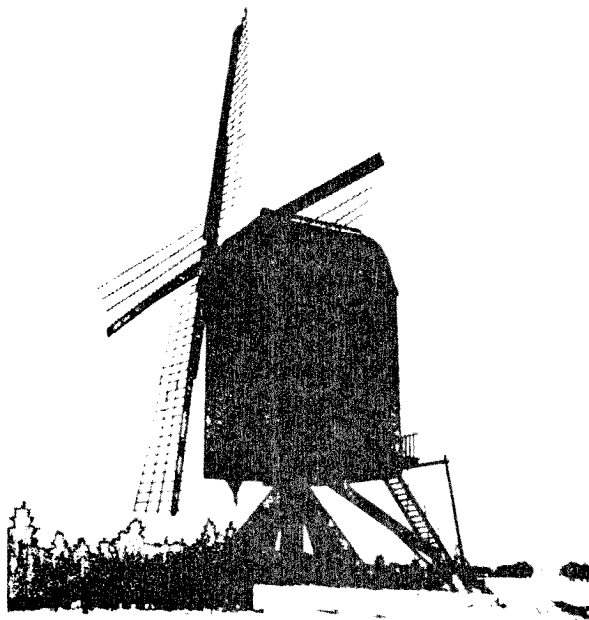
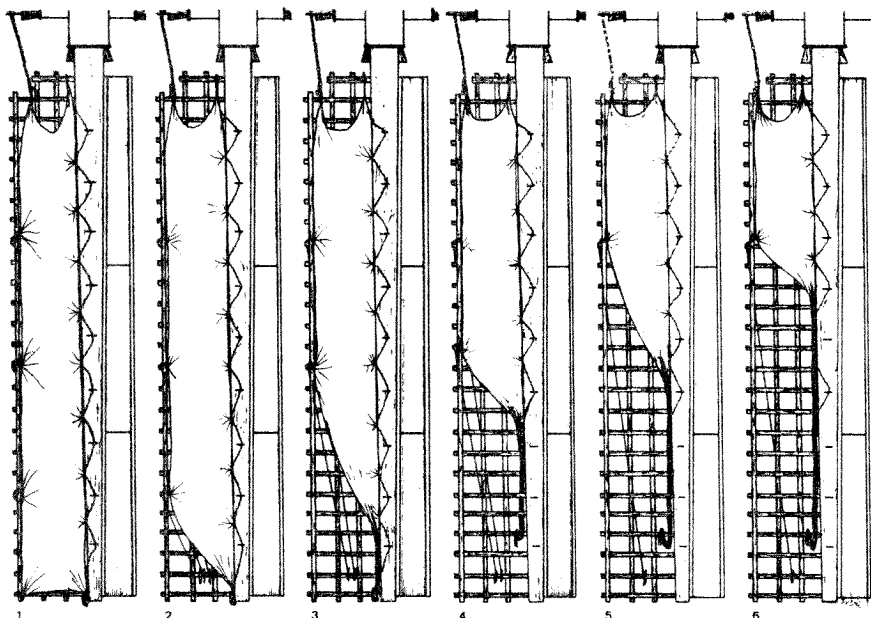


Abb. 0-7 Bockwindmühle im Rheinland (aus [8])



Abb. 0-8 Galeriemühle in Hamburg-Wilhelmsburg (aus [8])

Mahlten Mühlen anfangs hauptsächlich Korn, gab es auch Holzsäge-, Öl-, Farb- und Papiermühlen. Besonders in den Niederlanden wurden Windmühlen zur Landentwässerung eingesetzt. Umgekehrt sorgten im Amerika des 19. Jahrhunderts Hunderttausende von vielflügligen Windrädern für die Bewässerung und damit Fruchtbarmachung der riesigen Prärien.



Der Segelgattertypus

Je nach Heftigkeit des Windes hat der Müller die Möglichkeit, die Segel entweder ganz oder nur teilweise zu entfalten. In den Niederlanden, wo sich eine regelrechte Windmühlensprache entwickelt hat, unterscheidet man acht Möglichkeiten. Darüber hinaus werden mitunter je zwei Flügel mehr und zwei Flügel weniger bespannt. In Holland gibt es für jeden Grad der Besegelung einen Fachausdruck.

- 1 "met volle zeilen" (=mit vollen Segeln=)
- 2 "duikertje"
- 3 "lange halve" (=lange halbe= Segel)
- 4 "halve" (=halbe= Segel)
- 5 "hogelijn"
- 6 "stormeindje"
- 7 "met blote benen malen" (=mit bloßen Knochen mahlen=), bei heftigem Sturm, ohne Segel
- 8 "malen met geknipte nagels" (=mit geschnittenen Nägeln mahlen=), bei extremem Sturm, ohne Segel und ohne Windbretter, dies kommt natürlich recht selten vor.

Abb. 0-9 (aus [8])

Die physikalische Beschreibung der Vorgänge am Mühlenflügel sollte erst spät erfolgen. Denn erst am Anfang unseres Jahrhunderts hatte ein Ludwig Prandtl grundlegende Ideen, mit denen eine befriedigende Strömungslehre begründet werden konnte (Also zur gleichen Zeit, als die Quantenphysik geboren wurde!). Mit den gewonnenen Erkenntnissen konnte auch der Wirkungsgrad der Mühlen entscheidend verbessert werden, doch hatte nach der Dampfmaschine jetzt die Dieselmachine der Windmühle den Garaus gemacht. Gab es 1882 in Deutschland noch rund 19900 Windmühlen, war ihre Zahl 1925 auf 8170 gesunken. Denn abgesehen von dem schwankenden Energieangebot erfordert eine Windmühle einen allgegenwärtigen Müller, der die Mühle durch entsprechende Regelung z.B. vor einem "Durchdrehen" bewahrt.

Vereinzelt wurde zwar noch mit Windenergie experimentiert, aber als das Öl schließlich zu Spottpreisen zu haben war, erlahmte das Interesse. So gab es während des Krieges in Deutschland eine Arbeitsgruppe, die sich mit der Energieversorgung durch Windkraft beschäftigte (Honnef) und in den fünfziger und sechziger Jahren hatte Hütter ein Lehrauftrag zur Untersuchung von 100 kW-Anlagen. In Amerika wurde Anfang der vierziger Jahre die große Smith-Putnam Anlage (1 MW) errichtet. Nachdem ein Flügel durch einen Materialfehler gebrochen war, wurde sie wegen des Materialmangels im Kriege schließlich abgebaut.

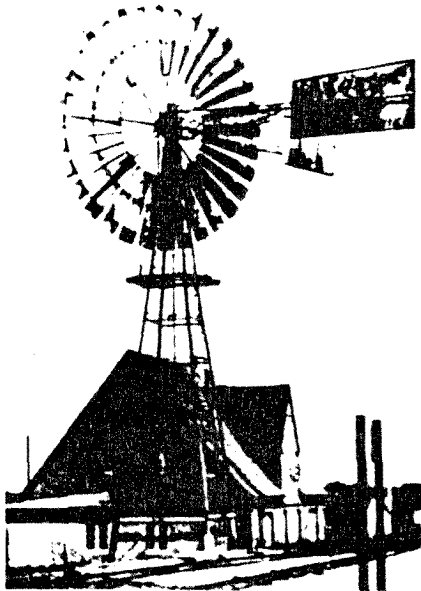


Abb. 0-10 Amerikanischer Langsamläufer (aus [14])



Abb. 0-11 Smith-Putnam Windkraftwerk in Vermont (aus [7])

Seit dem Ölpreisschock 73/74 wuchs das Interesse am Wind wieder. Besonders die USA, Skandinavien und Deutschland taten sich mit Großprojekten hervor. Neben der Regelung, die zum Beispiel ein Anwendungsfeld für Mikroprozessoren bietet, sind es hauptsächlich Festigkeitsprobleme, die bei den jedem Wind und Wetter ausgesetzten Bauten auftreten. Denn gerade periodische Belastungen stellen hohe Anforderungen an das Material. Hier gilt es, kostengünstige und stabile Konstruktionen zu finden.

Die geläufigsten Ausführungen von Windrädern zeigt Abb. 0-12. Dabei gilt die Faustregel: Je weniger Flügel ein Windrad besitzt, desto schneller muß es sich drehen!

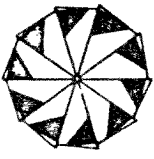
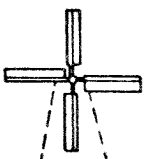
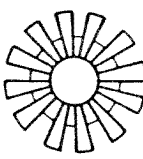
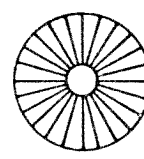
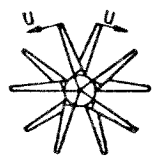
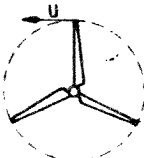
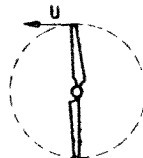
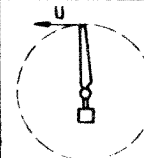
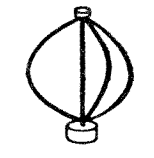
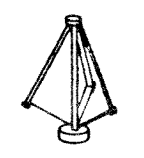
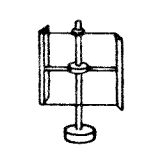
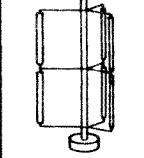
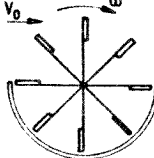
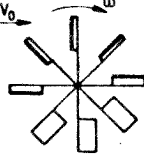
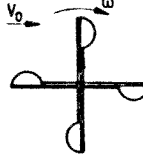
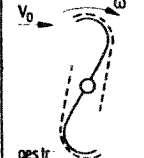
Auftrieb nutzend Achse horizontal				
	Griech. Segel- windmühle	La Cour- Windmühle	Amerikan. Wind- turbine	Bicycle - Typ
				
	2 x 5 Blatt - Rotor	3-Blatt - Rotor	2-Blatt - Rotor	1-Blatt - Rotor
Auftrieb nutzend Achse vertikal				
	3-Blatt Darrieus	Δ - Darrieus	H - Darrieus	Giromill
Widerstand nutzend Achse horizontal oder vertikal				
	Halb abgeschirmt	Flächen umklappend	Schalenkreuz	gestr. geleitete Ausführung

Abb. 0-12 Ausführungen von Windrädern nach dem Auftriebs- und dem Widerstandsprinzip (aus [23])

Überblick über das Vorgehen

Wir werden uns im Praktikum mit dem physikalisch technischen Aspekt der Windenergienutzung beschäftigen. Abb. 0-13 zeigt dazu eine schematische Übersicht der wichtigsten Zusammenhänge. Daraus resultiert im wesentlichen auch unser Vorgehen - den Bezeichnungen in den gekennzeichneten Kästchen entsprechen Kapitel.

Da es ohne Wind keine Windkraftanlagen geben könnte, sollte eine Beschäftigung über sein Entstehen und Verhalten am Anfang stehen. Dazu dient im bescheidenen Maße das 1. Kapitel "Der Wind".

Während die "Grundgleichungen der Strömungsphysik" aus der Physik I-Vorlesung bekannt sein sollten, müssen wir uns mit den Vorgängen an umströmten Körpern noch etwas beschäftigen. Um zu erfahren, wieso sich eine Windmühle bei Wind überhaupt dreht, gibt es das 2. Kapitel "Ein Hauch von Aerodynamik".

Im 3. Kapitel "Betrachtungen des Energieflusses" machen wir uns Gedanken darüber, ob man überhaupt die Energie des Windes voll ausnutzen kann. Hieraus ergeben sich bestimmte Forderungen an das Windrad, die wir mit unseren aerodynamischen Kenntnissen zu erfüllen versuchen müssen. Dieses geschieht im 4. Kapitel "Rotorblattberechnung".

Wie verhält sich ein Windrad, wenn die Windgeschwindigkeit eine andere ist, als wir bei unseren Berechnungen angenommen haben? Von diesem wichtigen Verhalten handelt das 5. Kapitel "Verhalten außerhalb des Entwurfbereiches".

Welche Dienstleistung soll bzw. kann uns der Wind erbringen? Diese Frage soll zum geringen Teil im 6. Kapitel "Die weitere Energieumformung" beantwortet werden, wo wir uns mit der physikalischen Seite der Frage kurz beschäftigen

Nicht eingehen werden wir auf Dinge, die mit der Beanspruchung der Anlagenteile zu tun haben, wie etwa aerolastische Probleme (Blatt-, Turmschwingungen etc.). Gerade dieses sind jedoch die heutigen Probleme beim Bau solcher Anlagen. Der Anhang ist zum Stöbern gedacht. Man kann hier z.B. seine Kenntnisse über die Bernoulli-Gleichung auffrischen oder sich in einige, im Text nur angeschnittene Fragen weiter vertiefen. Auch finden sich hier Daten über gebaute oder projektierte Windkraftanlagen. Der Anhang soll laufend ergänzt werden.

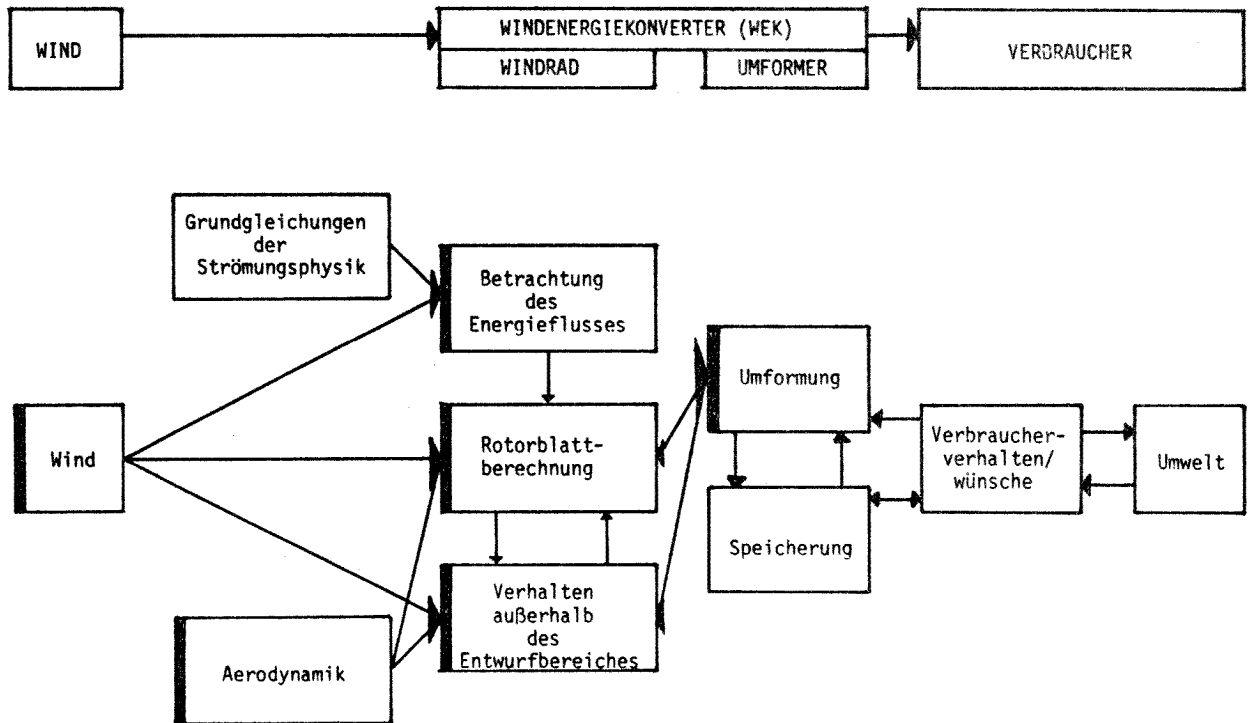


Abb. 0-13 Übersicht

1. DER WIND

1.1 Entstehen des Windes

1.2 Eigenschaften des Windes

- a) Energieinhalt
- b) Die örtliche Geschwindigkeitsverteilung
- c) Die zeitliche Geschwindigkeitsverteilung

1.1 Entstehen des Windes

Unsere Erde ist von einer mehrere Kilometer dicken Lufthülle umgeben. Durch die Sonnenstrahlung wird die Erdoberfläche an verschiedenen Stellen unterschiedlich stark erwärmt - im wesentlichen bedingt durch die Oberflächenbeschaffenheit und den Einfallswinkel der Strahlung. Es entstehen Temperaturunterschiede in den bodennahen Luftschichten, was zu Ausgleichsbewegungen der Luft führt. An den wärmeren Stellen dehnt sich die Luft aus, steigt in die Höhe und es strömt kühlere Luft von den Seiten nach (Abb. 1-1). Global ist dieser Vorgang zwischen dem Äquator und den Polen zu beobachten, lokal etwa zwischen größeren Wasserflächen und Land. Diese Bewegungen der Luft werden noch durch die Corioliskraft und die (Boden-) Reibungskraft wesentlich beeinflusst. Bewegte Luft nennt man Wind.

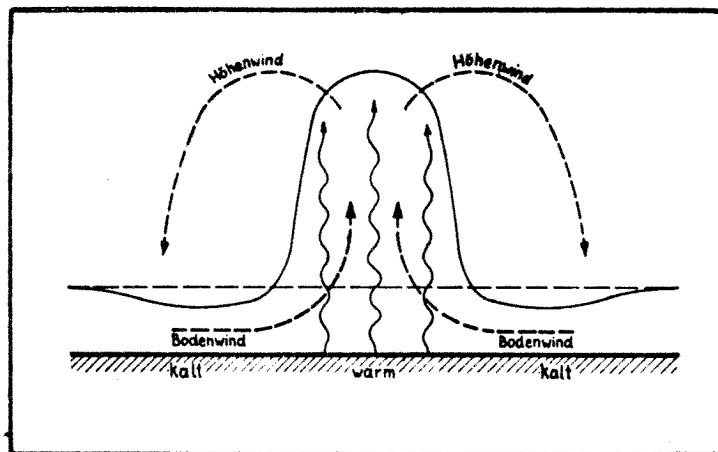


Abb. 1-1 Temperaturunterschiede führen zum Aufsteigen der Luft

Uns soll aber für die Windnutzung an dieser Stelle nicht so sehr das Entstehen des Windes beschäftigen. Stattdessen wollen wir uns mit einigen seiner Eigenschaften befassen.

1.2 Eigenschaften des Windes

a) Energieinhalt

Unser Interesse am Wind gilt der Nutzung seiner kinetischen Energie. Aus Langzeitmessungen von Boden- und Höhenwinden sowie aus der Zuggeschwindigkeit von Wetterfronten kann man die Größe der in den Luftströmen enthaltenen Bewegungsenergie abschätzen. Verschiedene Autoren geben einen Anteil zwischen 0,1 % und 2,5 % von der eingestrahlten Sonnenenergie an, der in Wind umgesetzt wird (vergl. auch Abb. 0-2). Bei einer jährlichen Einstrahlung von rund $1,5 \cdot 10^{18}$ kWh sind dies 0,15-3,8 10^{16} kWh/a. Technisch nutzbar ist natürlich nur ein geringer Teil davon. Meiß | 9 | gibt als maximalen Anteil für Europa die folgenden Werte an.

L a n d	verbrauchte elektrische Energie, 1973 TWh	theo.-tech. nutzbare Windenergie TWh	Fläche des Landes km ²
Großbritannien	280	1800	219.805
Frankreich	182	1100	551.603
Irland	7,3	600	84.426
Schweden	77,3	500	449.793
Spanien	75,7	500	504.748
Norwegen	72,6	400	324.219
Italien	145	400	301.225
Bundesrepublik Deutschland	299	220	248.459
Niederlande	52,8	200	36.153
Dänemark	19,2	200	43.032
Portugal	9,7	200	91.971
Belgien	41,1	70	30.507
Summe:	1.261,7	6190	2.885.941

Abb. 1-2 Windenergiepotentiale Europas (T = Tera = 10^{12} = 10^9 k) (aus [9])

Doch rechnen wir statt mit diesen noch viel Willkür enthaltenen Angaben in etwas übersichtlicheren Größenordnungen. Homogene und stationäre Strömung vorausgesetzt, errechnet sich der Energiefluß ("Leistung") durch eine Fläche A bei einer Windgeschwindigkeit v durch

$$\dot{E} = \frac{\dot{m}}{2} v^2 = \frac{\rho \cdot A \cdot v}{2} v^2 = \frac{\rho}{2} A v^3 \quad (1.1)$$

ρ ist dabei die Dichte der Luft, die bei 15 °C und 1000 mb die Größe $1,22 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ hat. Bei einer Windgeschwindigkeit von $4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ kommt man auf $39 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, bei $8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ schon auf $312 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ (zum Vergleich: Die Strahlungsintensität der Sonne beträgt in Deutschland bei Sonnenschein 800 - 1000 $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, im Jahresmittel $130 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$). Wie wir aber im 3. Kapitel sehen werden, können aus prinzipiellen Gründen maximal nur $\approx 50\%$ der Windenergie in Nutzenergie umgewandelt werden. In der Praxis ist sogar schon 30% ein guter Wert.

Überschlagsmäßig kann man jetzt den Jahresenergieertrag eines Windrades vom Radius $R = 5$ m berechnen.

Für unsere Rechnung benutzen wir das leistungsbezogene Mittel der Windgeschwindigkeit $(\bar{v}^3)^{1/3}$, welches über dem normalen Mittelwert \bar{v} eines Ortes liegt. Denn da die Windgeschwindigkeit im Laufe eines Jahres erheblich schwankt, tut dies auch die Leistung. Diese ist aber proportional zu v^3 , so daß die Windgeschwindigkeiten, die größer als \bar{v} sind, einer größeren Leistungsdifferenz entsprechen, als diejenigen, die gleich viel unter \bar{v} liegen.

Das leistungsbezogene Mittel betrage $5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ($3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$). Bei einer Ausnutzung der Windenergie von 30% entspricht dies im Jahr einer Energie von rund 16 000 kWh (3 400 kWh). Der Nutzenergiebedarf der Haushalte beträgt heute pro Person 6 200 kWh/a (Heizung und elektr. Geräte | 2 |), wobei hier noch ein hohes Einsparpotential vorhanden ist.

Wenn auch die Windenergie gesamtwirtschaftlich keine große Rolle spielen wird, ist der Einsatz in windreichen Gebieten - auch für Privatpersonen - durchaus lohnenswert. Hier ist im Verbund mit energiesparender Architektur eine autarke Versorgung einzelner Häuser und Gebiete sicherlich möglich.

b) Die örtliche Geschwindigkeitsverteilung

Betrachten wir zunächst die horizontale Windgeschwindigkeitsverteilung. Die über dem glatten Meer herrschende hohe Windgeschwindigkeit nimmt über den rauhen Landpartien rasch ab. Die Windverhältnisse der Erde, Europas und der Bundesrepublik sind aus den Abb. 1-3 bis 1-6 zu ersehen. Die angegebenen Jahresmittel werden in einer Höhe von 10 m über dem Boden gemessen bzw. darauf umgerechnet.

