

## KAPITEL 03 – Bauformen und Aerodynamik von Windkraftanlagen

Windkraftanlagen lassen sich hinsichtlich ihrer **konstruktiven Bauweise** und nach ihrer **aerodynamischen Wirkungsweise** unterscheiden.

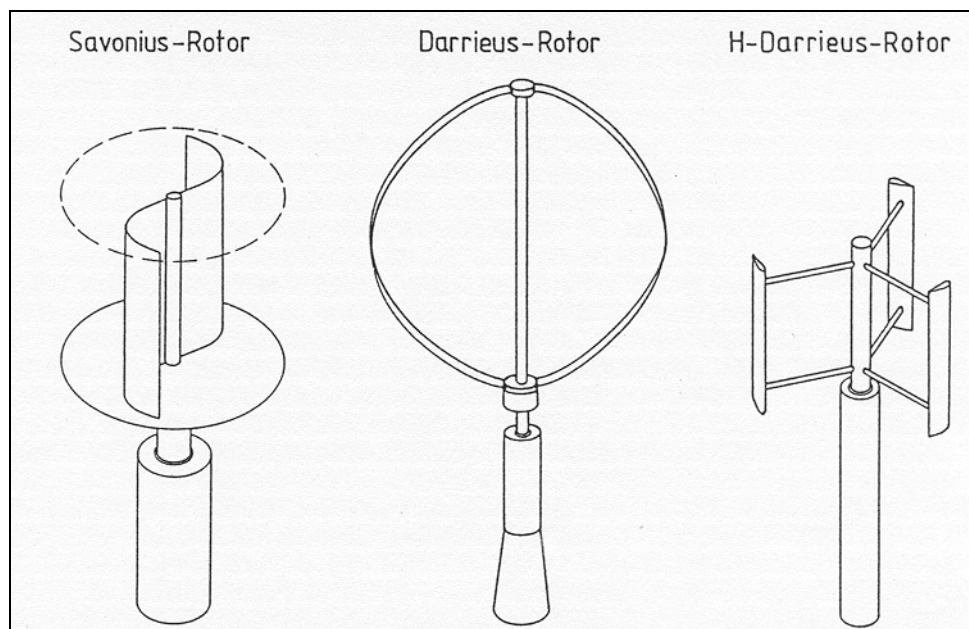
### 03.1 Konstruktive Bauformen

Ein grundlegendes Unterscheidungsmerkmal von Windkraftanlagen ist die Anordnung ihrer Drehachse.

#### 03.1.1 Vertikalläufer

Beim Vertikalläufer läuft der Rotor an einer senkrechten Welle und arbeitet somit unabhängig von der Windrichtung. Windkraftanlagen mit vertikaler Drehachse stellen die älteste Rotorbauart dar. Sie wurden ursprünglich als reine Widerstandsläufer ausgeführt. Erst in neuerer Zeit wurden Vertikalläufer entwickelt, welche auch den Auftrieb effektiv nutzen.

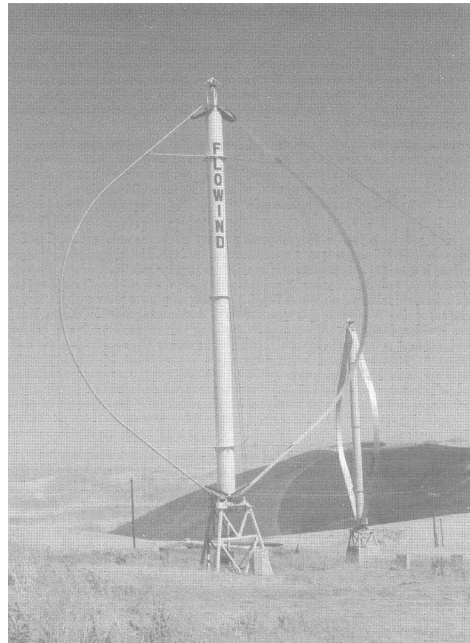
Den Vorteilen dieser Rotorbauart, wie der Windrichtungsunabhängigkeit, der einfachen Bauart, oder dem einfachen Maschinenaufbau mit den leicht zugänglich in Bodennähe befindlichen mechanischen und elektrischen Komponenten, stehen jedoch auch einige Nachteile gegenüber. Als reiner Schnellläufer ausgeführt, ist dieser Rotor unfähig, aus eigener Kraft anzulaufen; es bestehen kaum Möglichkeiten, Regulationsmaßnahmen am Rotor (z.B. Blattverstellung) zu setzen, und in der Praxis zeigen sich beim Betrieb dieser Rotorbauart immer wieder Probleme mit Eigenschwingungen und Materialermüdung.