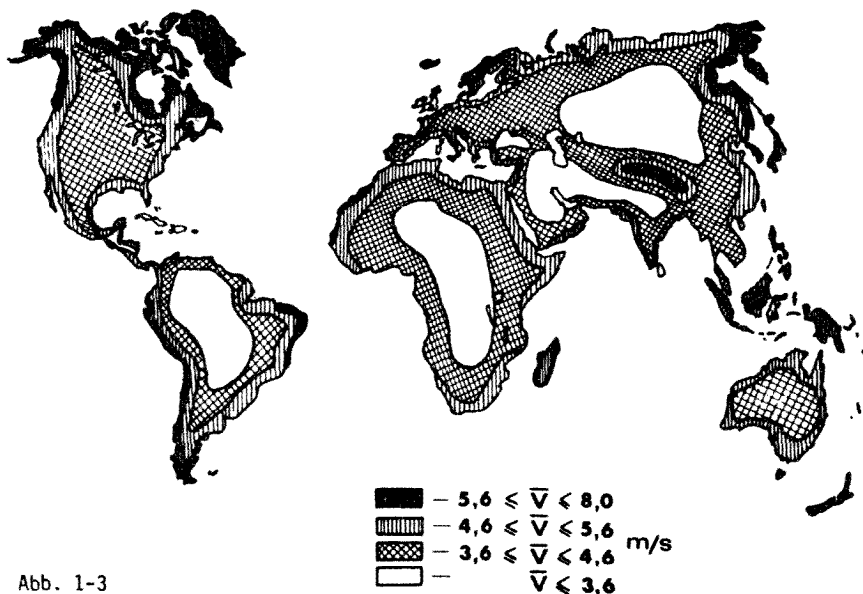


Abb. 1-3
Windgeschwindigkeitszonen
auf den Kontinenten (aus [14])



Abb. 1-4 Isoventen ("Linien gleicher mittlerer Windgeschwindigkeiten") in Europa (aus [14])

Durch die Hauptwetterzugrichtung in Europa von West nach Ost sind besonders die Westküsten zur Windenergienutzung geeignet. In der Bundesrepublik ist dies der relativ kleine Teil der Nordseeküste. Hier standen denn auch schon früher die meisten Windmühlen.

Abb. 1-5 Windgeschwindigkeitszonen mit mehr als 4 m/s Jahresmittel (aus [14])

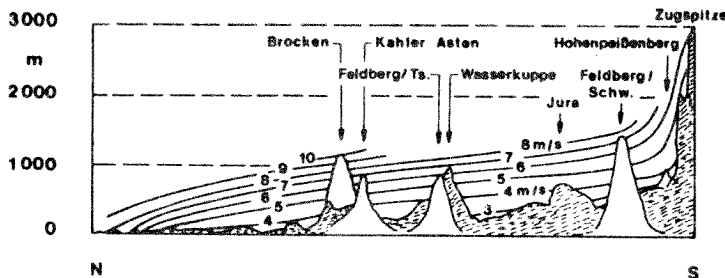
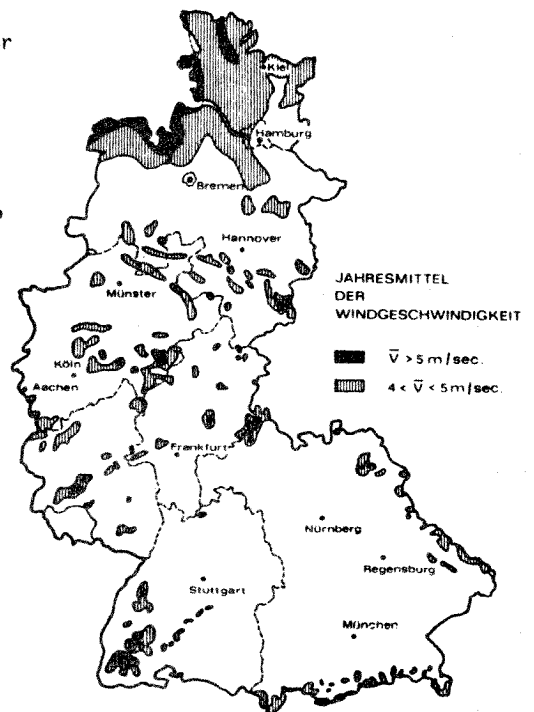


Abb. 1-6 Isoventenverlauf über einem Nord-Süd Querschnitt Deutschlands (aus [14])



Eine Vorstellung über die Windgeschwindigkeiten gibt die bekannte Beaufort-Skala (Abb. 1-7).

Windstärke Beaufort	Windgeschwindigkeit			Wirkung
	m/sec	km/h	Knoten	
0 still	0-0,2	0-1	0-1	Rauch steht senkrecht
1 sehr leicht	0,3-1,5	1-5	1-3	Rauch steht schräg
2 leicht	1,6-3,3	6-11	4-7	Luftzug eben fühlbar
3 schwach	3,4-5,4	12-19	8-11	Blattbewegung an Bäumen
4 mäßig	5,5-7,9	20-28	12-15	Zweigbewegung an Bäumen
5 frisch	8-10,7	29-38	16-21	Astbewegung an Bäumen
6 stark	10,8-13,8	39-49	22-27	Heulen des Windes
7 steif	13,9-17,1	50-61	28-33	Baumbewegung, wirft auf stehendem Wasser überstürzende Wellen auf
8 stürmisch	17,2-20,7	62-74	34-40	stürmisch, Stämme biegen sich, erschwert das Gehen
9 Sturm	20,8 24,4	75-88	41-47	Sturm, Dachziegel fallen
10 schwerer Sturm	24,5-28,4	89-102	48-55	voller Sturm, wirft Bäume um
11 orkanartiger Sturm	28,5-32,6	103-117	56-63	schwerer Sturm, zerstörende Wirkung schwerer Art, Dächer fliegen
12 Orkan	32,7-36,9	118-133	64-71	Orkan, Mauern stürzen ein, allgemeine Verwüstungen

Abb. 1-7
Windstärkenskala nach Beaufort

In der vertikalen Richtung ergibt sich folgendes Bild:

Bei einer stabilen thermischen Schichtung der Luft wird die Windgeschwindigkeit mit der Höhe zunehmen, da der Einfluß der Reibung geringer wird. Ab etwa 1000 m Höhe läßt sich der Wind aus dem horizontalen Druckgradienten und der Corioliskraft allein berechnen ("geostrophischer Wind").

Die quantitative Beschreibung des Reibungseinflusses ist sehr schwer. Um trotzdem eine gewisse Vorstellung zu erhalten, kann man den Profilansatz von Hellmann benutzen. Ist die Windgeschwindigkeit v_{10} in 10 m Höhe bekannt (internationale Referenzhöhe), errechnet er die Geschwindigkeit in der Höhe h durch

$$v_h = v_{10} \left(\frac{h}{10}\right)^a \quad (1.2)$$

Der Exponent a hängt von der thermischen Schichtung und der Bodenrauigkeit ab. Bei stabiler Schichtung ergibt sich a wie folgt:

Beschreibung des Geländes	Exponent a	Widerstandsbeiwert der Oberfläche k
A Offenes Gelände mit wenigen und niedrigen Hindernissen. Z. B. flaches Gras- und Ackerland mit nur wenigen Bäumen, Prärien, Küsten, flache Inseln inländischer Seen, Wüsten	0,16	0,005
B Gelände mit gleichförmig gestreuten Hindernissen von 10 bis 15 m Höhe. Z. B. Wohnsiedlungen, kleine Städte, Wälder, Gebüsch, kleine Felder mit Büschen, Bäumen und Hecken.	0,28	0,015
C Gelände mit großen und ungleichmäßig gestreuten Hindernissen. Z. B. die Zentren der großen Städte, stark unebenes Gelände mit vielen hohen Hindernissen, wie Bäume etc.	0,40	0,050

(aus [14])

Offensichtlich ist ein hoch aufgestelltes Windrad viel günstiger als ein bodennahes Windrad der gleichen Größe, da die Leistung ja kubisch mit der Windgeschwindigkeit wächst. Für große Windräder wie z.B. GROWIAN bringt diese Tatsache aber auch Probleme mit sich. Wie aus Abb. 1-8 ersichtlich, kommen die Rotorblätter bei jedem Umlauf durch verschiedene Geschwindigkeitszonen. Solch eine periodische Belastung stellt natürlich hohe Festigkeitsanforderungen. Hinzu kommt, daß auch die Richtung des Windes mit zunehmender Höhe wechseln kann. Besonders zu beobachten ist dieser Effekt an Tälern, Bergrücken und Flüssen, die eine stark leitende Wirkung ausüben können.

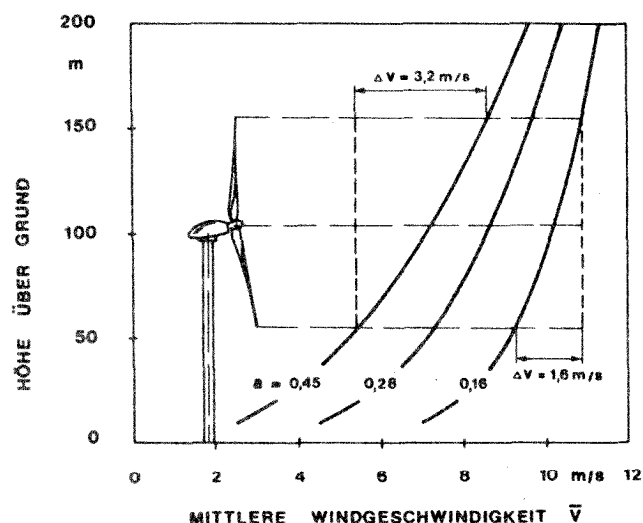


Abb. 1-8
Bodengrenzschichtverlauf bei unterschiedlicher Rauigkeit und deren Einfluß auf die Geschwindigkeitsdifferenzen an Rotoren (aus [14])

c) Die zeitliche Geschwindigkeitsverteilung

Das Jahresmittel für die Windgeschwindigkeit mag zwar einen ersten Anhaltspunkt für die Beurteilung eines Ortes geben, zur Planung eines WEKS sind aber auch Angaben über den zeitlichen Verlauf nötig.

Da der Wind von der Sonne abhängt, erwartet man auch einen sich jährlich wiederholenden Windzyklus. In der ersten Näherung stimmt diese Erwartung auch mit der Beobachtung überein. Interessant sind die folgenden Angaben

- der Jahresverlauf der Windgeschw. (Abb. 1-9)
- der Tagesverlauf ---"--- (Abb. 1-10)
- die Häufigkeitsverteilung ---"--- (Abb. 1-11)

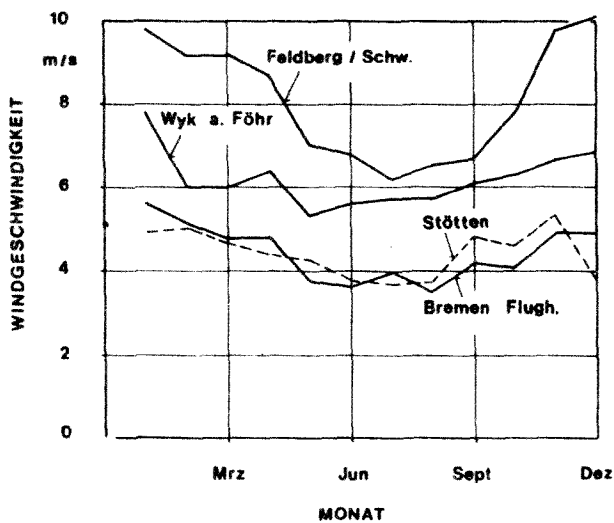


Abb. 1-9 Jahresgang der Windgeschwindigkeiten für verschiedene ausgewählte Stationen (aus [14])

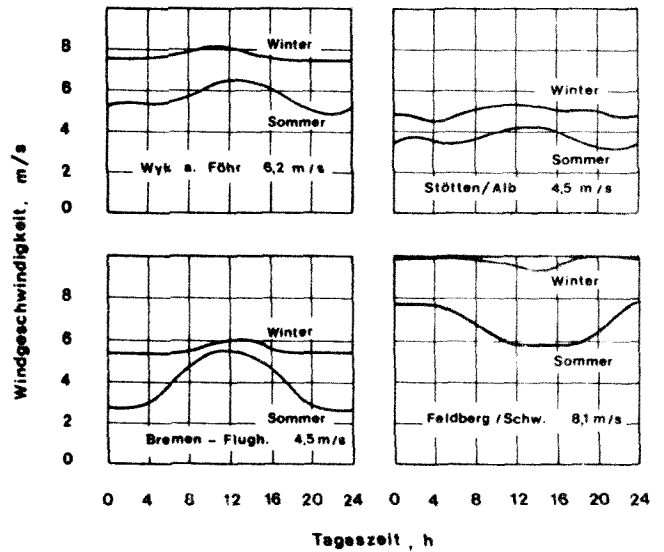


Abb. 1-10 Typischer Tagesgang der Windgeschwindigkeiten für einen Sommer- und einen Wintermonat verschiedener Stationen (aus [14])

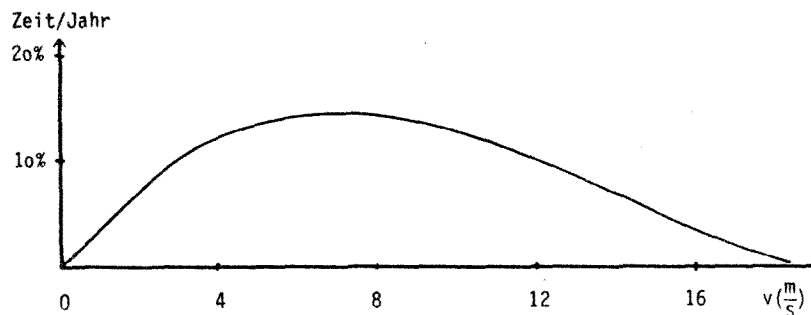


Abb. 1-11 Absolute Häufigkeit der Windgeschwindigkeiten an einem Ort

- Der Jahresverlauf der Windgeschwindigkeit läuft hier ziemlich gut mit dem Jahresbedarf an Energie zusammen, der natürlich in den Wintermonaten besonders groß ist.
- Der Tagesverlauf zeigt meist ein Maximum um die Mittagsstunden. Hier sind die durch die Sonne bewirkten thermischen Bewegungen der Luft besonders groß.
- Bei der absoluten Häufigkeitsverteilung werden die in einem Jahr gemessenen Stundenmittel in Intervalle zusammengefaßt und geordnet aufgetragen. Sie zeigt an, wieviel Prozent des Jahres mit einer bestimmten Windgeschwindigkeit zu rechnen ist.

Da, wie wir später sehen werden, ein Windrad aus konstruktionstechnischen Gründen bei verschiedenen Windgeschwindigkeiten verschiedene Wirkungsgrade hat, ist die Häufigkeitsverteilung eine sehr wichtige Angabe. Auch zur Ermittlung des Windenergieangebots ist diese Angabe sehr nützlich, da zum einen der häufigste und mittlere Wert der Windgeschwindigkeit selten zusammenfallen und zum anderen die Leistung kubisch mit der Windgeschwindigkeit wächst. Wir werden später hierauf zurückkommen.

Eine Häufigkeitsverteilung kombiniert mit der Richtungsverteilung des Windes zeigt Abb. 1-12. Auffällig sind die bei windschwachen Stationen häufig zu beobachtenden Richtungsmaxima, die um nahezu 180° versetzt sind. Die Richtungsänderung des Windes geschieht aber meist so langsam, so daß ein Nachführen der Windräder gut möglich ist.

Wichtig ist auch, wie oft mit Winden zu rechnen ist, deren Stärke unter der Anlaufgeschwindigkeit des Windrades liegt. Die Häufigkeit von Flautendauern zeigt Abb. 1-13.

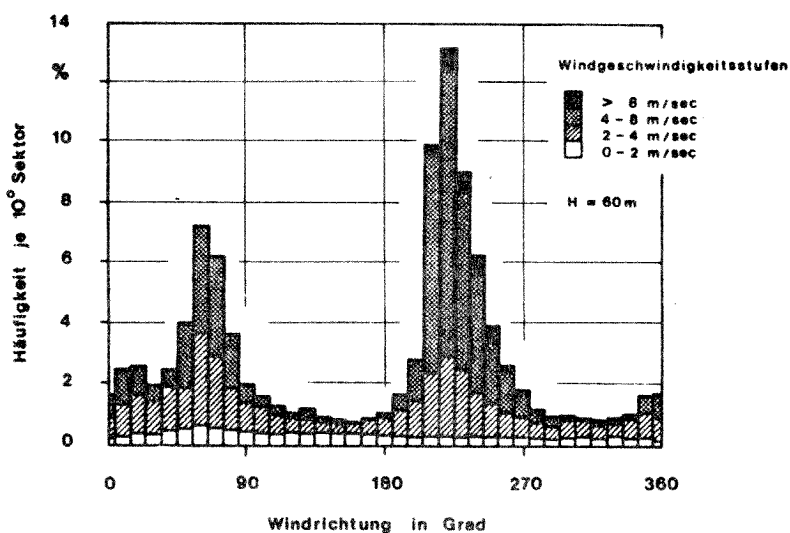


Abb. 1-12
Häufigkeiten der Windstärken für verschiedene Richtungen (aus [14])

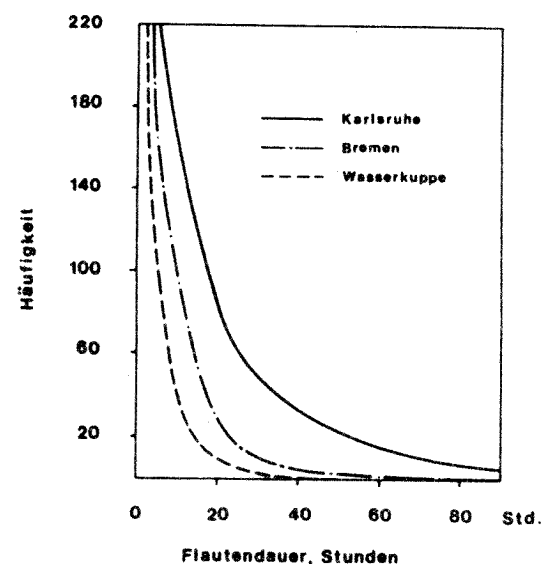


Abb. 1-13
Häufigkeiten von Flautendauern ($v < 3 \frac{m}{s}$) verschiedener Stationen (aus [14])

Um eine kleine Vorstellung über die Dauer und Stärke von Böen zu bekommen, betrachte man Abb. 1-14. Der Böenfaktor G ist dabei definiert als Quotient aus maximaler mittlerer Geschwindigkeit während der Zeit t und der mittleren Windgeschwindigkeit während der Zeit T , mit $t \ll T$:

$$G = \frac{\bar{v}_{\max}(t)}{\bar{v}(T)} \quad (1.3)$$

Eine Böe stellt einerseits starke Festigkeitsanforderungen an das Material, andererseits kann sie zum Abreißen der Strömung am Rotorblatt führen.

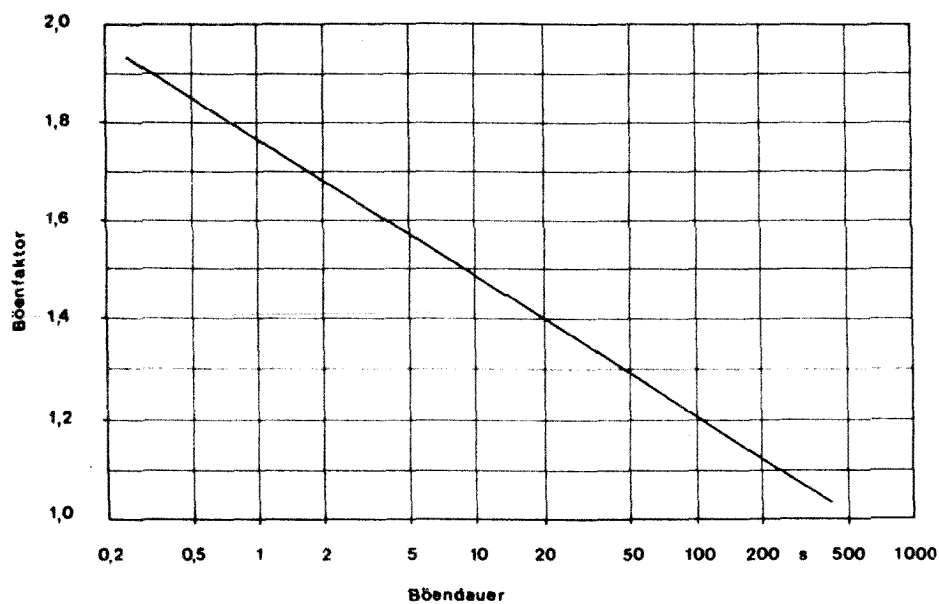


Abb. 1-14 Zusammenhang zwischen Böenstärke und Böendauer (aus [14])

Diese steckbriefartigen Angaben über den Wind sollten uns noch einmal bewußt machen, was für ein launiger Kerl der Wind ist. Dieses sollten wir bei unseren folgenden Überlegungen im Hinterkopf behalten.

2. EIN HAUCH VON AERODYNAMIK

2.1 Die Luftkraft

- a) Die Widerstandskraft
- b) Die Auftriebskraft

2.2 Profildaten

2.3 Die Reynoldszahl

2.1 Die Luftkraft

Wir sind es gewohnt, daß wir beim Gehen, Radfahren, gegen den Wind eine Widerstandskraft zu überwinden haben. Insofern dürfte auch das Prinzip der afghanischen Windmühle (Abb. 0-6) - ähnlich der alten Wassermühlen - einsichtig sein. Wieso drehen sich aber die in Achsrichtung angeströmte Bockwindmühle und ihre Nachfolger? (... und warum fliegt ein Flugzeug und wie bringt man ein Segelboot dem Verleiher zurück?)

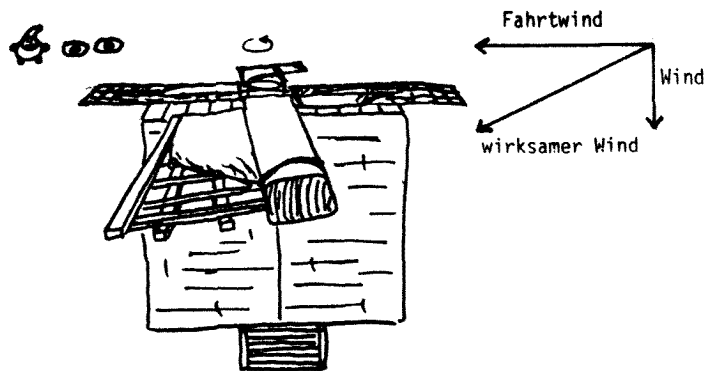


Abb. 2-1
Der Müller mit zwei Säcken
vor seiner Bockwindmühle
(aus der Vogelperspektive)

Beobachtet man Vögel, Flugzeuge oder ist einem auf der Autobahn schon mal der Campingtisch vom Dachgepäckträger geflogen, kann man auf die Idee kommen, daß ein umströmter Körper nicht nur eine Widerstandskraft erfährt, sondern auch eine Kraft senkrecht zur Strömungsrichtung. Als gewiefter Physiker wird man einen gewissen Zusammenhang zwischen Form und Fläche des Körpers, der Relativgeschwindigkeit zwischen Körper und Medium, und dieser ominösen Kraft vermuten. Außerdem wird wohl eine charakteristische Größe des umströmenden Mediums in die Größe dieser Kraft eingehen. Dieser Ansatz ist gut und eine systematische Untersuchung (z.B. in einem Windkanal) bringt in guter Näherung folgende Abhängigkeiten an den Tag:

In einer stationären Parallelströmung erfahren Körper in einem gewissen Geschwindigkeitsbereich (... bis etwa $0,5 \cdot$ Schallgeschwindigkeit) eine Kraft

$$F_L = c \frac{\rho}{2} A w^2 \quad (2.1)$$

Dabei bedeuten:

- c : ein von der Form des Körpers und dem Anströmwinkel abhängiger Prop.faktor
- ρ : Dichte des umströmenden Mediums (z.B. Luft)
- A : willkürlich gewählte Bezugsfläche des Körpers
- w : Geschwindigkeit der Strömung relativ zum Körper

Für die Richtungsbetrachtung der "Luftkraft" wählt man sich ein rechtwinkliges Koordinatensystem mit Achsen parallel und senkrecht zur Strömungsrichtung. Die Luftkraft wird dadurch in zwei Komponenten zerlegt:

- die Widerstandskraft

$$F_W = c_w \frac{\rho}{2} A w^2 \quad (2.2)$$

parallel zur Strömungsrichtung

- die Querkraft oder Auftriebskraft

$$F_A = c_a \frac{\rho}{2} A w^2 \quad (2.3)$$

senkrecht zur Strömungsrichtung.

(zur Unterscheidung von der statischen Auftriebskraft (Gasballon)

wird F_A auch "dynamische Auftriebskraft" genannt)

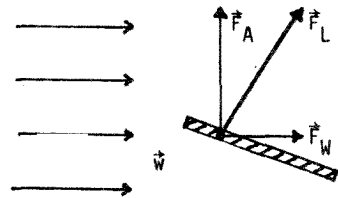


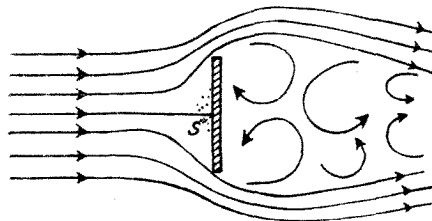
Abb. 2-1a Die Zerlegung der Luftkraft in Widerstandskraft und Auftriebskraft

c_w heißt Widerstandsbeiwert, c_a Auftriebsbeiwert. Als Bezugsfläche A wählt man bei "Widerstandskörpern" ($c_w \gg c_a$) die Stirnfläche, bei "Auftriebskörpern" die Grundfläche des Körpers. Worauf lassen sich aber diese Kräfte zurückführen?

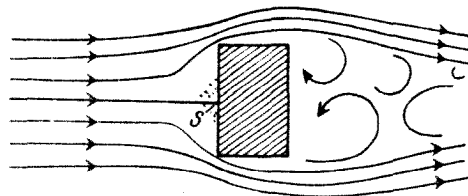
a) Die Widerstandskraft

Behandeln wir zuerst den Fall, in dem nur die Widerstandskraft wirkt und betrachten dazu die Strömungsbilder einiger Widerstandskörper (Abb. 2-2).

- a) *Ebene Platte.*
($c_w = 1,11$)



- b) *Prisma.*
($c_w = 0,91$)



- c) *Von der Hohlseite angeströmte halbe Hohlkugel.*
($c_w = 1,33$)

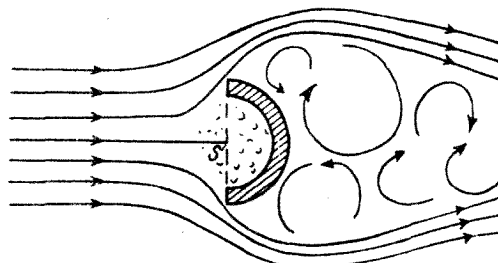
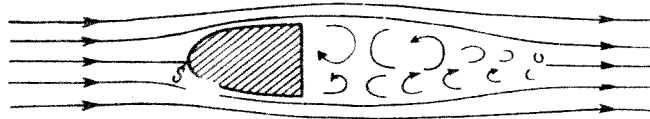
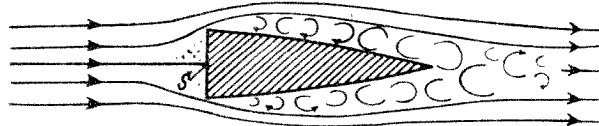


Abb. 2-2 a) bis g)
Strömungsfelder von Widerstandskörpern (aus [10])

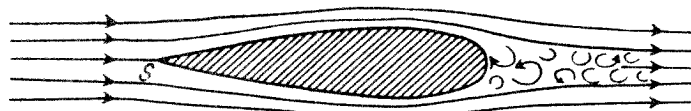
- d) *Abgerundetes Nasenstück eines windschnittigen Körpers.*
($c_w = 0,31$)



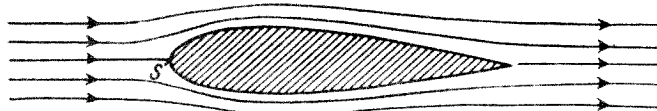
- e) *Heckstück eines windschnittigen Körpers.*
($c_w = 0,58$)



- f) *Von hinten angeströmter windschnittiger Körper.*
($c_w = 0,17$)



- g) *Windschnittiger Körper von vorne angeströmt.*
($c_w = 0,083$)



Die Strömungsbilder deuten an, daß für den Strömungswiderstand im wesentlichen die Form des angeströmten Körpers maßgeblich ist. Die sich ausbildenden Wirbel nehmen einen gewissen Teil der Strömungsenergie auf und führen zu einer unsymmetrischen Druckverteilung um den Körper. Aus dieser Druckverteilung resultiert im wesentlichen die Widerstandskraft F_W . Man spricht deshalb auch vom Druck- oder Wirbelwiderstand.

Daß die Wirbel überhaupt entstehen können, hängt letztendlich natürlich von der inneren Reibung ab (und damit von der Zähigkeit des Mediums). Wir wollen jedoch in diese diffizile Theorie hier nicht weiter einsteigen und uns lieber mit der Auftriebskraft beschäftigen (die wir auch wieder der Reibung zu verdanken haben).

b) Die Auftriebskraft

Wir nehmen uns einen Auftriebskörper, also etwa einen Tragflügel vor. Er habe eine sehr große Spannweite, so daß der Randeinfluß vernachlässigt und die Strömung in ebenen Schnitten betrachtet werden kann.

Aus der Ruhe setzen wir den Tragflügel in Bewegung. Die Strömung teilt sich am vorderen Staupunkt P (Abb. 2-3), umströmt die Ober- und Unterseite und vereinigt sich wieder im Punkte P'. Da aber der Weg über die Oberseite länger ist als über die Unterseite, ist die Geschwindigkeit der oberen Strömung in P' aufgrund der Reibung kleiner als die Geschwindigkeit der unteren Strömung. Nach Bernoulli treffen also im Punkte P' zwei Strömungen mit verschiedenen Drücken aneinander. Schon die kleinste Störung in dieser Grenzfläche verstärkt sich aber sofort und es bildet sich ein Wirbel (vergl. Abb. 2-4).

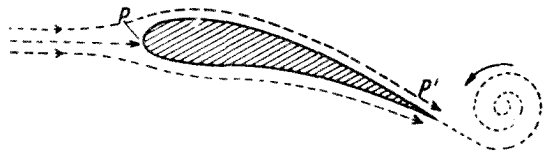


Abb. 2-3
Bildung des Anfahrwirbels beim Tragflügel
(aus [13])

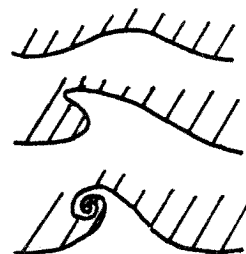


Abb. 2-4 Wirbelbildung an einer Grenzfläche
Die obere Strömung bewegt sich relativ
zur unteren Strömung nach links

Nach der Drehimpulserhaltung muß sich aber neben diesem zurückbleibenden "Anfahrwirbel" noch ein entgegengesetzt drehender Wirbel bilden. Dieser zweite Wirbel wandert mit dem Tragflügel mit und heißt "Zirkulation". Diese Zirkulation bildet sich solange aus, bis der Geschwindigkeits- bzw. Drucksprung in P' ausgeglichen ist. Im stationären Zustand fließt die Strömung jetzt an der Hinterkante glatt ab (Abb. 2-5).



Abb. 2-5 "Gesunde" Umströmung eines Flügelprofils (aus [12])

Die tatsächlichen Geschwindigkeiten um den Flügel kann man sich auch aus der Zirkulationsströmung und einer reibungsfreien Parallelströmung zusammengesetzt denken (Abb. 2-6). An der Unterseite ist die Strömungsgeschwindigkeit nun kleiner als in der freien Strömung, an der Oberseite größer. Wiederum mit der Bernoulli-Gleichung ergibt sich dadurch ein Überdruck unterhalb und ein Unterdruck (Sog) oberhalb des Flügels (Abb. 2-7). Daraus resultiert der nach oben gerichtete Auftrieb.

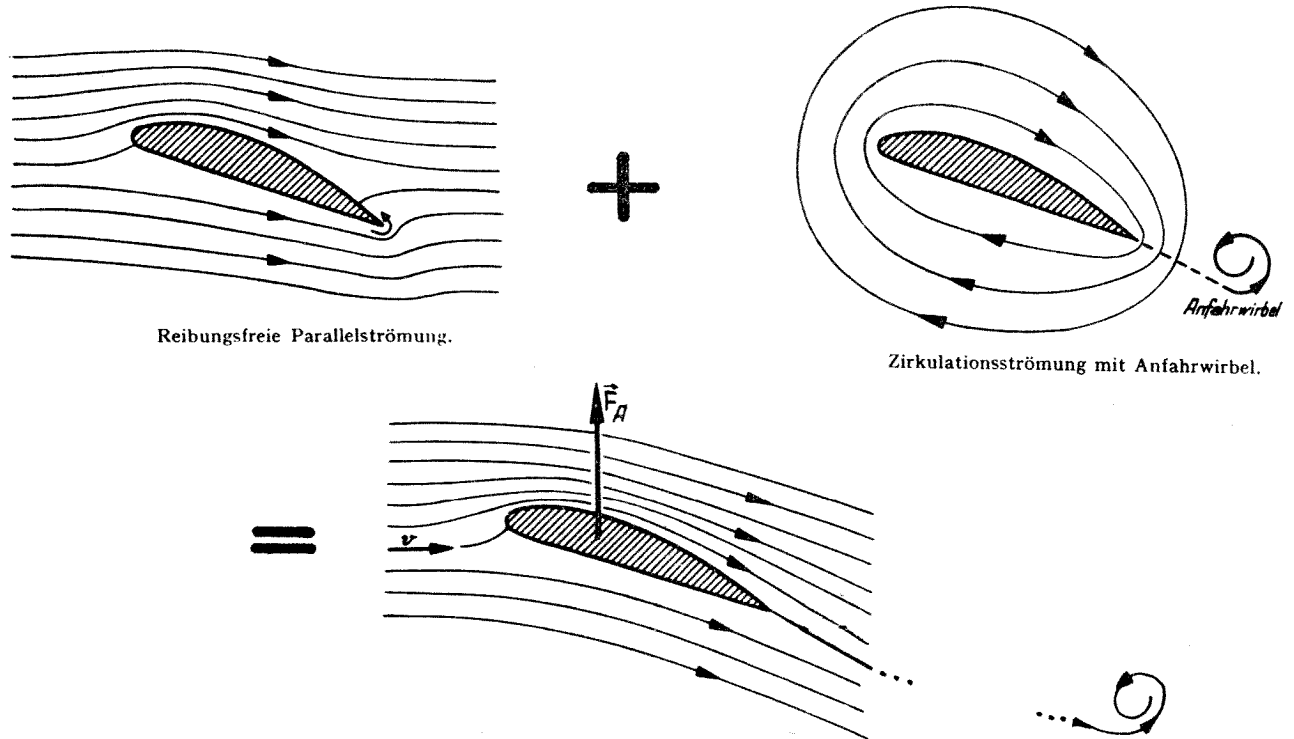


Abb. 2-6 Anschauliche Erklärung des Auftriebs (aus [10])

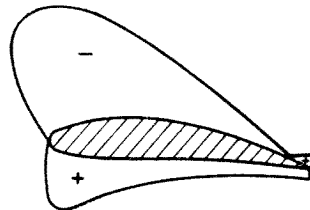


Abb. 2-7 Druckverlauf um ein Flügelprofil (aus [10])

Die Größe dieses Auftriebes hängt - bei const. Geschwindigkeit - stark vom Winkel zwischen Strömung und Profil ab. Nach Erreichen des Höchstauftriebes reißt jedoch die Strömung ab und ein Wiederanlegen geschieht äußerst unwillig (Abb. 2-8).



Abb. 2-8 Abgerissene Flügelumströmung (aus [12])

Der Angriffspunkt der Luftkraft - Druckpunkt genannt - liegt bei etwa $\frac{1}{4}$ der Tiefe hinter der Vorderkante. Außer bei sog. "druckpunktfesten" Profilen ist auch er vom Anstellwinkel abhängig. Bezüglich einer Achse würde dies auch ein sich änderndes Drehmoment zur Folge haben.

Diese Erklärungen von Widerstand und Auftrieb sind Plausibilitätserklärungen, die jedoch für unsere Zwecke genügen. Denn auch noch heute sind grundlegende Dinge auf dem Gebiet der Strömungen nicht verstanden, deren Verständnis unser physikalisches Bild von der Natur entscheidend ändern kann ("Turbulenzen", "Chaos-Theorie" - siehe etwa Bild der Wissenschaft 4/82).

2.2 Profildaten

Aus den Bemerkungen über das Zustandekommen der Widerstandskraft wird klar, daß man diese Kraft heute nicht zur Windenergieumwandlung benutzen wird: Durch die energiereichen Wirbel geht zuviel Energie verloren. Man wird also das Auftriebsprinzip benutzen - was auch schon ohne obige Theorie seit mindestens 800 Jahren gemacht wird, wenn auch bei weitem nicht so optimal wie heute möglich. (Die moderne Strömungslehre wurde Anfang dieses Jahrhunderts von Ludwig Prandtl begründet.)

Körper mit geringem Widerstand bei größtmöglichem Auftrieb sind aber mit einem großen Aufwand untersucht worden - nämlich im Flugzeugbau.

Somit ist ein aufwendiger Teil der Windenergieforschung praktisch erledigt, man braucht sich aus den in aller Welt vermessenen Profilen nur die geeigneten herauszusuchen.

Zur geometrischen Kennzeichnung eines Profils führt man die Begriffe der Skelettlinie und der Profilsehne ein. Die Skelettlinie ist als die Verbindungslinie der Mittelpunkte aller einbeschriebenen Kreise definiert (Abb. 2-9). Die Profilsehne ist die Verbindungsgerade zwischen dem vordersten und dem hintersten Punkt der Skelettlinie. Legt man durch diesen vordersten Punkt noch eine Gerade senkrecht zur Profilsehne, kann man sich ein rechtwinkliges Koordinatensystem definieren, so daß die Geometrie des Profils algebraisch erfaßt werden kann.

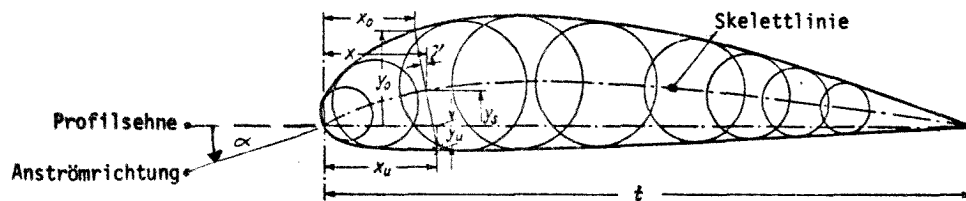


Abb. 2-9 Zur Definition der Skelettlinie, der Profilsehne, der Profiltiefe t und des Anstellwinkels α (mit $|\alpha|$)

Die charakteristischen aerodynamischen Größen eines Profils sind die vom Anstellwinkel abhängigen c_a und c_w -Werte, die in sogenannten Polardiagrammen dargestellt werden (Abb. 2-10, 2-11).

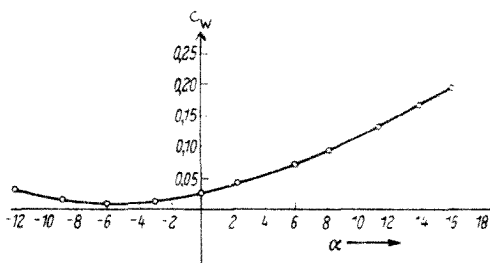


Abb. 2-10 Widerstandsbeiwert als Funktion des Anstellwinkels (aus [13])

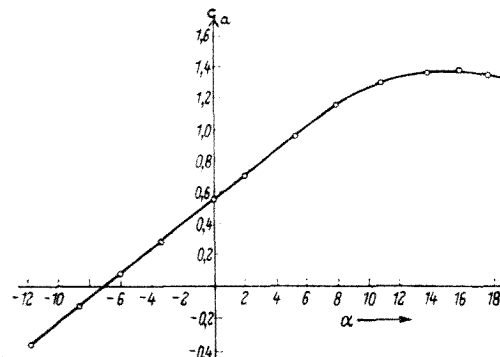


Abb. 2-11 Auftriebsbeiwert als Funktion des Anstellwinkels (aus [13])

Dabei ist der Anstellwinkel α definiert als Winkel zwischen der Ausströmrichtung und der Profilsehne. Oft wird auch die Lilienthal'sche Darstellung benutzt (Abb. 2-12). Hier werden die c_a - und c_w -Werte gegeneinander aufgetragen.

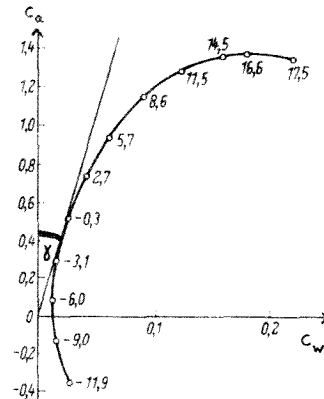


Abb. 2-12 Lilienthalsches Polardiagramm (mit [13])

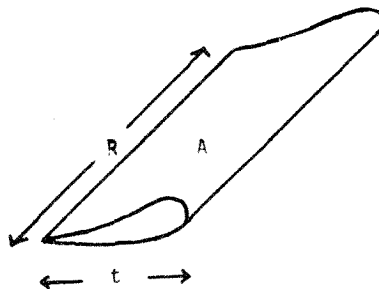
Die beste Gleitzahl E ergibt sich durch das Anlegen einer durch den Ursprung gehenden Tangente an die Kurve. Es gilt: $E_{\text{best}} = \tan \gamma_{\text{best}}$.

Das Verhältnis von Auftrieb und Widerstand bezeichnet man als Gleitzahl $E = \frac{c_a}{c_w}$. Auch E ist vom Anstellwinkel abhängig. Je größer dieses Verhältnis ist, desto günstiger ist der "aerodynamische Wirkungsgrad". Profile hoher Güte erreichen heute Gleitzahlen von 150 bis 170, in der Praxis ist man jedoch schon mit $E = 40$ gut bedient.

Die Randeinflüsse an den Enden eines Flügels sind für jedes Streckungsverhältnis $\Lambda = \frac{R^2}{A} = \frac{R}{t}$ (Abb. 2-13) verschieden. Um diesen Einfluß auszuschalten, werden Profildaten bei genügend großem Λ gemessen. Oft wird auch der Kanal durch planparallele Platten begrenzt, was den Randeinfluß weitgehend eliminiert.

Abb. 2-13
Zur Definition des Streckungsverhältnisses Λ . Dabei gilt:

$$A = \int_0^R t(r) dr$$



2.3 Die Reynoldszahl

Unsere Beiwerte c_w und c_a waren in unserer bisherigen Betrachtung nur von der geometrischen Ähnlichkeit der Profile abhängig, jedoch unabhängig von der absoluten Größe des Profils und der Geschwindigkeit der Strömung. Es zeigt sich, daß diese Näherung zu ungenau ist. Will man diesen Mangel beseitigen, muß man dafür sorgen, daß an ähnlich gelegenen Strömungsstellen das Verhältnis der an den Strömungsteilchen angreifenden Kräfte gleich ist.

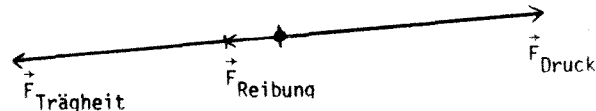


Abb. 2-14 Angreifende Kräfte an einem Strömungsteilchen

Diese Kräfte, die sich das Gleichgewicht halten müssen, sind die Druckkraft einerseits, Trägheits- und Reibungskraft andererseits. Kompensieren sich die am Teilchen angreifenden Druckkräfte nicht, wird es in Richtung der resultierenden Druckkraft beschleunigt. Die von der Zähigkeit abhängige Reibungskraft wirkt dieser Bewegung entgegen. Der verbleibenden Beschleunigung wird im Bezugssystem des Teilchens nach dem Trägheitsprinzip eine gleichgroße Beschleunigung entgegengesetzt (Abb. 2-14). Man wählt jetzt das Verhältnis von Trägheits- zu Reibungskraft, um die dynamische Ähnlichkeit der Strömung zu charakterisieren. Dieses Verhältnis $\frac{\text{Trägheitskräfte}}{\text{Reibungskräfte}}$ heißt Reynoldszahl Re und läßt sich auf $Re = \frac{tw}{\nu}$ vereinfachen. Dabei ist t die Tiefe des Profils, w die Geschwindigkeit der Strömung und ν die kinematische Zähigkeit des strömenden Mediums.

Temperatur	ν von Wasser	ν von Luft bei 1,033 kg/cm ³
0° C	0,0000178	0,0000133
15° C	0,00000107	0,0000136
100° C	0,000000295	0,0000245

$$[\nu] = \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

Strömungsvorgänge sind also nur dann vergleichbar, wenn die Reynoldszahlen gleich sind. Diese Feststellung ist wichtig für unseren Modellversuch im Windkanal und die Übertragbarkeit auf Großanlagen. Bei Modellversuchen kann man dazu etwa die Geschwindigkeit ändern oder gar das Strömungsmedium. Wie sich ein Profil bei verschiedenen Reynoldszahlen verhält, sieht man in Abb. 2-15. Ohne weiter auf die Problematik einzugehen, kann man sagen, daß sich die Profildaten mit steigender Reynoldszahl verbessern.

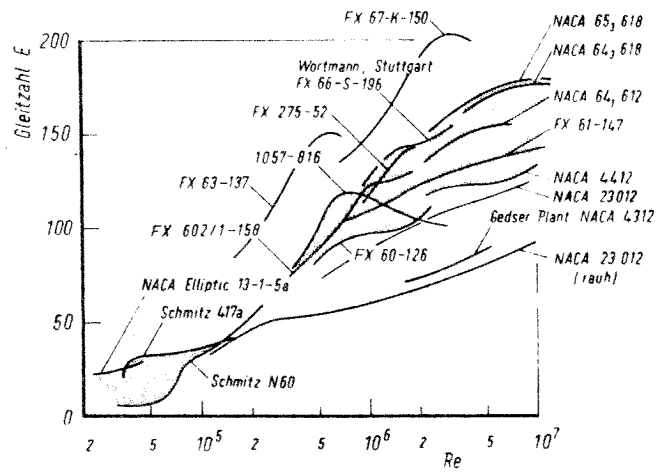


Abb. 2-15
Die Gleitzahl verschiedener Profile als Funktion
der Reynoldszahl (aus [18])

Wir wissen nun einiges über den Wind und über mit ihm wechselwirkende Körper.
Damit können wir uns endlich Gedanken zum Windrad machen.

3. BETRACHTUNG DES ENERGIEFLUSSES

3.1 Das Impuls-Modell

- a) Die Leistung
- b) Die auf den Wind wirkende Kraft
- c) Die Gegenkraft des Windes
- d) Druck und Geschwindigkeiten
- e) Die maximale Leistung

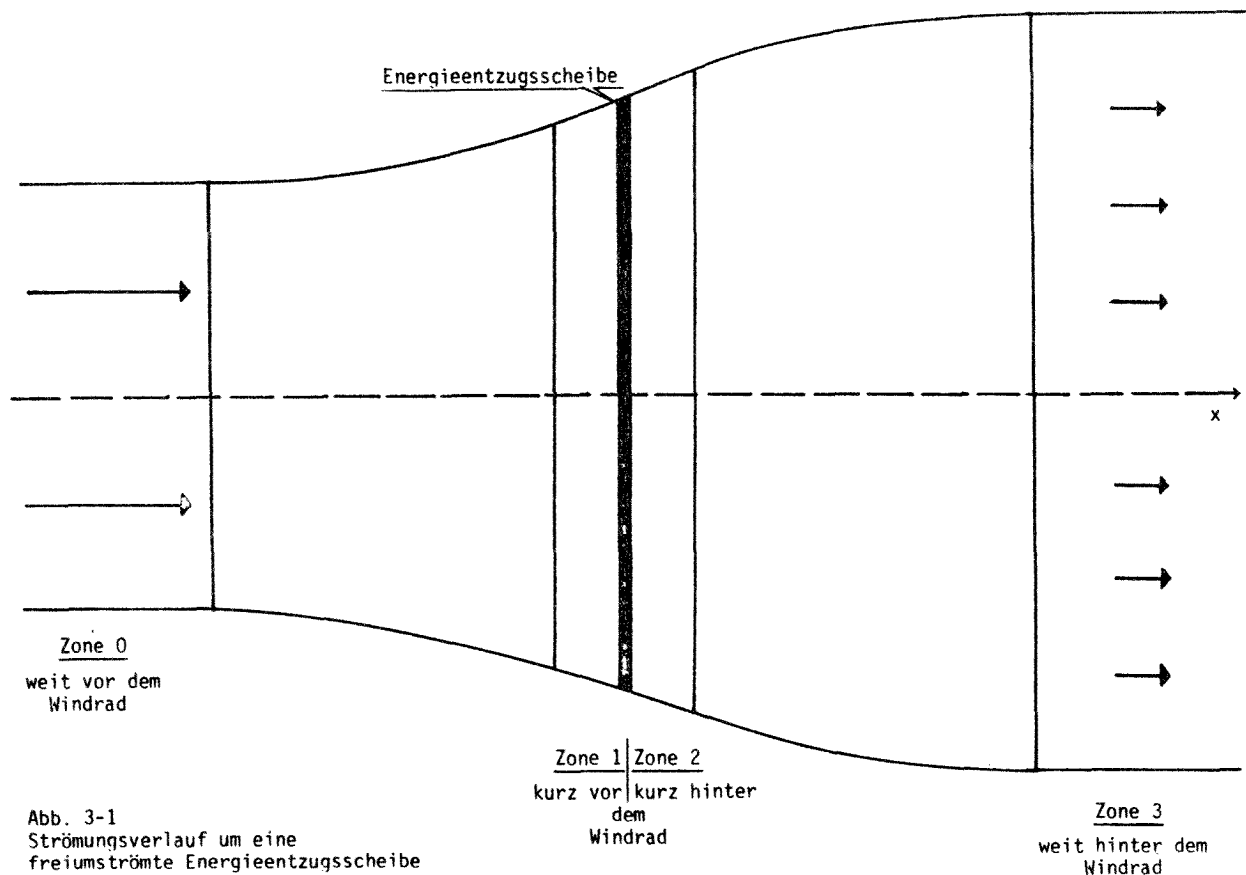
3.2 Erweiterung des Impulsmodells Die Berücksichtigung der Rotation

Im letzten Kapitel haben wir die Kräfte kennengelernt, mit denen man den Wind abbremsen und ihm damit seine kinetische Energie entziehen kann. Es bietet sich der Gedanke an, sich der gesamten kinetischen Energie des Windes anzunehmen. Dieses scheitert aber sofort daran, daß sich die auf die Geschwindigkeit $v = 0$ abgebremsten Luftmassen hinter dem Windrad stauen würden, was zum sofortigen Stillstand desselben führe. Also suche man die optimale Abminderung der Windgeschwindigkeit, mit der die meiste Energie zu entziehen ist.

3.1 Das Impuls-Modell

Wir wollen ein Modell kennenlernen, aus dem wir die optimale Abbremsung des Windes erhalten können. Das in seiner Einfachheit beste Modell wurde in den zwanziger Jahren von Albert Betz vorgestellt, beruhend auf Überlegungen von Rankine und Froude. Betz war neben Ludwig Prandtl einer der bedeutendsten deutschen Strömungsphysiker seiner Zeit. Das hier mit leichten Modifikationen vorgestellte Modell macht folgende Idealisierungen.

1. Die Strömung ist stationär, homogen, inkompressibel, drall- und reibungsfrei.
2. Wir betrachten das Windrad als freiumströmte, nicht rotierende "Energieentzugsscheibe" gleicher Fläche. Sie entzieht dem Wind ausschließlich kinetische Energie.
3. Die durch die Scheibe beeinflussten Luftmassen sind klar abgegrenzt von den nicht beeinflussten.
4. Die Schubkraft sei über die Scheibe gleichmäßig verteilt.
5. Weit vor und hinter der Scheibe sei der statische Druck gleich dem statischen Druck der ungestörten Strömung.
6. Der Energieverlust des Windes entspricht der an der Scheibe gewonnenen Energie.



a) Die Leistung

Die letzte Idealisierung, die den Energiesatz als Grundlage hat, wollen wir formelmäßig fassen. Bei stationären Strömungen ist es praktisch, mit der Leistung zu arbeiten:

Die Leistung P am Rotor beträgt (mit den Bezeichnungen aus Abb. 3-1)

$$P = \frac{\dot{m}_0}{2} v_0^2 - \frac{\dot{m}_3}{2} v_3^2 \quad (3.1)$$

Wenn A die Fläche der Scheibe und v die Durchflußgeschwindigkeit ist, ergibt sich mit der Kontinuitätsgleichung:

$$\dot{m}_0 = \dot{m}_3 = : \dot{m} = \rho A v \quad (3.2)$$

Es ergibt sich für P :

$$P = \frac{\rho}{2} A v (v_0^2 - v_3^2) \quad (3.3)$$

Bei vorgegebener Windgeschwindigkeit v_0 ist P also eine Funktion von v und v_3 . Da diese beiden Geschwindigkeiten sicher nicht unabhängig voneinander sind, wollen wir einen mathematischen Zusammenhang zwischen ihnen suchen. Dazu betrachten wir jetzt die auftretenden Kräfte.

b) Die auf den Wind wirkende Kraft

Die Energieübertragung erfolgt durch Impulsänderung der Strömung. Dazu bedarf es einer äußeren Kraft S' von der Scheibe. Sie berechnet sich aus Impulsbetrachtungen weit vor und weit hinter der Scheibe:

$$S' = \frac{dp}{dt} = \dot{m} (v_0 - v_3) \quad (3.4)$$

$$\text{mit (3.2)} \quad S' = \rho A v (v_0 - v_3) \quad (3.5)$$

Dabei wurde unsere Annahme 5 berücksichtigt, daß

$$p_3 = p_0 \quad (3.6)$$

c) Die Gegenkraft des Windes

Nach dem Gesetz *actio = reactio* gibt es eine gleichgroße, entgegengesetzt wirkende Kraft S zu S' , die wir berechnen wollen. An unserer Scheibe kann sich die Windgeschwindigkeit nicht sprunghaft von v_0 auf v_3 ändern - wieder aus Gründen der Kontinuität. Es gilt also:

$$v_1 = v = v_2 \quad (3.7)$$

Die Kraft S wird aus einer Druckdifferenz kurz vor und kurz hinter der Scheibe resultieren:

$$S = A (p_1 - p_2) \quad (3.8)$$

Diese Druckdifferenz kann man mit der Bernoulli-Gleichung bestimmen. (Die Bernoulli-Gleichung folgt übrigens aus dem Energiesatz und der Kontinuitätsgleichung.) Wir erinnern an Idealisierung 5: $p_3 = p_0$. Somit wenden wir die Bernoulli-Gleichung vor und nach der Energieentnahme an:

$$\frac{\rho}{2} v_0^2 + p_0 = \frac{\rho}{2} v_1^2 + p_1 \quad (3.9)$$

und

$$\frac{\rho}{2} v_3^2 + p_3 = \frac{\rho}{2} v_2^2 + p_2 \quad (3.10)$$

Subtrahiert man die beiden Gleichungen unter Berücksichtigung von (3.6) und (3.7), erhält man

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_3^2) \quad (3.11)$$

Damit ergibt sich für S aus (3.8):

$$S = A \cdot \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_3^2) \quad (3.12)$$

d) Druck und Geschwindigkeiten

Durch den Vergleich von S und S' erhalten wir nun unsere erwünschte Beziehung zwischen v und v_3 . Es folgt nämlich:

$$\begin{aligned} |\vec{S}'| &= |\vec{S}| \\ \rho A v (v_0 - v_3) &= A \frac{\rho}{2} (v_0^2 - v_3^2) \quad (3.13) \end{aligned}$$

und damit das bemerkenswerte Ergebnis

$$v = \frac{v_0 + v_3}{2} \quad (3.14)$$

Der Geschwindigkeits- und Druckverlauf in der Strömung wird wie folgt aussehen:

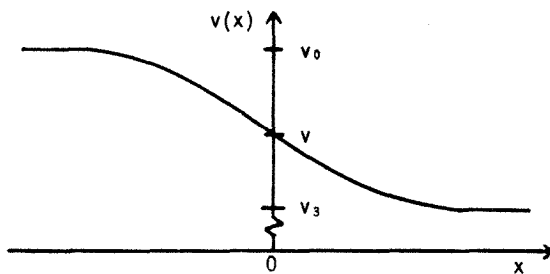
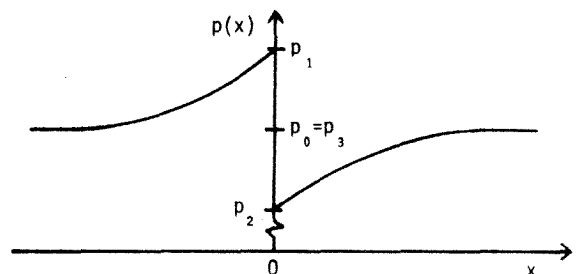


Abb. 3-2
a) Geschwindigkeitsverlauf



b) Druckverlauf

Damit ergibt sich auch der schon in Abb. 3-1 gezeigte Strömungsverlauf.

e) Die maximale Leistung

Wir sind jetzt in der Lage, die Leistung P am Windrad aus (3.3) und (3.14) nur in Abhängigkeit von v_3 zu bestimmen:

$$P = \frac{\rho}{4} A (v_0 + v_3) (v_0^2 - v_3^2) \quad (3.15)$$

Man führt als neuen Parameter das Abminderungsverhältnis $\zeta := \frac{v_3}{v_0}$ ein und erhält:

$$P = \frac{\rho}{2} A v_0^3 \frac{1}{2} (1 - \zeta^3 - \zeta^2 + \zeta) \quad (3.16)$$

Der Faktor $\frac{\rho}{2} A v_0^3$ stellt aber die bei Störungsfreiheit durch die Fläche A hindurchtretende Leistung P_0 des Windes dar. Analog zu den dimensionslosen Kräftebeiwerten im vorigen Kapitel führt man einen dimensionslosen Leistungsbeiwert c_p ein mit

$$P = : c_p \cdot P_0 \quad (3.17)$$

Mit (3.16) folgt

$$c_p = \frac{1}{2} (1 - \zeta^3 - \zeta^2 + \zeta) \quad (3.18)$$

Als maximalen Wert für c_p (idealer Leistungsbeiwert, Betzfaktor) erhält man graphisch oder durch Extremwertbestimmung

$$c_{p, id} = \frac{16}{27} \approx 0,593 \text{ bei } \zeta = \frac{1}{3}$$

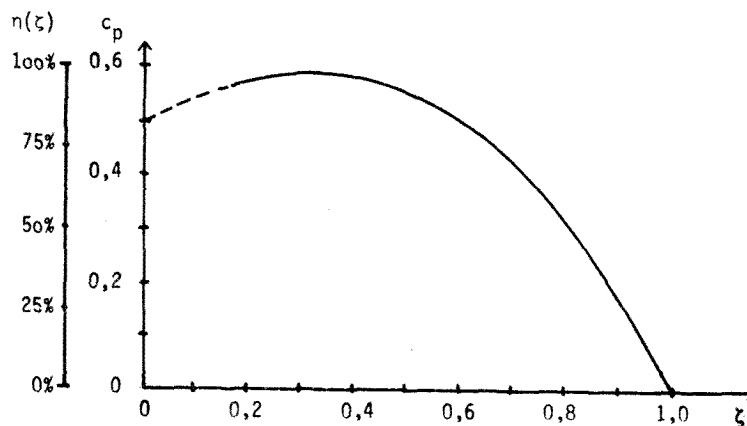


Abb. 3-3 Leistungsbeiwert im Impulsmodell als Funktion der Windabbremmung

Bei Interpretation dieser Kurve ist darauf zu achten, daß dies bei den gemachten Annahmen nur im Bereich $0 < \zeta < 1$ sinnvoll ist. Insbesondere sind die Annahmen in 3.1 c) für $\zeta \rightarrow 0$, d.h. $v_3 \rightarrow 0$ nicht zulässig.

Ist die Abbremsung $\zeta \neq \frac{1}{3}$, wird der Leistungsbeiwert kleiner. Man kann deshalb einen von ζ abhängigen Wirkungsgrad $\eta(\zeta)$ einführen mit $\eta(\frac{1}{3}) = 100\%$ (Abb. 3-3). Es gilt:

$$c_p(\zeta) = \eta(\zeta) \cdot c_{p, id} \quad (3.19)$$

Zusammenfassend können wir feststellen

Der kinetische Energieinhalt der Luft kann durch ein freiumströmtes Windrad nur bis zu maximal 59 % genutzt werden. Dazu muß der Wind auf $\frac{1}{3}v_0$ abgebremst werden. Dieses folgt im wesentlichen aus dem Energiesatz, dem Impulssatz und der Kontinuitätsgleichung. Die nicht entziehbare Energie von rund 41 % kann man als diejenige Energie interpretieren, die für den Abtransport der "verbrauchten" Luftmassen nötig ist ("Strahlverlust").

3.2 Die Berücksichtigung der Rotation des Windrades

Berücksichtigt man, daß die Energieentnahme durch rotierende Flügel geschieht, kann man das Modell aus 3.1 durch die Annahme einer rotierenden Scheibe verbessern. Unter Anwendung des Drehimpulssatzes ergeben sich von 3.1 abweichende Ergebnisse. Wir wollen uns hier mit einer Plausibilitätserklärung begnügen:

Die das Windrad durchströmende Luft übt auf die Rotorblätter ein Drehmoment M aus. Die Leistung an der Welle ergibt sich mit

$$P = M \cdot \omega \quad (3.20)$$

Eine bestimmte Leistung kann man mit einer schnellen Drehbewegung bei kleinem Drehmoment oder umgekehrt mit kleiner Winkelgeschwindigkeit und großem Drehmoment erhalten.

Ein großes Drehmoment geht aber einher mit einer großen Drehimpulsänderung der Luft

$$\frac{dL}{dt} = M \quad (3.21)$$

Die vorher rotationsfreie Strömung wird wegen der Drehimpulserhaltung eine zum Drehsinn des Windrades entgegengesetzte Drehbewegung ausführen. Die Rotationsenergie der abgeführten Luft geht auf Kosten der maximal entziehbaren Energie ("Drallverlust").

Es ist wegen der Drallverluste demnach günstiger, ein kleines Drehmoment mit einer entsprechend hohen Winkelgeschwindigkeit zur Energieentnahme zu benutzen.

Man definiert das Verhältnis von Umdrehungsgeschwindigkeit $u(r) = \omega \cdot r$ und der Windgeschwindigkeit v_0 als (örtliche) Schnellaufzahl

$$\lambda = \frac{u(r)}{v_0} \quad (3.22)$$

Die Schnellaufzahl an den Flügelspitzen bezeichnet man mit

$$\lambda_0 = \frac{u(R)}{v_0} \quad (3.23)$$

Die optimale Abbremsung der Luft ist - wie wir bald sehen werden - konstruktiv nur für eine feste Schnellaufzahl λ_0 zu verwirklichen. Sie wird Auslegeschnellaufzahl λ_A genannt. Die örtlichen Schnellaufzahlen ergeben sich dann mit

$$\lambda_a = \lambda_A \frac{r}{R} \quad (3.24)$$

Bis $\lambda_A \approx 2$ spricht man von Langsamläufers, ab $\lambda_A \geq 5$ von Schnellläufers.

Die Größe des Drallverlustes in Abhängigkeit von der Schnellaufzahl ist aus Abb. 3-4 zu ersehen. Auch hier kann man einen Drall-Verlustgrad $\eta(L)$ einführen. Der Überschaubarkeit halber wurde $\eta(\zeta) = 100\%$ gesetzt.

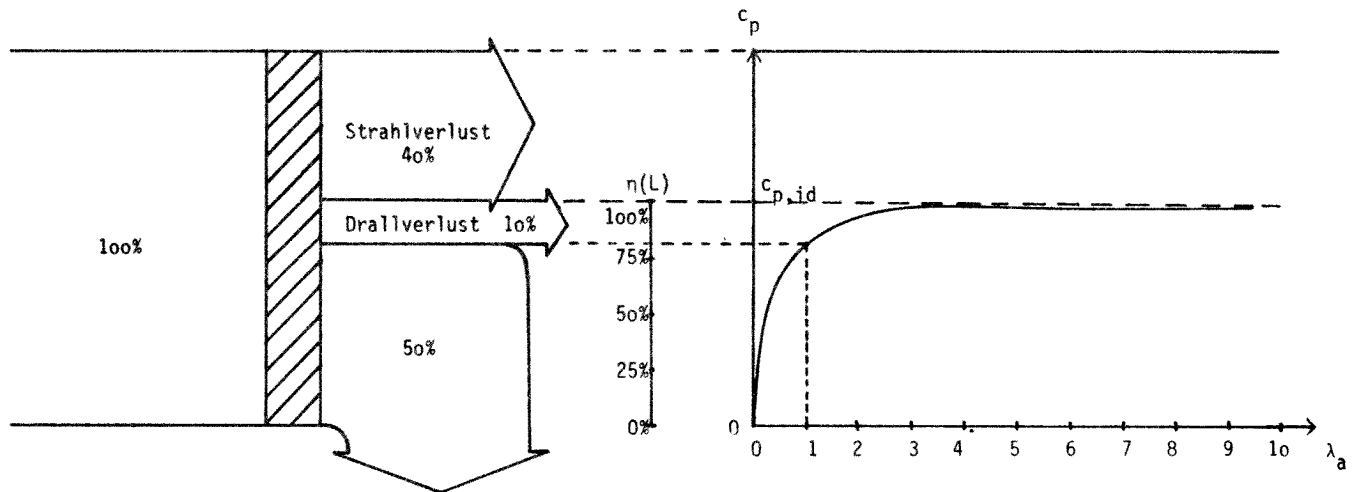


Abb. 3-4 Maximaler Leistungsbeiwert ($\eta(\zeta)=100\%$) unter Berücksichtigung des Drallverlustes

Der Abminderungsgrad $\eta(\zeta)$ hat allerdings in diesem erweiterten Modell sein Maximum nicht konstant bei $\zeta = \frac{1}{3}$, sondern - auch von der Schnellaufzahl abhängig - zwischen $\frac{1}{3}$ und $\frac{1}{2}$ (Abb. 3-5). Der Einfachheit halber wollen wir jedoch auch weiterhin mit $\zeta_{\text{opt}} = \frac{1}{3}$ rechnen.

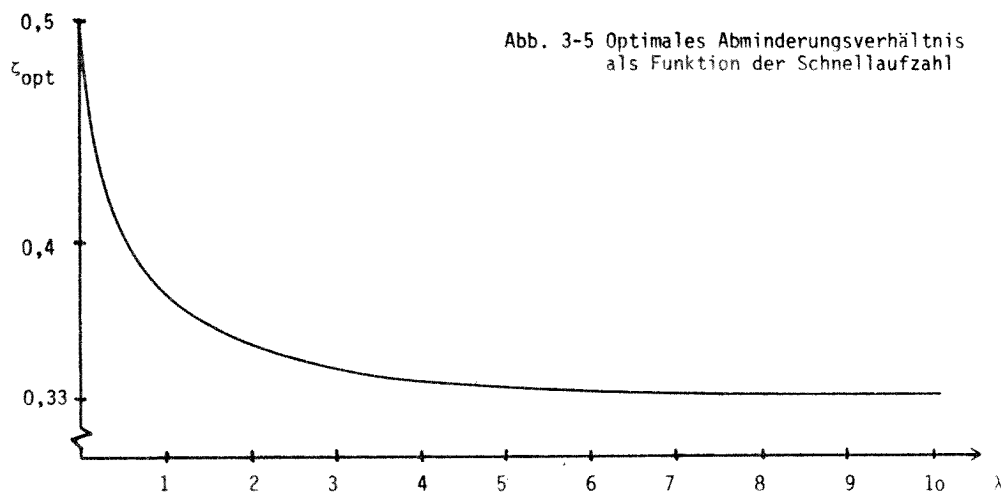


Abb. 3-5 Optimales Abminderungsverhältnis als Funktion der Schnellaufzahl

Ehe wir es uns versehen haben, ist schon rund die Hälfte der Windenergie an uns vorbeigeströmt und wir dürfen gespannt sein, was noch an Verlusten hinzukommt. Wir wollen allerdings daran denken, daß der Wind nichts kostet und der Wirkungsgrad deshalb eine andere Rolle spielt als bei anderen Energieumformern. Unsere Aufgabe ist es, mit möglichst geringen Anlagekosten Nutzenergie zur Verfügung zu stellen. Man kann einen schlechteren Wirkungsgrad in Kauf nehmen, wenn dabei die Anlagekosten stärker sinken als die Leistung.

4. ROTORBLATTBERECHNUNG

4.1 Das Radelement-Modell

- a) Geschwindigkeiten und Kräfte
- b) Ergebnisse aus dem Impulsmodell
- c) Die optimale örtliche Blatttiefe
- d) Der Blattumriß
- e) Die Schränkung des Flügelblattes

4.2 Erweiterungen des Radelement-Modells

- a) Die Berücksichtigung der Reibung
- b) Der Einfluß der Blattzahl z

4.3 Zusammenfassung

Wir können nun unsere aerodynamischen Kenntnisse anwenden, um ein Windrad zu entwerfen, das den Wind zur optimalen Energienutzung auf $v_3 = \zeta_{\text{opt}} \cdot v_0$ abbremst.

Dazu wollen wir uns das Prinzip klarmachen:

An den Rotorblättern greift eine Luftkraft F_L an. Die Komponente S_L von F_L in Achsrichtung ist die Gegenkraft zu der sich dabei einstellenden, den Wind verzögernden Schubkraft $S' = \dot{m}(v_0 - v_3)$. Durch eine geeignete Wahl von F_L kann man also die Windabbremmung beeinflussen und z.B. auf den optimalen Wert ζ_{opt} bringen. Die Luftkraft

$$F_L = \sqrt{c_a^2 + c_w^2} \frac{\rho}{2} v^2 \cdot A \quad (4.1)$$

hängt bei gegebenen Windverhältnissen, Profildaten und Windradradius von der Flügeltiefe t ab. Die genauen Zusammenhänge wollen wir jetzt erkunden.

4.1 Das Radelement-Modell

Eine bewährte Methode bei Windradberechnungen ist es, anzunehmen, daß die Luft die Rotorfläche in sich gegenseitig nicht beeinflussenden ringförmigen Radelementen durchströmt (Abb. 4-1).

Die Strömung wird durch die rotierenden Rotorblätter beeinflusst. Bei vollständiger und gleichmäßiger Beeinflussung wären dazu theoretisch unendlich viele Blätter nötig. Weiter hinten werden wir jedoch zeigen, daß der Verlustfaktor durch die in der Praxis endliche Blattzahl klein ist. Wir wollen annehmen, daß die auf den Radelementen umlaufenden Blattelemente (Abb. 4-1) sich gegenseitig nicht beeinflussen und wir die in Kapitel 2 dargelegte Theorie auf die Blattelemente anwenden dürfen ("Blattelementtheorie").

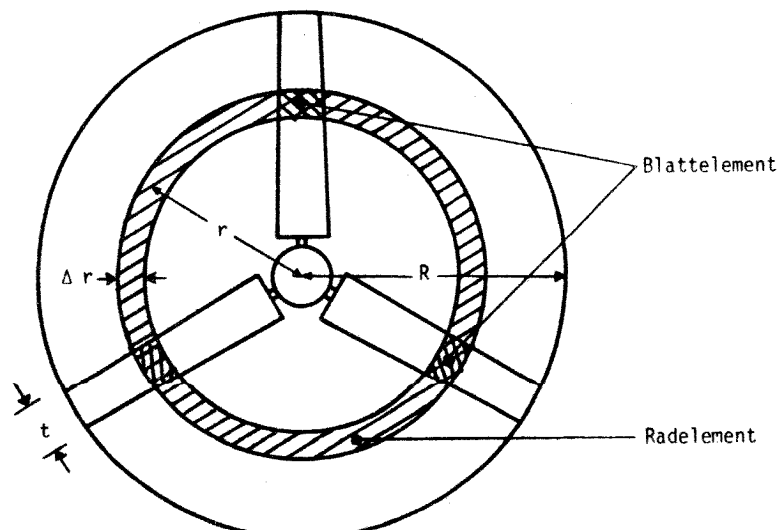
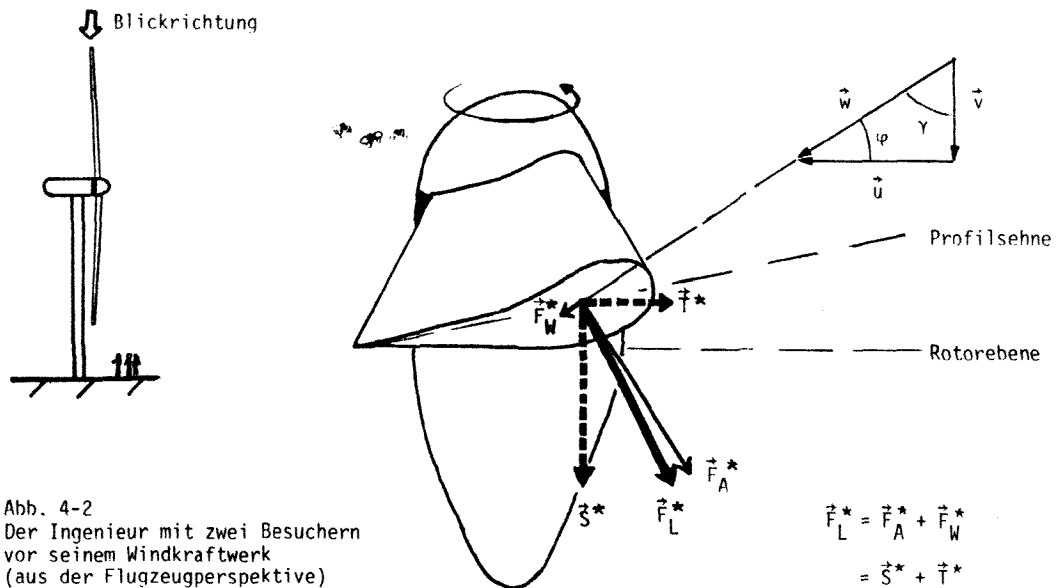


Abb. 4-1
Zur Definition von
Rad- und Blattelement

Durch die vektorielle Addition von Windgeschwindigkeit und Umfangsgeschwindigkeit ergeben sich an jedem Blattelement unterschiedliche Anströmgeschwindigkeiten und Kräfte. Diese wollen wir im folgenden betrachten. Die mit * gekennzeichneten Größen beziehen sich auf das Blattelement, die mit \sim gekennzeichneten Größen auf das Radelement.

a) Geschwindigkeiten und Kräfte

Durch die Zwangsführung der Rotoren muß die Luftkraft nicht in Auftriebskraft F_A^* und Widerstandskraft F_W^* zerlegt werden, sondern in eine Kraft T^* in der Rotorebene und eine dazu senkrechte Kraft S^* . T^* liefert das Drehmoment, S^* stellt Festigkeitsprobleme an Blatt und Turm. Die Umrechnung von F_A^* und F_W^* in T^* und S^* erfolgt nach den Regeln der Vektorrechnung. (Bemerkung: Die Geschwindigkeiten und Winkel verstehen sich im folgenden alle auf den Radius r des Radelements bezogen.)



Die Anströmgeschwindigkeit w am Blattelement ist (vergl. Abb. 4-2)

$$w = \sqrt{v^2 + u^2} \quad (4.2)$$

Verwendet man unsere gefundenen Beziehungen und Bezeichnungen,

$$(3.22) : \quad \lambda = \frac{u}{v_0}$$

$$(3.24) : \quad \lambda = \lambda_0 \frac{r}{R}$$

$$(3.14) : \quad v = \frac{v_0 + v_3}{2}$$

$$\text{und} \quad v_3 = \zeta v_0$$

erhält man

$$w = v_0 \sqrt{\frac{(1 + \zeta)^2}{4} + \left(\frac{\lambda_0}{r} r\right)^2} \quad (4.3)$$

An einem Blattelement der Tiefe t errechnen sich F_A^* und F_W^* durch

$$F_A^* = \frac{\rho}{2} \cdot w^2 \cdot c_a \cdot \Delta r \cdot t \quad (4.4)$$

und

$$F_W^* = \frac{\rho}{2} w^2 c_w \cdot \Delta r \cdot t \quad (4.5)$$

Mit Abb. 4-2 folgt

$$T^* = F_A^* \cos \gamma - F_W^* \sin \gamma \quad (4.6)$$

und

$$S^* = F_A^* \sin \gamma + F_W^* \cos \gamma \quad (4.7)$$

Nehmen wir im folgenden an, daß der Widerstand vernachlässigbar gegenüber dem Auftrieb ist. Dadurch vereinfachen auch die Ausdrücke für S^* und T^* :

$$T^* = F_A^* \cos \gamma \quad (4.8)$$

und

$$S^* = F_A^* \sin \gamma \quad (4.9)$$

Mit (4.4) ergibt sich

$$T^* = \frac{\rho}{2} w^2 c_a \cdot \Delta r \cdot t \cdot \cos \gamma \quad (4.10)$$

und

$$S^* = \frac{\rho}{2} w^2 c_a \cdot \Delta r \cdot t \cdot \sin \gamma \quad (4.11)$$

Es gilt nach Abb. 4-2

$$\sin \gamma = \frac{u}{w} \quad (4.12)$$

Damit läßt sich S^* schreiben als

$$S^* = \frac{\rho}{2} c_a \cdot \Delta r \cdot t \cdot w \cdot u \quad (4.13)$$

Hat das Windrad z Flügel, ist die gesamt Luftkraftkomponente in Achsrichtung auf das Radelement

$$\tilde{S} = z S^* \quad (4.14)$$

b) Ergebnisse aus dem Impuls-Modell

Der nach dem Impuls-Modell optimale Schub auf ein Radelement ist (vergl. (3.4) und 3.1 Vors. 4)

$$|\tilde{S}| = |-\dot{\tilde{S}}| = \dot{\tilde{m}} (v_o - v_{3opt}) \quad (4.15)$$

Die pro Zeiteinheit daruch das Radelement strömende Masse ergibt sich durch

$$\dot{\tilde{m}} = \rho \cdot 2\pi r \cdot \Delta r \cdot v \quad (4.16)$$

Mit $v_{3opt} = \zeta_{opt} \cdot v_o$ und $v = \frac{v_o + v_3}{2}$ folgt

$$\tilde{S}_{opt} = \rho \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta r v_o^2 (1 - \zeta_{opt}^2) \quad (4.17)$$

c) Die optimale örtliche Blattiefe

Die optimale Blattiefe läßt sich nun aus den aerodynamischen Betrachtungen am Blattelement und dem Impuls-Modell folgern. Mit (4.13) (4.14) und (4.17) folgt

$$z \frac{\rho}{2} c_a \cdot \Delta r \cdot t_{\text{opt}} \cdot w \cdot u = \rho \cdot \pi \cdot r \cdot \Delta r v_o^2 (1 - \zeta_{\text{opt}}^2) \quad (4.18)$$

also

$$t_{\text{opt}} = \frac{2\pi r}{z} \frac{v_o^2}{u \cdot w} \frac{1}{c_a} (1 - \zeta_{\text{opt}}^2) \quad (4.19)$$

und mit $\zeta_{\text{opt}} = \frac{1}{3}$

$$t_{\text{opt}} = \frac{2\pi r}{z} \cdot \frac{8}{9 c_a} \cdot \frac{v_o^2}{u \cdot w} \quad (4.20)$$

Die Geschwindigkeiten u und w lassen sich nach (4.3) berechnen. Damit "vereinfacht" sich (4.20) zu

$$t_{\text{opt}} = \frac{2\pi R}{z} \frac{8}{9 c_a} \frac{1}{\lambda_o \sqrt{\frac{4}{9} + (\lambda_o \frac{r}{R})^2}} \quad (4.21)$$

So wie man sich für einen Radius R (folgt aus der Leistung!), die Blattzahl z und ein Profil mit entsprechenden c_a -Wert entscheidet, muß man sich zur Berechnung der Flügeltiefe auch für ein festes λ_o entscheiden. Das gewählte λ_o heißt Auslegeschnellaufzahl λ_A . Nach welchen Kriterien z , c_a und λ_A gewählt werden, werden wir weiter hinten diskutieren. Nach unserem jetzigen Wissensstand würden wir λ_A möglichst groß wählen (siehe 3.2). Wir werden aber im nächsten Kapitel noch Nachteile von Schnellläufern kennenlernen, die zu berücksichtigen sind.

Man kann feststellen:

1) Die Blattiefe t nimmt ab:

- bei wachsender Flügelszahl z
- bei steigendem c_a -Wert
- bei großer Auslegeschnellaufzahl λ_A
- an den Flügelspitzen.

2) Sieht man von der Reynoldszahlabhängigkeit $Re = \frac{t \cdot w}{\nu}$ einmal ab, so ist die Blattauslegung nicht von der Windgeschwindigkeit v_o , sondern der Schnellaufzahl λ_o abhängig. Durch Regelung von $\omega_A = \frac{\lambda_A}{R} \cdot v_o$ kann man demnach immer im optimalen Bereich fahren. Wir werden darauf zurückkommen.

d) Der Blattumriß

Aus (4.21) läßt sich bei gegebenem c_a , R , z und λ_A die optimale Blattiefenverteilung längs des Rotorblattes errechnen. Den c_a -Wert wählt man dabei aus den Profilpolaren so, daß die dazugehörige Gleitzahl E maximal ist, die Reibungsverluste also klein bleiben. Behält man diesen c_a -Wert über den gesamten Flügelradius bei, ergibt sich der in Abb. 4-3 a gezeigte Blattumriß.

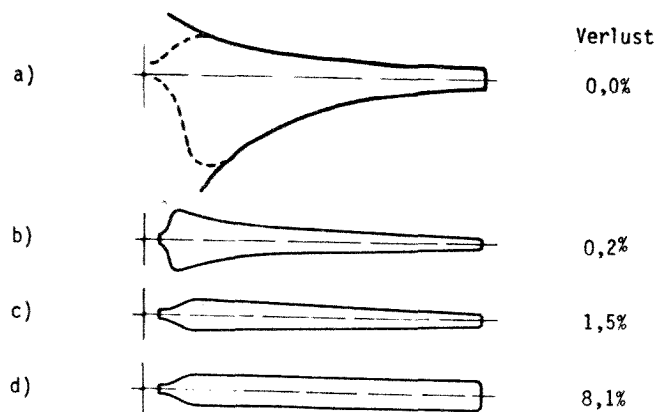


Abb. 4-3 Blattumrißformen (nach [17])

Diese Form ist jedoch nur sehr schwierig (und damit teuer) zu realisieren. Man hat deshalb Kompromißformen berechnet, in der der Blattumriß $t(r)$ durch Änderung des c_a -Wertes eine realisierbare Form bekommt (Abb. 4-3 b bis d). Bei der Änderung des c_a -Wertes durch die Änderung des Anstellwinkels α verschlechtert sich aber auch die Gleitzahl. Wir bekommen also erhöhte Reibungsverluste. Bei der Trapezform sind diese jedoch in der Größenordnung von 2 %, was einen guten Kompromiß zwischen Kostenersparnis und Leistungsverlust darstellt.

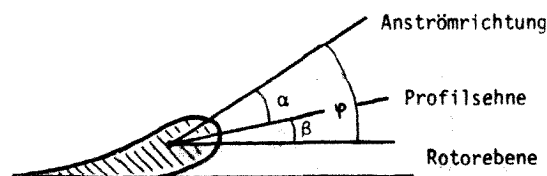
e) Die Schränkung des Flügelblattes

Der auf das Blattelement wirkende Wind hat den Winkel φ zur Rotorebene. Damit das Blattelement unter dem - sich aus dem c_a -Wert ergebenden - Anstellwinkel α angeströmt wird, muß das Rotorblatt an dieser Stelle um den Winkel β zur Rotorebene gedreht werden (Abb. 4-4). Dieser sich aus

$$\beta = \varphi - \alpha \quad (4.22)$$

zu errechnende Winkel heißt Schränkungswinkel. Bei einem festen $\lambda_0 = \lambda_A$ ist auch der Anströmwinkel $\varphi(r)$ konstant und mit Abb. 4-2 ergibt sich

Abb. 4-4
Zur Definition des
Schränkungswinkels



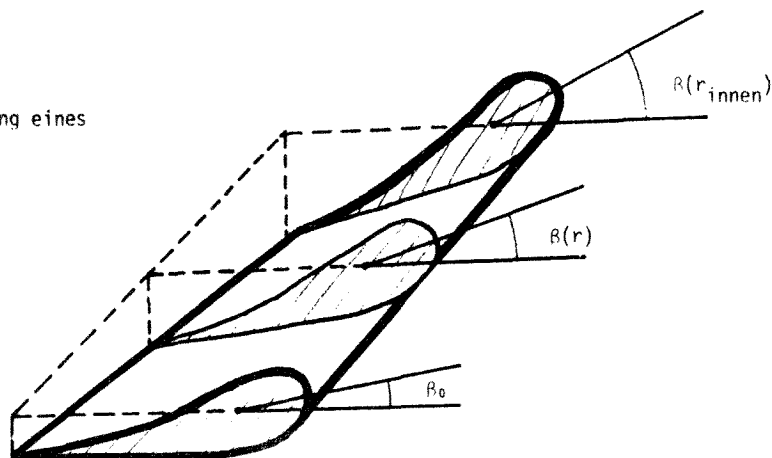
$$\varphi(r) = \arctan \frac{v}{u} = \arctan \left(\frac{2}{3} \frac{R}{\lambda_A} \frac{1}{r} \right) \quad (4.23)$$

Mit (4.22) läßt sich jetzt der Schräkungswinkel für das Blattelement im Abstand r ausrechnen.

Längs des Flügels wird sich mit änderndem r nicht nur der Betrag der wirksamen Windgeschwindigkeit \vec{w} ändern, sondern auch der Anströmwinkel φ . Nach (4.22) ändert sich damit auch der erforderliche Schräkungswinkel, wobei sich aus 4.1 d) ergebende Korrekturen am Anstellwinkel α mitberücksichtigt werden. Dadurch bekommt der Flügel eine verwundene Form (Abb. 4-5).

Oft wird der Schräkungswinkel β_0 an den Flügelspitzen "Pitchwinkel" genannt und die sich längs des Flügels ergebende Korrektur $\Delta\beta$ von β_0 als Verwindungswinkel bezeichnet.

Abb. 4-5
Die Verwindung eines
Rotorblattes



4.2 Erweiterungen des Radelement-Modells

a) Die Berücksichtigung der Reibung

Die von einem Blattelement an die Welle abgegebene Leistung ist

$$P^* = T^* \cdot u \quad (4.24)$$

Die vom Wind an das Blattelement abgegebene Leistung ist

$$P^* = S^* \cdot v \quad (4.25)$$

Diese beiden Leistungen sind identisch, da wir bei (4.8) und (4.9) von den Reibungseinflüssen abgesehen haben. Verwenden wir die Ausdrücke (4.6) und (4.7), die den Widerstandsanteil erfassen, ergibt sich mit $E = \frac{c_a}{c_w}$:

$$T^* = F_A^* \cos \gamma \left(1 - \frac{1}{E} \tan \gamma \right) \quad (4.26)$$

und

$$S^* = F_A^* \sin \gamma \left(1 + \frac{1}{E} \cot \gamma \right) \quad (4.27)$$

Wir führen jetzt den Profilverlustfaktor $\eta(E)$ ein

$$\begin{aligned}\eta(E) &= \frac{T^* u}{S^* v} \\ &= \frac{F_A^* \cos \gamma \left(1 - \frac{1}{E^*} \tan \gamma\right) u}{F_A^* \sin \gamma \left(1 + \frac{1}{E^*} \cot \gamma\right) v}\end{aligned}\quad (4.28)$$

Mit $\frac{u}{v} = \frac{\sin \gamma}{\cos \gamma}$ folgt

$$\eta(E) = \frac{1 - \frac{1}{E^*} \tan \gamma}{1 + \frac{1}{E^*} \cot \gamma}\quad (4.29)$$

und da $\tan \gamma = \frac{u}{v} = \frac{3}{2} \frac{R}{r} \lambda_A$:

$$\eta(E) = \frac{1 - \frac{3}{2} \cdot \frac{r}{R} \cdot \frac{\lambda_A}{E}}{1 + \frac{2}{3} \frac{R}{r} \frac{1}{E \lambda_A}}\quad (4.30)$$

Wir können feststellen:

- Wie man am Zähler von (4.30) sieht, muß bei hohen Auslegeschnellaufzahlen λ_A das Profil eine hohe Gleitzahl E haben, damit Reibungsverluste nicht zu groß werden. Der Anteil im Nenner spielt kaum eine Rolle, solange λ_A nicht wesentlich kleiner als 1 ist. Wie rapide der Einfluß der Gleitzahl ist, zeigt Abb. 4-6.

Bei der Wahl der Auslegeschnellaufzahl λ_A wird man also auch die erreichbare Profilgüte (sorgfältige Einhaltung der Maße, sehr glatte Oberfläche) berücksichtigen müssen.

- An den Flügelspitzen ($\frac{r}{R} \rightarrow 1$) muß mehr auf eine hohe Gleitzahl geachtet werden als in Nabennähe.

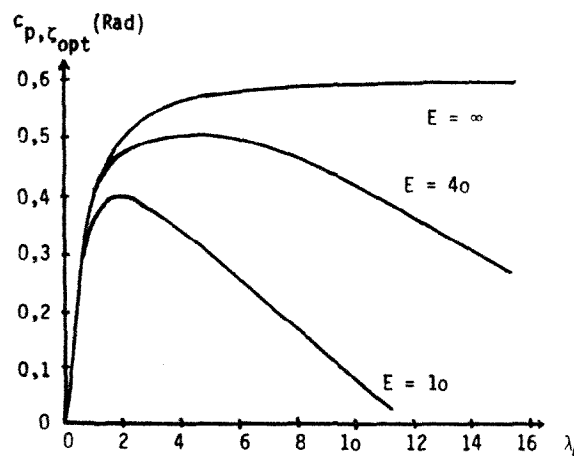


Abb. 4-6
Maximaler Leistungsbeiwert ($\eta(\zeta)=100\%$)
unter Berücksichtigung von Drall- und
Reibungsverlusten

b) Der Einfluß der Blattzahl z

Der Einfluß des Abstandes der Flügel voneinander ist kleiner, als man auf den ersten Blick denken mag. Dazu stelle man sich die Blattelemente nicht im Kreis umlaufend, sondern in der Ebene abgewickelt als ein Profilgitter vor (Abb. 4-7). Die von einem Blattelement zu beeinflussende Luftstreifenbreite ist

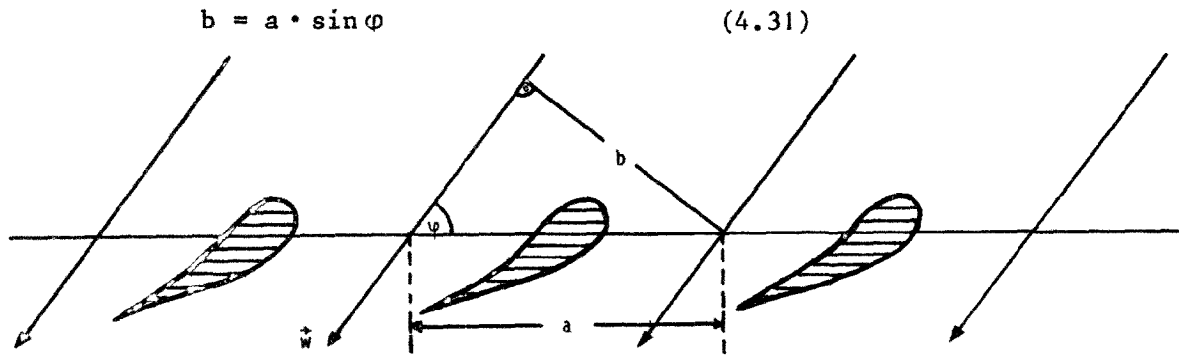


Abb. 4-7 Profilgitter

Eine für uns hier zu weit gehende Betrachtung der Zirkulationsverhältnisse zeigt, daß bei Anwendung der Radelementtheorie die endliche Blattzahl im Innern des Rades keine Korrektur bedingt. Anders ist es jedoch an den Flügelspitzen. Durch den Druckunterschied strömt die Luft auch um die Flügelspitzen (Abb. 4-8). Das führt zu einem Zirkulationsabfall an den Enden, der sich umso weiter nach innen erstreckt, je größer b ist. Der Zirkulationsabfall führt zur Verminderung des Auftriebs und damit auch zur Verminderung der Leistung.

Abb. 4-8
Umströmung der Flügelspitzen

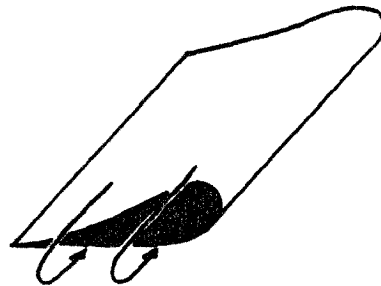
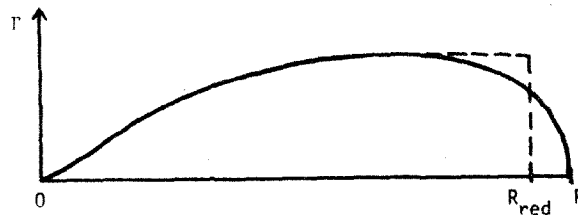


Abb. 4-9
Zirkulationsverlauf längs eines Rotorblattes



Ein übliches Verfahren, diesen Leistungsverlust zu berücksichtigen, ist die Einführung eines reduzierten Radius

$$R_{\text{red}} = f \cdot R \quad (4.32)$$

(siehe auch Abb. 4-9).

Nach Prandtl [21] berechnet sich f durch

$$f = 1 - \frac{\ln 2}{\pi} \frac{b(R)}{R}$$

$$\approx 1 - 0,22 \frac{b(R)}{R} \quad (4.33)$$

Mit $\sin \varphi = \frac{v}{w}$, $v = \frac{2}{3} v_0$, $a(R) = \frac{2 \pi R}{z}$ und (4.31) läßt sich f als Funktion von λ_0 und z schreiben:

$$f = 1 - 0,22 \frac{2 \pi R}{z} \cdot \frac{1}{R} \cdot \frac{2}{3} \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{9} + \lambda_0^2}}$$

$$= 1 - \frac{0,92}{z} \frac{1}{\sqrt{\frac{4}{9} + \lambda_0^2}} \quad (4.34)$$

Da der Radius quadratisch in die Berechnung der Leistung des Windrades eingeht, definieren wir den Blattverlustfaktor

$$\eta(z) = f^2 \quad (4.35)$$

Die Abhängigkeit $\eta(z)$ von λ_0 zeigt Abb. 4-10.

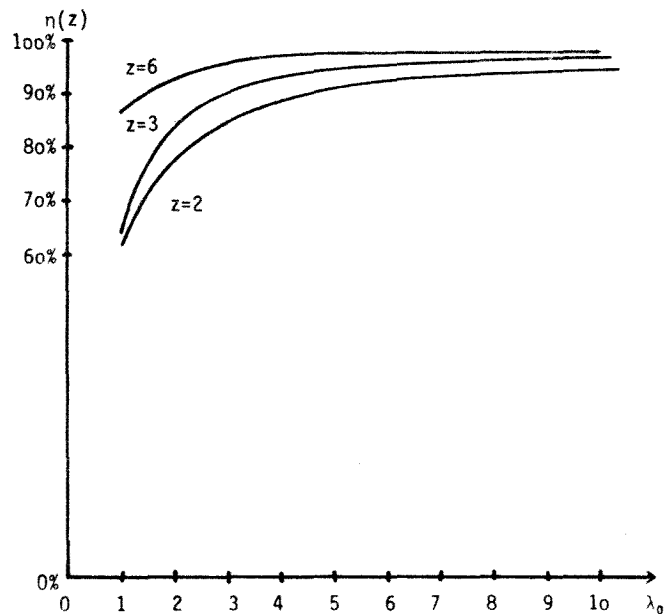


Abb. 4-10 Der Blattzahlverlustfaktor als Funktion der Schnelllaufzahl

4.3 Zusammenfassung

Wir haben mit dem Augenmerk auf die Energienutzung die aerodynamische Seite eines WEKs betrachtet. Nachdem wir im Kapitel 2 einiges über Profile erfuhren und uns im Kapitel 3 Gedanken über die optimale Abbremsung des Windes gemacht haben, wurde in diesem Kapitel die darauf aufbauende Radelementtheorie eingeführt. Für die Radelemente haben wir konstruktive Bedingungen an die Rotorblätter errechnet, die für die Abbremsung des Windes auf $\frac{v_0}{3}$ nötig sind. Dazu haben wir als einen wichtigen Parameter die Auslegeschnellaufzahl λ_A eingeführt, die mit der Schnellaufzahl des Radelementes durch die Beziehung (3.24) verknüpft ist. Nur bei $\lambda_0 = \lambda_A$ ist die geforderte Abbremsung des Windes möglich. Trotzdem war auch im Falle $\lambda_0 = \lambda_A$ nicht die gesamte ideale Leistung von $0,59 \cdot P_0$ erhältlich. Wir führten Verlustfaktoren ein, die in einem engen Zusammenhang mit den offen gebliebenen Parametern λ_A , R , E und z standen. Dies waren

- der Drallverlustfaktor $\eta(L)$, der schon in 3.2 eingeführt wurde, streng genommen aber auch des Radelement-Modells bedarf. Er ist abhängig von der örtlichen Schnellaufzahl, also

$$\eta(L) = \eta(\lambda(r))$$

- der Profilverlustfaktor $\eta(E)$, der den aerodynamischen Reibungsverlust am Profil berücksichtigt. Er ist abhängig von der örtlichen Gleitzahl und der örtlichen Schnellaufzahl, also

$$\eta(E) = \eta(E(r), \lambda(r))$$

Da für den Fall $\lambda_0 = \lambda_A$ der Abbremsungswirkungsgrad $\eta(\zeta) = 100\%$ ist, ergibt sich für den Leistungsbeiwert des Radelements

$$\begin{aligned} c_{p,\zeta_{opt}}(r) &= c_{p,id} \cdot \eta(\lambda(r)) \cdot \eta(E(r), \lambda(r)) \\ &= c_{p,id} \cdot \eta(\lambda(r), E(r)) \quad (4.36) \\ &= c_{p,id} \cdot \eta(\lambda_A, R, r; E(r)) \end{aligned}$$

Den Leistungsbeiwert des gesamten Windrades erhält man durch eine entsprechende Integration, etwa in der Form

$$c_{p,\zeta_{opt}}(\text{Rad}) = \frac{2}{R^2} \eta(z) \int_0^R r \cdot c_{p,\zeta_{opt}}(r) \cdot dr \quad (4.37)$$

Hier erscheint auch der von der Blattzahl z und $\lambda_0 = \lambda_A$ abhängige Blattzahlverlustfaktor

$$\eta(z) = \eta(z, \lambda_A)$$

Anstatt diese Integration durchzuführen, kann man überschlagsmäßig mit den Daten eines "typischen Radelements" im Abstand r_{typ} rechnen. Wir wollen $r_{\text{typ}} = 0,72 R$ annehmen [15].

$$c_{p, \zeta_{\text{opt}}}(\text{Rad}) \approx c_{p, \zeta_{\text{opt}}}(0,72 R) \cdot \eta(z)$$

$$= c_{p, \text{id}} \cdot \eta(\lambda_A, \bar{E}, z) \quad (4.38)$$

Den Leistungsbeiwert des Rades in Abhängigkeit von diesen 3 Parametern zeigen die folgenden Abbildungen.

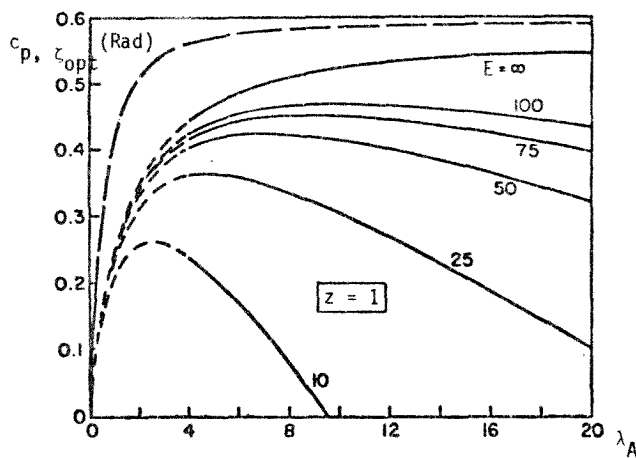


Abb. 4-11

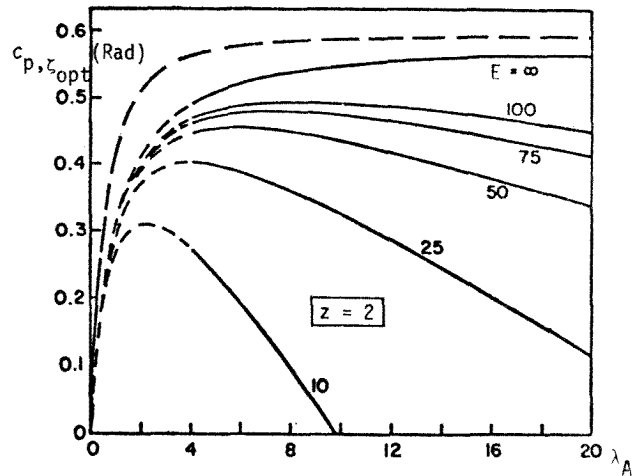


Abb. 4-12

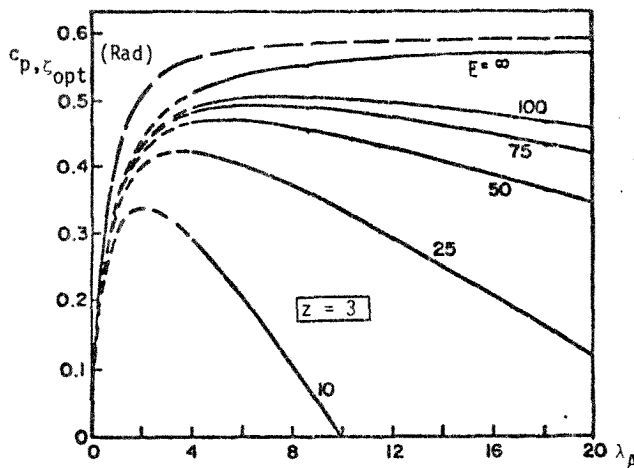


Abb. 4-13

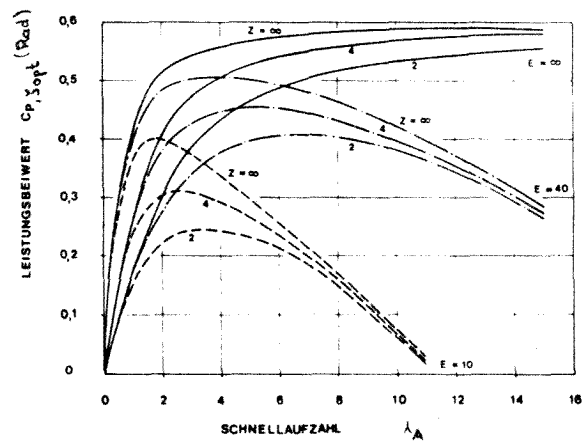


Abb. 4-14

Abb. 4-11 bis 4-14
Maximaler Leistungsbeiwert ($\eta(\zeta) = 100\%$) unter Berücksichtigung von Drall-,
Reibungs- und Blattzahlverlusten (aus [14])

Die Wahl der Auslegeschnellaufzahl hängt also in starkem Maße von der wirklichbaren Profilgüte ab. Der Anzahl der Blätter sind durch die damit verbundene Blattiefenverringerng struktuelle und auch wirtschaftliche Grenzen gesetzt.

Ein typischer Langsamläufer ist das amerikanische Windrad mit vielen Flüge aus gebogenen, einfachen Blechen. Die heute zur öffentlichen Elektrizitätsversorgung gebauten WEKs (GROWIAN, Projekte in den USA und Skandinavien) sind allesamt Schnellläufer.

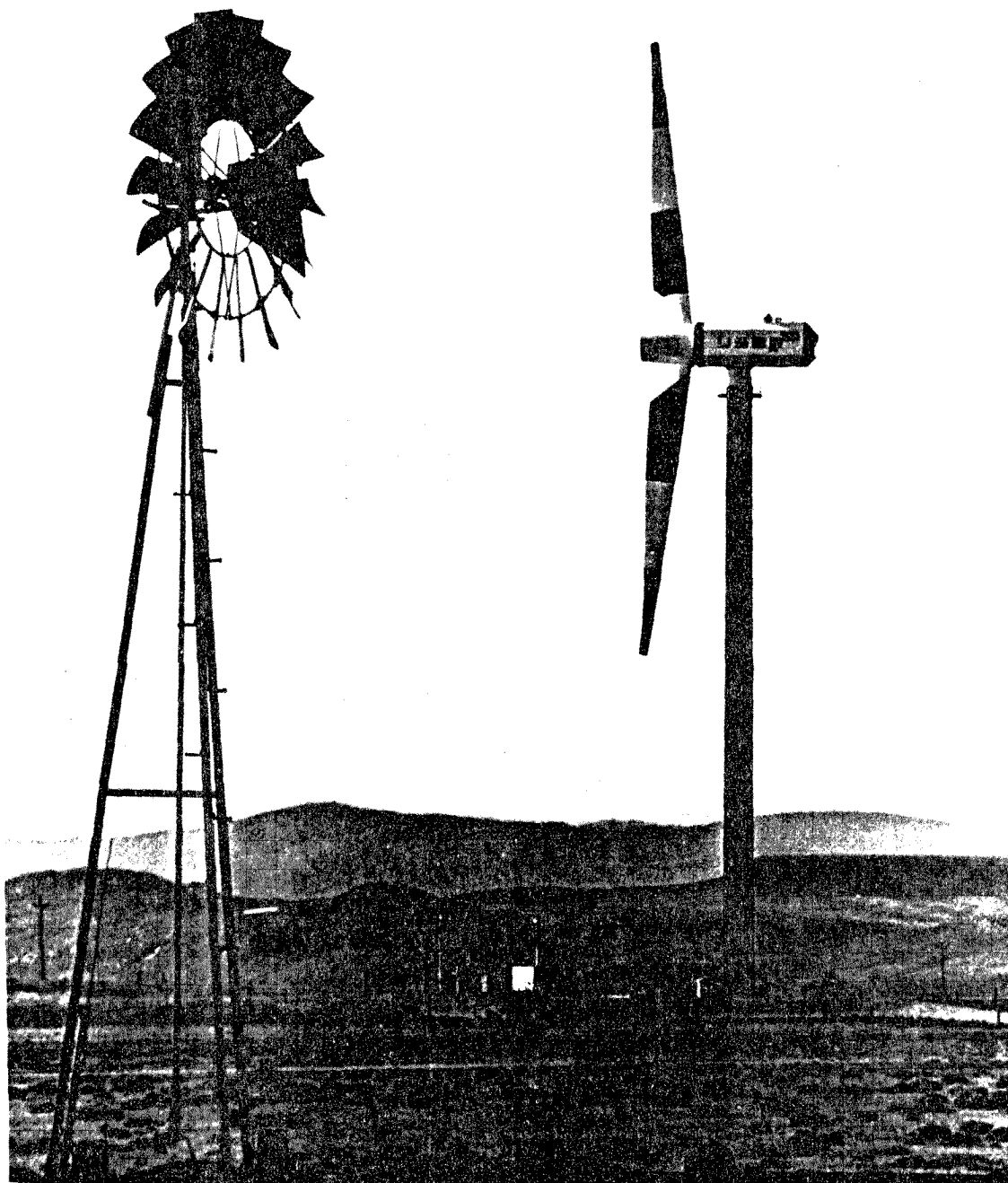


Abb. 4-15 Langsamläufer und 4 MW-Schnellläufer in Medicine Bow, Wyoming

5. DAS VERHALTEN AUSSERHALB DES ENTWURFBEREICHES

5.1 Das Anlaufen des Windrades

5.2 Das Leistungsverhalten des Windrades bei $\lambda_0 \neq \lambda_A$

Wir sind bisher von der Idealisierung einer stationären Strömung ausgegangen. Bei der Konstruktion des Windrades war der entscheidende Parameter die Auslegeschnellaufzahl λ_A . Durch eine entsprechende Regelung der Umdrehungszahl konnten wir damit - die Reynoldszahlabhängigkeit in erster Näherung vernachlässigend - jede Windgeschwindigkeit v_0 optimal nutzen:

$$\omega_A(v_0) = \frac{\lambda_A}{R} v_0 \quad (5.1)$$

Wir wollen nun betrachten, was passiert, wenn λ_0 von der Auslegeschnellaufzahl λ_A abweicht, also ζ nicht mehr ζ_{opt} ist. Zwei Fälle wollen wir gesondert behandeln

- 1) Aufgrund einer Windstille, Sturmabschaltung, ist $\lambda_0 = 0$. Wie ist das Anlaufverhalten des Windrades?
- 2) Wie ist das Leistungsverhalten des Windrades bei $0 \neq \lambda_0 \neq \lambda_A$, wenn sich also das Windrad nicht mit der Winkelgeschwindigkeit $\omega_A(v_0)$ dreht?

5.1 Das Anlaufen des Windrades

Während bisher die Leistung im Mittelpunkt stand, müssen wir uns jetzt mit dem Drehmoment beschäftigen, das ja für die Drehbewegung sorgt und sie bei der Leistungsabgabe aufrecht erhält. Auch hier führen wir wieder einen dimensionslosen "Drehmomentbeiwert" ein:

$$c_m : = \frac{M}{M_0} \quad (5.2)$$

Als Bezugsmoment M_0 definieren wir

$$M_0 : = \frac{P_0}{\left(\frac{v_0}{R}\right)} \quad (5.3)$$

das wir auch schreiben können als:

$$\begin{aligned} M_0 &= \frac{\frac{\rho}{2} v_0^3 \pi R^2}{\frac{v_0}{R}} \\ &= \frac{\rho}{2} v_0^2 \pi R^3 \end{aligned} \quad (5.4.)$$

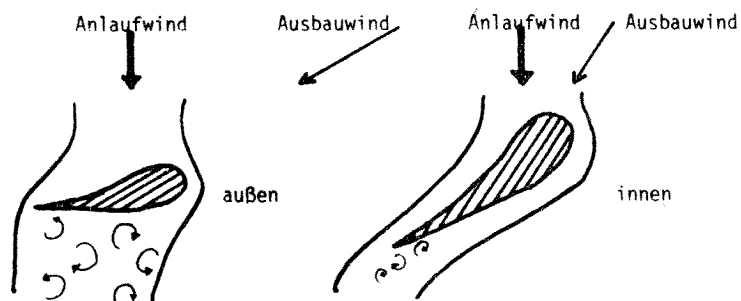
Diese scheinbar umständliche Definition hat den Vorteil, daß zwischen c_m und c_p folgender einfache Zusammenhang besteht:

$$c_m = c_p \cdot \frac{1}{\lambda} \quad (5.5)$$

Steht das Rad still, ergibt sich bei einsetzendem Wind folgende Situation:

Die Rotorblätter waren so ausgelegt, daß sie sich für die aus axialer Durchflußgeschwindigkeit \vec{v} und Umlaufgeschwindigkeit \vec{u} ergebende Anströmgeschwindigkeit \vec{w} optimal verhalten. Da jetzt $\vec{u} = \vec{0}$ ist, ist die Anströmgeschwindigkeit hier \vec{v} . Dies bedeutet vor allen Dingen: Der Anstellwinkel α des Profils ist so groß, daß es praktisch keinen Auftrieb, sondern fast nur Widerstand erfährt (Abb. 5-1).

Abb. 5-1
Strömungsverhalten am Rotorblatt beim Anfahren
("Ausbauwind" = wirksamer Wind bei $\lambda_0 = \lambda_A$)



Sehr ungünstig sieht es an den Blattspitzen aus, etwas günstiger durch die Verwindung des Flügels in Nabennähe. Hinzu kommt, daß hier auch die Angriffsfläche größer ist als an den Spitzen. So ist es also der Rotorblatteil in Nabennähe, der - bei genügend starkem Wind - für den Anlauf des Windrades sorgt. (Selbstverständlich sollte das Windrad in der Anlaufphase nicht belastet werden, d.h. das Drehmoment sollte zur (skalaren) Beschleunigung dienen und nicht zur Überwindung des Widerstandsmoments des angekoppelten Energiewandlers.)

Vergleicht man Langsam- und Schnellläufer im Anlaufverhalten, so zeigt der Langsamläufer ein günstigeres Anlaufverhalten. Wegen der geringen Umfangsgeschwindigkeit weichen Windrichtung und Anströmrichtung im Auslegefall nicht so stark voneinander ab. Auch die größere Angriffsfläche durch Flügelzahl und -tiefe bewirkt das hohe Anlaufdrehmoment. In Abb. 5-2 sind die Drehmomentbeiwerte verschiedener Rotortypen aufgetragen.

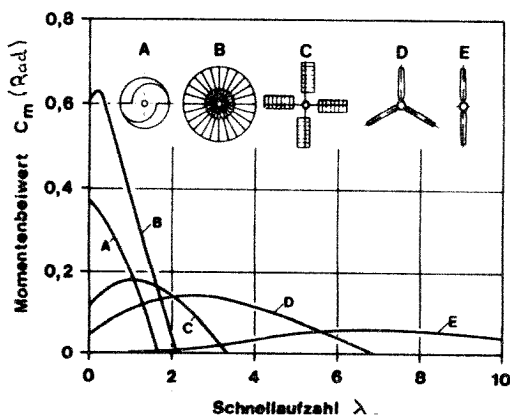


Abb. 5-2
Drehmomentbeiwerte verschiedener Rotortypen unter Berücksichtigung aller diskutierten Verlustfaktoren (siehe auch Abb. 5-5) (aus [14])

Während der energetisch ungünstigere Langsamläufer ohne Hilfe anläuft, sieht es schlecht bei den Schnellläufern aus. Will man auf einen Motor als Anlaufhilfe verzichten und nicht erst bei hohen Windgeschwindigkeiten den evtl. selbständigen Anlauf abwarten, bleibt noch die Blattwinkerverstellung übrig. Der Anströmwinkel α muß durch eine kontinuierliche Änderung von β in einen günstigeren c_a -Bereich gedreht werden (Abb. 5-3). Die damit erreichbaren "Nullmomentenbeiwerte" bei verschiedenen Schrängungswinkeln sind aus Abb. 5-4 zu ersehen.

Abb. 5-3
Flügel mit
Blattverstellung

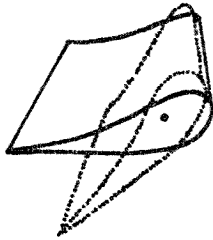
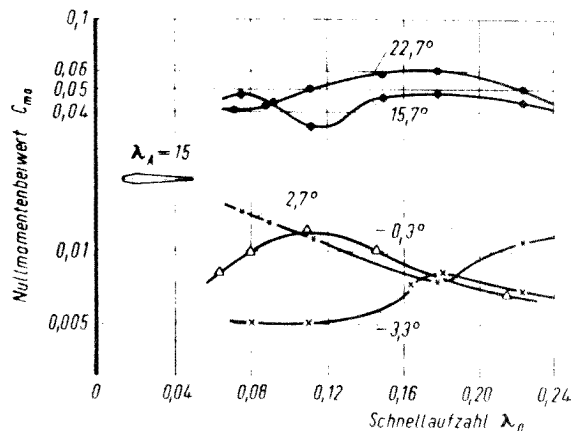
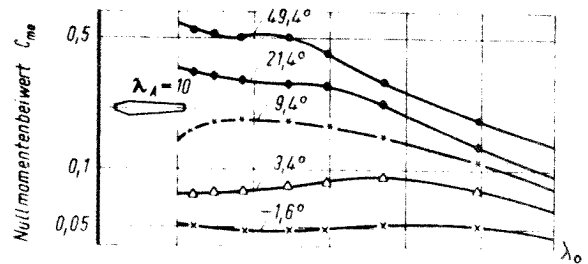
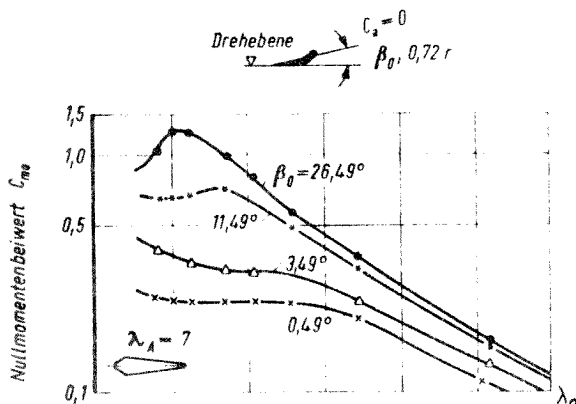


Abb. 5-4 a) - c)
Anlaufverhalten von Schnellläufern mit Blattverstellung
(aus [18])



Wir wollen jedoch hier nicht weiter auf die Möglichkeiten der Blatteinstellung eingehen. Erwähnt sei aber, daß sie sich auch als Leistungsregelung und Sturm-sicherung eignet.

5.2 Das Leistungsverhalten des Windrades bei $\lambda_0 \neq \lambda_A$

Betrachten wir noch einmal Abb. 4-14. Dort war unter der Annahme jeweils optimaler ζ_{opt} der maximale c_p -Wert als Funktion von λ_A angegeben. Diese optimale Abminderung ζ_{opt} der Windgeschwindigkeit war konstruktiv aber nur für ein $\lambda_0 = \lambda_A$ zu erreichen. Dieses λ_A wählten wir z.B. aus Abb. 4-14 unter Berücksichtigung unserer Möglichkeiten an Profiltüte und Blattzahl optimal. Weicht die Schnellaufzahl λ_0 des so gebauten Windrades aber von λ_A ab, so werden sich andere Kräfteverhältnisse am Blatt einstellen und das Leistungsverhalten bekommt etwa den in Abb. 5-5 gezeigten Verlauf.

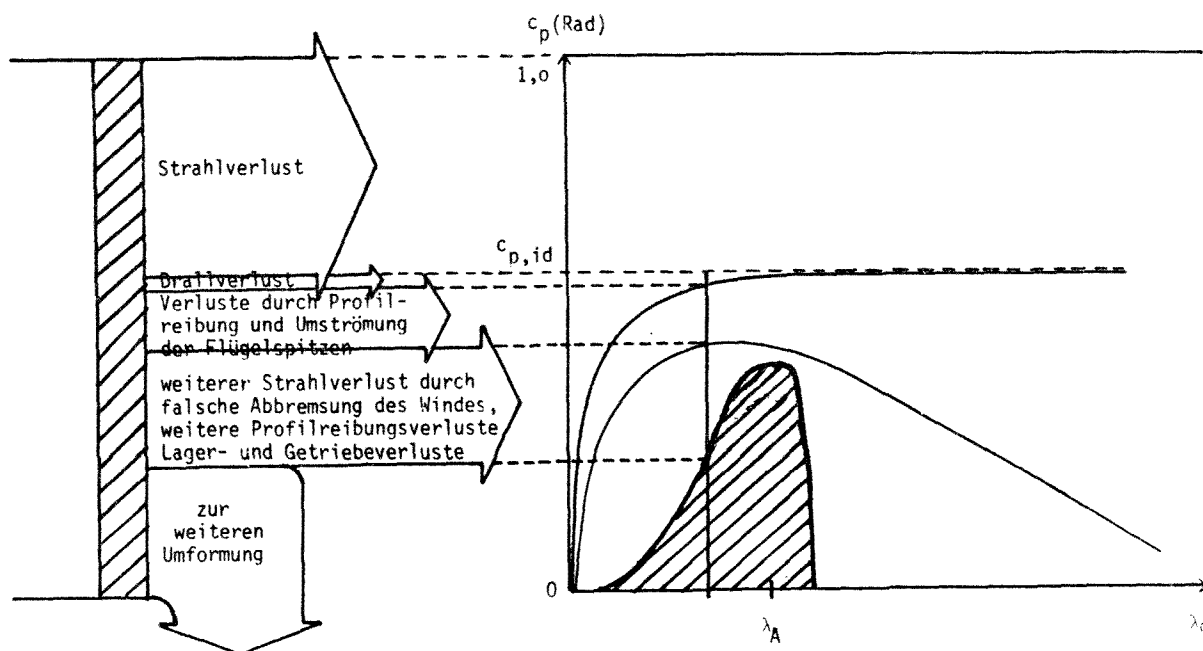


Abb. 5-5 Typisches Leistungsverhalten eines Schnellläufers

Auffällig ist der plötzliche Abfall der Kurve nach Überschreiten der Auslegeschnellaufzahl. Dies ist so zu erklären:

Bei zunehmender Schnellaufzahl wird der Anströmwinkel φ immer kleiner (Abb. 4-2). Das bedeutet aber, daß bei festem Schräkungswinkel β der Anstellwinkel α des Profils kleiner wird. Nach Überschreiten von λ_A wird also der Auftrieb geringer, wird Null und wirkt dann in die entgegengesetzte Richtung (vergl. Polardiagramm). Die Windmühle arbeitet dann als sogenannte "Propeller-Bremse", d.h. die Luft strömt dem Wind entgegen. Dieser Prozeß beginnt an den Flügelspitzen. Welchen Effekt die Veränderung des Schräkungswinkel (z.B. durch automatische Blattverstellung) hat, zeigt für verschiedene Auslegeschnellaufzahlen Abb. 5-6.

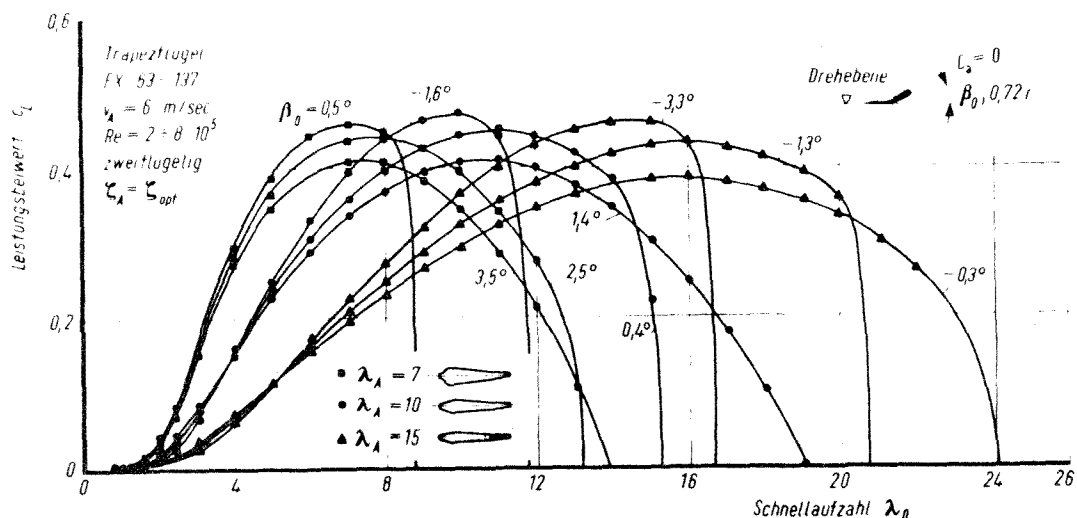


Abb. 5-6 Einfluß der Blattverstellung für verschiedene Auslegeschnellaufzahlen (aus [18])

6. DIE WEITERE UMFORMUNG DER WINDENERGIE

- 6.1 Die Regelung der Drehzahl
 a) Drehmoment und Leistung
 b) Betriebspunkte
 6.2 Die Wahl der Generatorleistung

Wir befinden uns jetzt an der "Nahtstelle" zwischen Windenergie und Verbraucher. Während auf der einen Seite ein unbeeinflussbares Angebot an Energie in Form von Rotationsenergie vorliegt, ist die Nachfrage auf der anderen Seite durch vielerlei Faktoren geprägt. Dreh- und Angelpunkt ist dabei die Energieform, in die die Windenergie weiter umgewandelt wird. Sie richtet sich nach

- der Art der Dienstleistung, die der Verbraucher wünscht,
- dem eigenen Aufwand ("Kosten"), den der Verbraucher dafür leisten muß,
- dem (windunabhängigen) Lebensrhythmus des Verbrauchers (→ Speichermöglichkeit).

Diese Punkte lassen sich noch in viele Teilprobleme zerlegen, deren Lösung größtenteils nicht mathematisch geschieht. Die meisten Probleme treten aber bei jeder Energiebereitstellung auf und so wollen wir hier nur auf zwei Punkte eingehen, die eine besondere Rolle bei der Windenergienutzung spielen. Dies ist einmal die Regelung der Windraddrehzahl und zum zweiten - für den speziellen Fall der elektrischen Energieform - die Wahl der Generatorleistung.

6.1 Die Regelung der Drehzahl

Drehzahl und Leistung eines Windrades stehen bei fester Windgeschwindigkeit in unmittelbarer Beziehung. Ein Abweichen von der sich aus λ_A ergebenden optimalen Drehzahl (siehe auch (5.1))

$$n_A(v_o) = \frac{\lambda_A}{2\pi R} v_o \left[\frac{u}{\text{sec}} \right] \quad (6.1)$$

ist nur in engen Grenzen möglich, will man den Wind auf ζ_{opt} abbremsen. Die Regelung der Drehzahl erfolgt aber über die angetriebene Arbeitsmaschine. Um zu sehen, wie dies geschieht, wollen wir uns nochmals mit dem an der Welle wirkenden Drehmoment beschäftigen.

a) Drehmoment und Leistung

Durch die Beziehung $P = M\omega$ stehen der Drehmomentenbeiwert c_m und der Leistungsbeiwert c_p in dem Zusammenhang

$$c_m(\lambda) = c_p(\lambda) \frac{1}{\lambda}$$

Trägt man beide Werte über der Schnellaufzahl auf, erhält man für einen Langsamläufer und einen Schnellläufer folgende Diagramme (siehe auch Abb. 5-2 und Abb. 5-5):

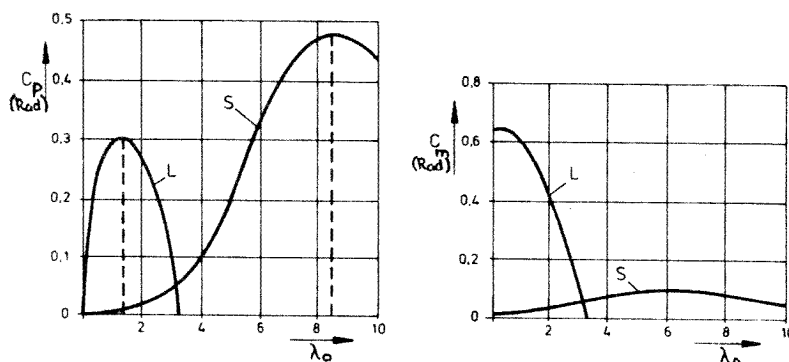


Abb. 6-1 a) und b)
Typische Leistungs- und Drehmomentbeiwerte von Langsamläufer (L) und Schnellläufer (aus [22])

Wählt man jetzt nicht die in der Windradtheorie hilfreiche Schnellaufzahl λ als Parameter, sondern die Drehzahl n und die Windgeschwindigkeit v_0 , erhält man die in Abb. 6-2 gezeigte Kurvenschar für das Drehmoment. Der Schnittpunkt der Kurven mit der gestrichelten Linie zeigt die Lage der jeweiligen Drehzahl $n_A(v_0)$ des Leistungsmaximums an.

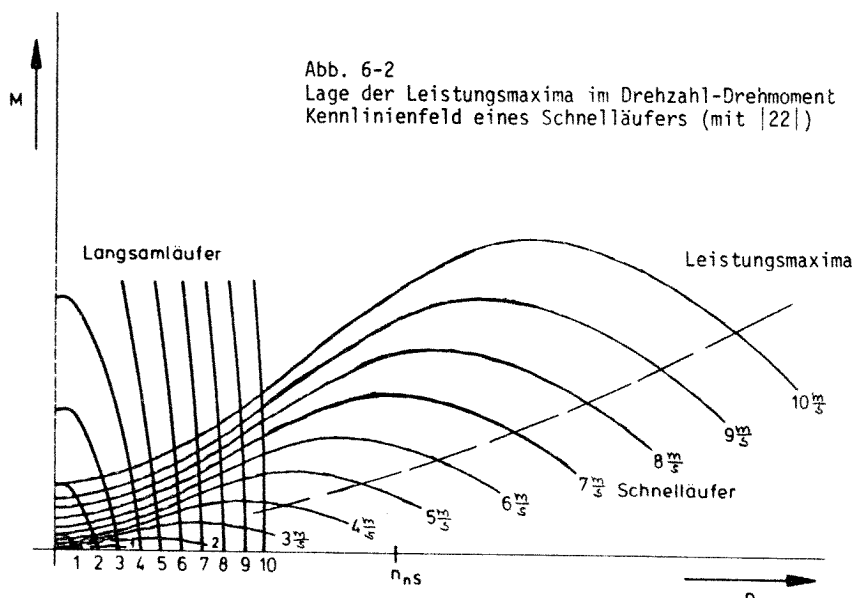


Abb. 6-2
Lage der Leistungsmaxima im Drehzahl-Drehmoment Kennlinienfeld eines Schnellläufers (mit [22])

b) Betriebspunkte

Die vom Windrad angetriebene Maschine setzt dem Windrad bei jeder Drehzahl ein ihr typisches Widerstandsdrehmoment entgegen ("Widerstandsdrehmoment-Drehzahl Kennlinie der Maschine") (Abb. 6-4). Das Windrad kann also seine Drehzahl nur dann steigern, wenn sein Antriebsdrehmoment M größer ist als das bremsende Widerstandsdrehmoment W der Maschine. Wenn M und W gleichgroß sind, bleibt die Drehzahl konstant. Um jetzt einen stabilen Betriebspunkt zu erhalten, muß sich das System bei Drehzahlschwankungen von selbst wieder auf diesen Betriebspunkt einpegeln. Dieses ist nur dann möglich, wenn die Kennlinie von W in diesem Punkt eine größere Steigung besitzt als die Kennlinie von M (Abb. 6-3).

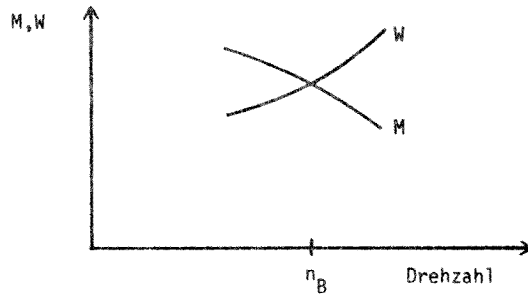
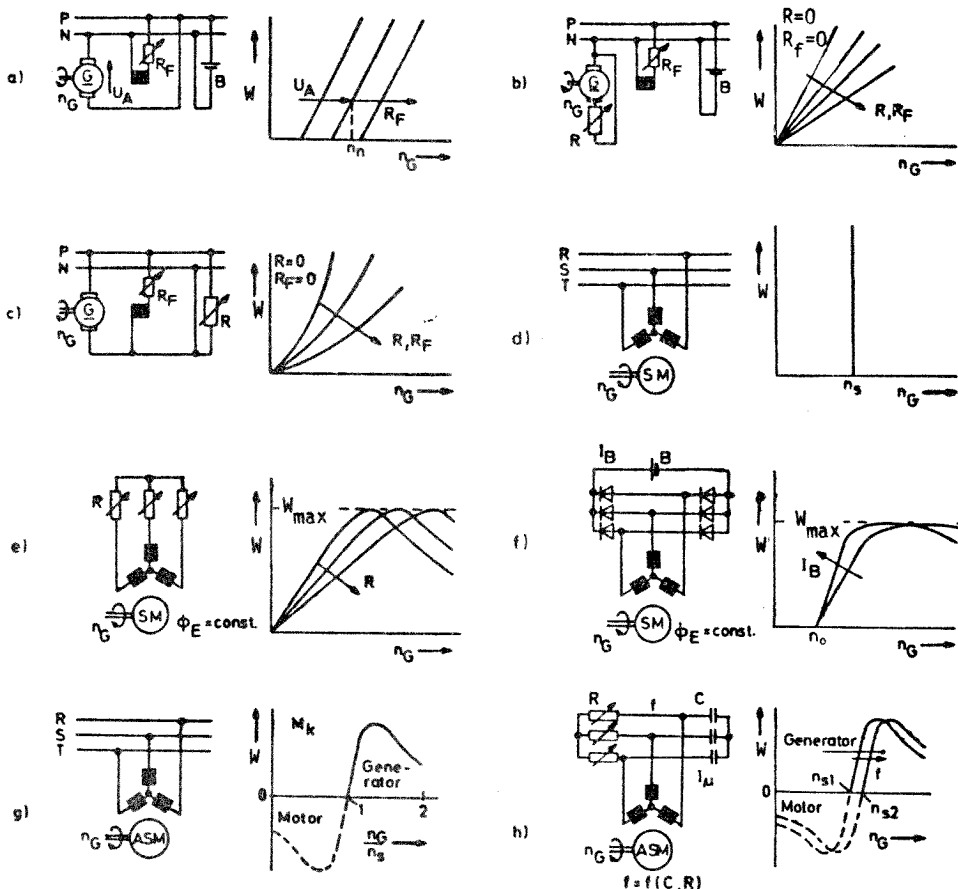


Abb. 6-3 Zur Veranschaulichung des stabilen Betriebspunktes

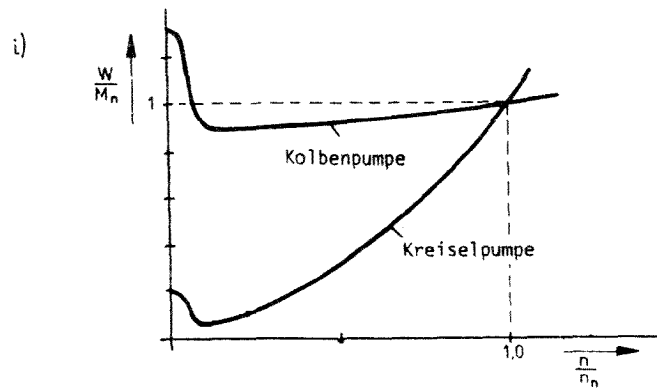
Wird nämlich die Drehzahl geringer, so ist $M > W$ und das Windrad kann wieder auf n_B beschleunigen. Ist $n > n_B$, wird das Windrad wegen $W > M$ solange gebremst, bis n_B wieder erreicht ist. Uns kommt es deshalb sehr zustatten, daß der maximale Leistungsbeiwert eines Windrades auf dem abfallenden Teil der Drehmomentkurve liegt (Abb. 6-2). Das schafft gute Voraussetzungen dafür, daß sich hier ein stabiler Betriebspunkt einstellen kann.

Ideal wäre nun natürlich, wenn sich jeweils genau dort stabile Betriebspunkte einstellen, wo auch die Leistungsmaxima liegen, wenn also die Widerstandsmoment-Kennlinie mit der gestrichelten Linie in Abb. 6-2 zusammenfällt. Betrachten wir dazu die Kennlinien einiger Arbeitsmaschinen (Abb. 6-4 a bis i).

Abb. 6-4 a) bis i) Drehzahl-Widerstandsmoment-Kennlinien verschiedener Arbeitsmaschinen (aus [22], [23])



Gleichstromgeneratoren, fremderregt bei Batterieladung (a) und bei Widerstandsbelastung (b), sowie selbsterregt mit Widerstandsbelastung (c);
 Synchrongeneratoren, am starren Drehstromnetz (d) sowie mit konstanter Erregung (z. B. durch Permanentmagnete) im Inselbetrieb bei Widerstandsbelastung (e) und Batterieladung (f);
 Asynchrongeneratoren, am starren Drehstromnetz (g) und im Inselbetrieb mit Kondensatorbatterie zur Lieferung des Blindstromanteils der Magnetisierungsenergie (h)



Die Anpassungsproblematik wollen wir an zwei Beispielen verdeutlichen.

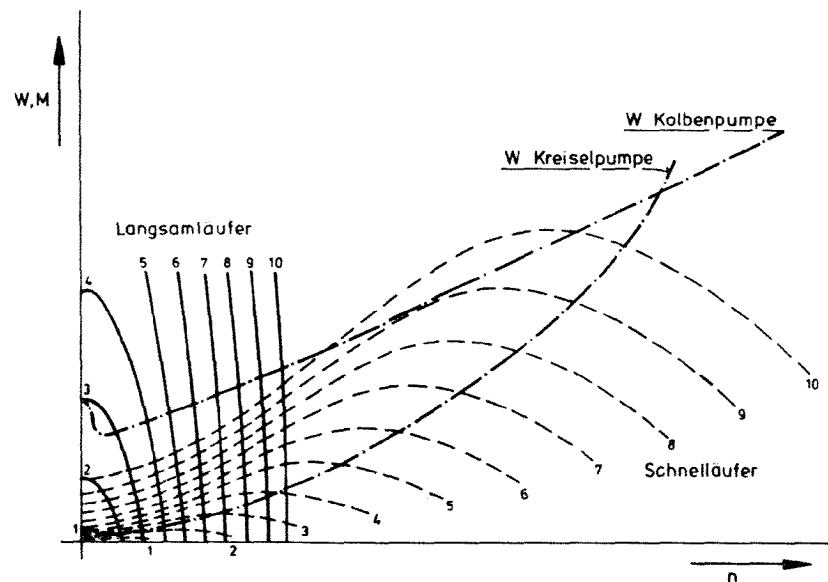


Abb. 6-5 Widerstandsmoment-Kennlinie einer Kolben- und einer Kreiselpumpe in den Drehzahl-Drehmoment-Kennlinienfeldern eines typischen Langsamläufers und eines typischen Schnellläufers (aus [22])

In Abb. 6-5 sind die Widerstandsmoment-Kennlinien einer Kreisel- und einer Kolbenpumpe in die Kennlinienfelder eines Langsam- und eines Schnellläufers eingetragen.

Dabei ergibt sich für die Kolbenpumpe:

- Der Langsamläufer läuft bereits bei $v_0 = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ an und findet im gesamten Geschwindigkeitsbereich darüber stabile Betriebspunkte.
- Der Schnellläufer läuft ohne Anlaufhilfe nicht an und findet auch erst bei $v_0 = 10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ einen stabilen Betriebspunkt.

Für die Kreiselpumpe ergibt sich:

- Der Langsamläufer beginnt schon bei $v_0 = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ zu arbeiten. Allerdings findet er seine Betriebspunkte erst in einem Bereich, in dem der Leistungsbeiwert des Windrades sehr klein ist.
- Der Schnellläufer hat zwar auch hier sein typisches Problem, alleine anzulaufen, jedoch geschieht es hier immerhin schon bei $v_0 = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$. Die stabilen Betriebspunkte stellen sich ungefähr im Leistungsoptimum ein.

Das nächste Beispiel soll den Einfluß der Windhäufigkeitsverteilung auf die Anpassung beleuchten.

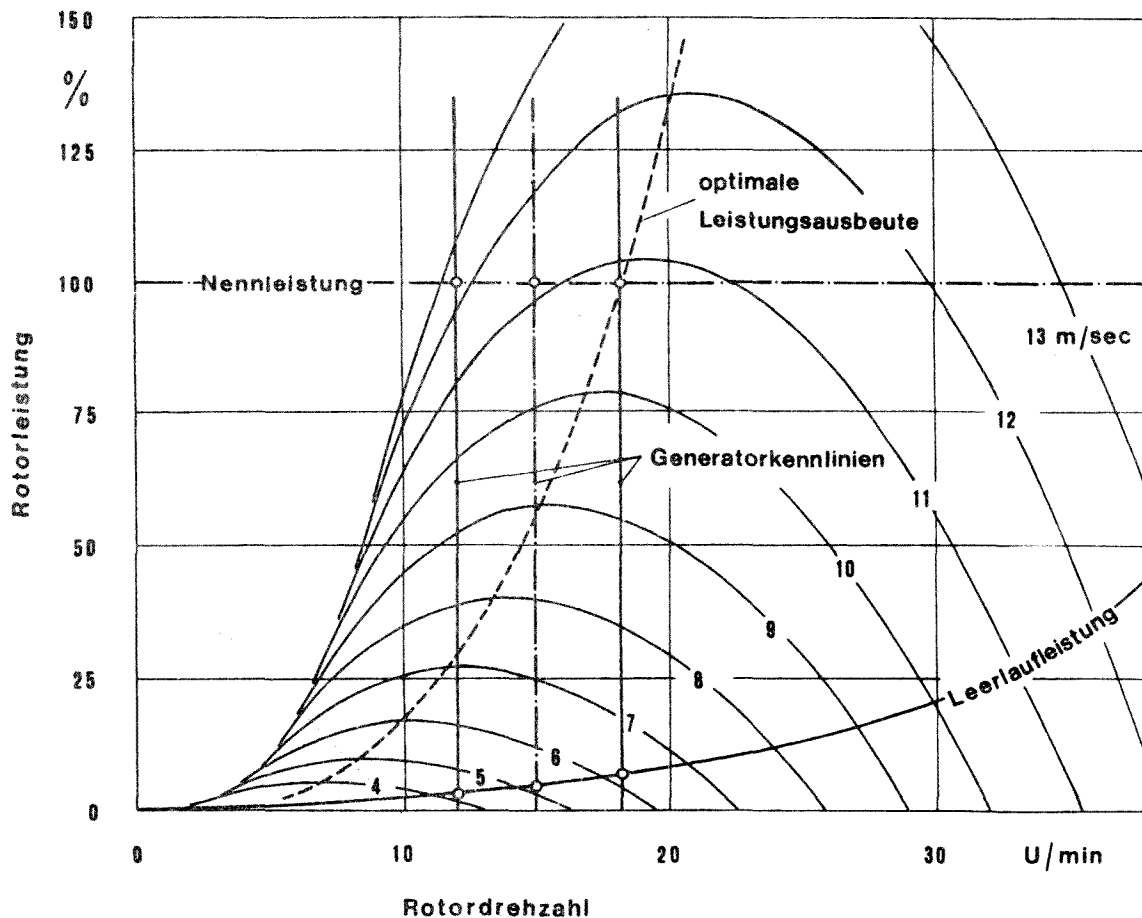


Abb. 6-6 Drehzahl-Leistungskennlinienkennfeld einer Windkraftanlage mit den Kennlinien dreier Synchrongeneratoren (aus [14])

In Abb. 6-6 sind die Leistungs-Kennlinien von drei auf ein starres Netz arbeitender Synchrongeneratoren in das Leistungskennlinienfeld eines Windrades eingetragen. Auf den ersten Blick mag man sich nun für den Generator entscheiden, dessen Kennlinie die Nennleistung mit der niedrigsten Windgeschwindigkeit beim optimalen Leistungsbeiwert erreicht (also etwa die rechte Kennlinie). Tatsächlich ergeben sich dann aber bei niedrigen Windgeschwindigkeiten viel schlechtere Ausnutzungsgrade als z.B. bei der mittleren Kennlinie. Hier muß man einfach probieren, welche Kennlinie unter Berücksichtigung der Häufigkeitsverteilung des Windes (Abb. 1-11) und der stabilen Betriebspunkte zum höchsten Jahresenergieertrag führt. Hütter | 16 | gibt bei richtiger Wahl der Synchronisationsdrehzahl einen jährlichen Verlust von nur 4 - 6 % gegenüber dem Optimum an, das bei variabler Drehzahl erreicht wird.

6.2 Die Wahl der Generatorleistung

Die meisten heute eingesetzten Energieumformer für elektrische Energie sind rotierende Maschinen. Die nötige Drehbewegung wird dabei meist über einen thermodynamischen Prozeß erreicht und so arbeitet der Umformer mit einem dementsprechend schlechten Wirkungsgrad. Sieht man sich nun die rotierende Welle unseres Windrades an, liegt es eigentlich nahe, hier einen Generator anzuschließen. Das Windrad wird man meist als Schnellläufer auslegen, um die Getriebekosten und -verluste für die Übersetzung in den Drehzahlbereich des Generators möglichst niedrig zu halten.

Näher beschäftigen soll uns aber hier ein Teilaspekt, der eng mit dem schwankenden Windenergieangebot zusammenhängt: Die Wahl der Generatornennleistung. Diese Wahl hat nämlich einerseits entscheidenden Einfluß auf den Energieertrag unserer Anlage, andererseits auch auf die Größe der Energieangebotsschwankung. Dazu wollen wir uns die Leistungsdauer-Kennlinie eines WEK angucken.

Die Leistungsdauer-Kennlinie erhält man aus der Windhäufigkeitsverteilung und der vom WEK bei den jeweiligen Windgeschwindigkeiten abgegebenen Leistung (Abb. 6-7).

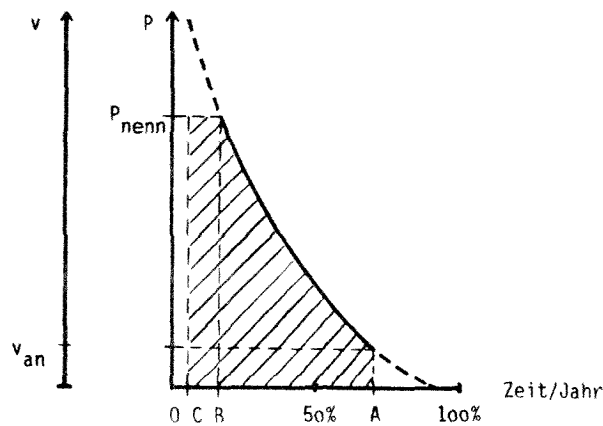


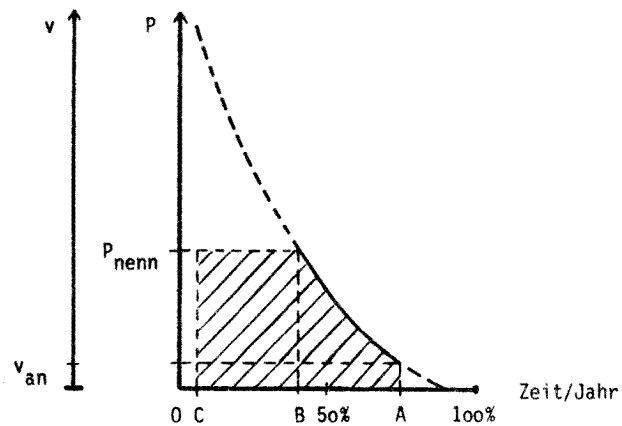
Abb. 6-7
Leistungsdauerkennlinie
und Jahresenergieertrag

Abhängig von der Konstruktion des Windrades und Reibungs- und Anpassungsverlusten beginnt das Windrad erst ab einer bestimmten Windgeschwindigkeit v_{an} an, Leistung abzugeben. In der Zeit, in der die Windgeschwindigkeit kleiner als v_{an} ist, wird keine Leistung abgegeben (rechts vom Punkte A in Abb. 6-7). Im Zeitraum zwischen A und B wird die angebotene Leistung voll genutzt. Zwischen B und C arbeitet der Generator mit seiner Nennleistung. Die restliche Leistung wird dann "wegeregelt". Dies kann z.B. durch Verstellen der Windradebene erfolgen oder durch eine Pitchwinkelverstellung. In den Zeiten mit sehr hohen Windgeschwindigkeiten wird das Windrad aus Sicherheitsgründen abgeschaltet (links von C).

Der jährliche Energieertrag ist aus der schraffierten Fläche ablesbar. Er wird umso höher, je größer die Generatornennleistung ist. Gleichzeitig ist das Energieangebot in weiten Grenzen schwankend und auch die Anlaufgeschwindigkeit wird durch die höheren Reibungs- und Anpassungsverluste höher liegen.

Wählt man eine geringere Nennleistung, wird sich die Dauer einer konstanten Leistungsabgabe - dem Zeitraum zwischen B und C entsprechend - vergrößern. Dieses geschieht auf Kosten des Jahresenergieertrages (Abb. 6-8).

Abb. 6-8
Leistungsdauerkennlinie
und Jahresenergieertrag
bei kleinerer Nennleistung
des Generators



Die Entscheidung, wie nun ein Generator auszulegen ist, ist auch hier wieder von vielen Faktoren abhängig. Ein großer Generator ist teurer und bringt durch seine größere Masse auch Stabilitätsprobleme mit sich. Außerdem will die anfallende Energie auch sofort abgenommen werden. Speicher zur Glättung des Angebotes kosten wiederum Geld. Auf der anderen Seite will man natürlich auch nicht unser so mühevoll entworfenes Windrad so einfach aus den Wind drehen und vom maximalen Leistungsbeiwert entfernt laufen lassen. Wirtschaftliche Faktoren werden bei dem zu findenden Kompromiß sicher eine große Rolle spielen.

Damit wollen wir auch zu einem Ende kommen bei unserer Beschäftigung mit der Nutzung der Windenergie.

Selbst bei der Beschränkung auf die physikalisch/technologischen Aspekte wurde so manches nur kurz oder gar nicht erwähnt. Dabei ist aber wohl deutlich geworden, daß eine Windmühle eine so triviale Maschine nicht ist, wie man vielleicht aufgrund ihres Alters meinen mag. Aber vieles lernt der Mensch eben beim Umgang mit den Dingen und vollbringt so Leistungen, die umso beachtenswerter erscheinen, je mehr man sie theoretisch erfaßt.

Insofern möge das Praktikum auch in dieser Hinsicht seinen Zweck erfüllen.

7. VERZEICHNIS DER BENUTZTEN SYMBOLE

Kräfte

F_A	Auftriebskraft (S.20)	} ~ bzgl. Radelement (S.37) * bzgl. Blattelement
F_L	Luftkraft (S.19)	
F_W	Widerstandskraft (S.20)	
S	Luftkraftkomponente in Achsrichtung (S.30)	
S^*	Gegenkraft zu S (S.30)	
T	Luftkraftkomponente in der Rotorebene (S.37)	

Geschwindigkeiten

u	Umdrehungsgeschwindigkeit des Rotorblattes im Abstand r (S.34/37)	
v_0	} weit vor dem Windrad kurz vor dem Windrad in der Windradebene (S.29) kurz hinter dem Windrad weit hinter dem Windrad	
v_1		
v		Geschwindigkeit der Strömung
v_2		
v_3		
w	Anströmgeschwindigkeit an das Profil (S.19/37)	

Geometrische Größen

A	Fläche (S.19/29)
a	Abstand der Flügelspitzen voneinander (S.43)
b	Luftstreifenbreite (S.43)
Δr	Breite eines Blatt/Radelements (S.36)
R	Flügelradius
r	Abstand von der Nabe
R_{red}	reduzierter Radius (S.43)
r_{typ}	typischer Radius (S.46)
r_i	Abstand Nabe - Flügelende
t	Flügel/Profiltiefe (S.24)
t_{opt}	optimale Flügeltiefe (S.39)
α	Anstellwinkel (S.24/40)
β	Schränkungswinkel (S.40)
β_0	Pitchwinkel (S.41)
$\Delta \beta$	Verwindungswinkel (S.41)
γ	s.S. 25 und in anderer Bedeutung S.37
φ	Anströmwinkel (S.37)

Sonstige Symbole

c	Luftkraftbeiwert (S.19)
c_a	Auftriebsbeiwert (S.20)
c_w	Widerstandsbeiwert (S.20)
c_m	Drehmomentbeiwert (S.48)
c_p	Leistungsbeiwert (S.32)
$c_{p, id}$	idealer Leistungsbeiwert (S.32)
$c_{p, \zeta_{opt}}$	Leistungsbeiwert unter Berücksichtigung von Verlustfaktoren, jedoch bei optimaler Windabbremung (S.45)
E	Gleitzahl (S.25)
f	Blattzahlkorrekturfaktor (S.44)
L	Drehimpuls (S.34)
M	Drehmoment (S.34)
M_0	Bezugsdrehmoment (S.48)
n	Drehzahl
$n_A(v_0)$	optimale Drehzahl (S.52)
n_B	Betriebspunktdrehzahl (S.54)
Re	Reynoldszahl (S.26)
P	Leistung
P_0	maximale Leistung des Windes (S.32/11)
p	statischer Druck - Indizes siehe bei "Geschwindigkeiten"
W	Widerstandsmoment (S.53)
z	Flügelzahl (S.38/43)
Γ	Zirkulation (S.22/43)
ζ	Abminderungsverhältnis (S.31)
$\eta(\zeta)$	Abbremsungswirkungsgrad (S.31)
$\eta(L)$	Drallverlustfaktor (S.35)
$\eta(E)$	Profilreibungsverlustfaktor (S.42)
$\eta(z)$	Blattzahlverlustfaktor (S.44)
Λ	Streckungsverhältnis (S.25)
λ	(örtliche) Schnelllaufzahl (S.34)
λ_0	Schnelllaufzahl(an den Flügelspitzen) (S.34)
λ_A	Auslegeschnelllaufzahl (S.34/39)
λ_a	(örtliche Schnelllaufzahl im Auslegefall (S.34)
ν	Zähigkeit (S.26)
ρ	Dichte (S.11)
ω	Winkelgeschwindigkeit
$\omega_A(v_0)$	Winkelgeschwindigkeit im Auslegefall (S.48)

8. LITERATUR

ENERGIE ALLGEMEIN

- | 1| J.Varchmin/J.Radkau: Kraft, Energie und Arbeit - Energie und Gesellschaft , Hamburg 1981
- | 2| K.M.Meyer-Abich: Energieeinsparung als neue Energiequelle , München 1979
- | 3| M.K.Hubbert: The Energy Resources of the Earth , Scientific American Vol.225/3 Sept.1971
- | 4| P.Schnell/M.Dehli: Wege der Energie , Broschüre der Informationszentr.d.Elektrizitätswirtsch.

OBERBLICKE WINDENERGIE

- | 5| J.Fricke/W.L.Borst:"Windenergie" in Energie - Ein Lehrbuch der physikal. Grundlagen , München 1981
- | 6| BMFT: Nutzung der Windenergie , Frankfurt am Main 1976
- | 7| J.Grewen: Informationspaket Nutzung der Windenergie , Karlsruhe 1982

WINDMOHLEN UND IHRE GESCHICHTE

- | 8| E.u.W.Fröde: Windmühlen - Energiespender u. ästhet. Architektur , Köln 1981

METEOROLOGIE UND WINDENERGIENUTZUNG

- | 9| M.Meliß: Ergebnisse der deutschen Windenergiestudie , in "Energie vom Wind" ,U.Bossel (Hrg) München 1977

AERODYNAMIK

- |10| F.Dubs: Aerodynamik der reinen Unterschallströmung , Stuttgart 1966
- |11| I.Abbot/A.von Doenhoff: Theory of Wing Sections , New York 1949
- |12| L.Prandtl: Strömungslehre , Braunschweig 1944
- |13| L.Bergmann/Cl.Schaefer: Lehrbuch der Experimentalphysik Bd.I , Berlin 1965

WINDRADTHEORIE

- |13| A.Betz: Windenergie und ihre Ausnutzung durch Windmühlen , Göttingen 1926
- |14| J.-P.Molly: Windenergie in Theorie und Praxis , Karlsruhe 1978
- |15| U.Hütter: Beitrag zur Schaffung von Gestaltungsgrundlagen für Windkraftwerke , Dissertation TH Wien 1942
- |16| U.Hütter: Die aerodynamische Auslegung der Flügelblätter von Windturbinen hoher Schnelllaufzahl, Mitteilungen der Studiengesellschaft Windkraft e.V. 1960
- |17| U.Hütter: Optimum Wind-Energy Conversion Systems in "Ann. Rev. Fluid Mech.1977 9"
- |18| W.Weber: Die optimale Auslegung rotierender Flügel für horizontale Windenergiekonverter , in Z.Flugwiss.23 (1975) Heft 12

LUFTSCHRAUBENTHEORIE

- |19| H.Glauert: Airplane Propellers , in W.F.Durand "Aerodynamic Theory Vol. IV" , Berlin 1935
- |20| F.Weinig: Aerodynamik der Luftschraube , Berlin 1940
- |21| L.Prandtl: Zusatz zu A.Betz "Schraubenpropellor mit geringstem Energieverlust" in "Vier Abhandlungen zur Hydrodynamik und Aerodynamik" , Göttingen 1927

UMFORMUNG DER WINDENERGIE

- |22| S.Heier: Windenergiekonverter und mechanische Energiewandler: Anpassung und Regelung in U.Bossel (Hrg.) "Energie vom Wind" München 1977
- |23| H.K.Köthe: Praxis solar- und windelektrischer Energieversorgung, Düsseldorf 1982