*Rotorformen mit vertikaler Drehachse*



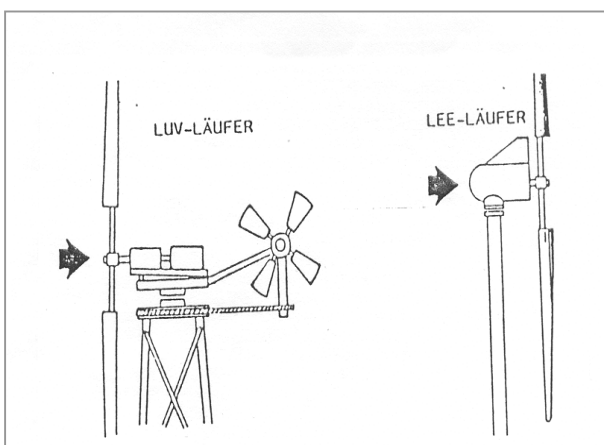
Savonius-Rotor im Eigenbau



2-Blatt Darrieus, Fa. Dornier

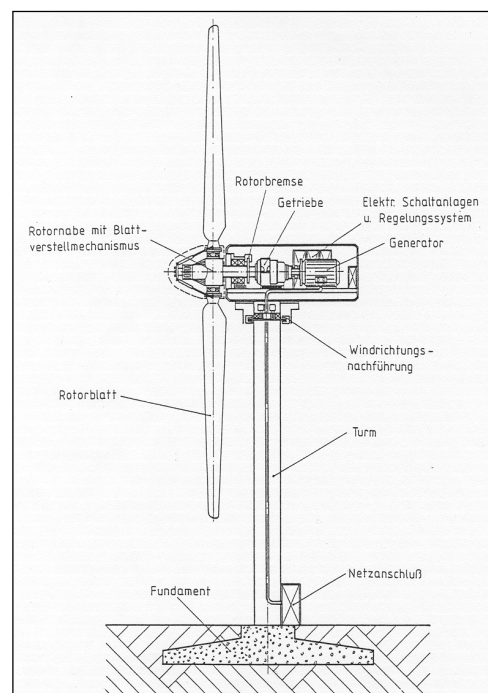
### 03.1.2 Horizontalläufer

Windkraftanlagen mit horizontaler Lage der Drehachse werden als Horizontalläufer bezeichnet. Als Vorzüge dieser Bauart können die hohe technische Reife der einzelnen Komponenten, die zufrieden stellenden Wirkungsgrade und die Beherrschbarkeit der regelungstechnischen und schwingungsdynamischen Probleme genannt werden. Horizontalläufer können grundsätzlich als Luvläufer oder Leeläufer ausgeführt werden. Die Horizontalwindkraftanlage ist die am meisten verbreitete Technologie, derzeit werden nahezu 100% der am Markt angebotenen Anlagen in dieser Bauweise konzipiert.



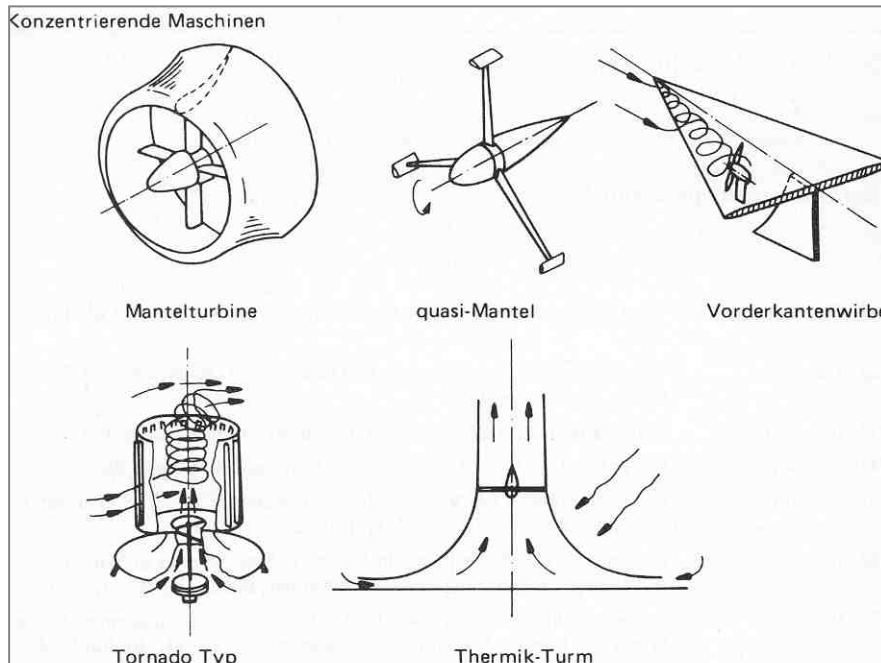
Rotorbauart mit horizontaler Drehachse

Schema einer Horizontalachs-Windkraftanlage



### 03.1.3 Sonderformen

Vorrichtungen, welche die kinetische Energie der Luftströmung in mechanische Arbeit umsetzen, sind in großer Vielfalt denkbar und in den skurrilsten Formen vorgeschlagen worden. In den meisten Fällen bleibt jedoch die praktische Verwendbarkeit dieser Anlagen weit hinter den Erwartungen zurück.



Sonderformen von Windkraftanlagen

## 03.2 Aerodynamik von Windkraftanlagen

Der Rotor einer Windkraftanlage hat die Aufgabe, das Leistungsvermögen der bewegten Luft zu sammeln und in eine vom mechanischen Triebstrang nutzbare Drehbewegung umzuformen. Das Leistungsvermögen bewegter Luft berechnet sich aus der Luftmasse, die in einer bestimmten Zeit eine bestimmte Fläche durchströmt. Das Windrad soll dieser bewegten Luft möglichst viel Energie entziehen.

### 03.2.1 Kinetische Energie und Leistung des Windes

Allgemein gilt für die kinetische Energie einer bewegten Masse  $m$  mit der Geschwindigkeit  $v$ :

$$(1) \quad E = \frac{m}{2} v^2 \quad [E] = \text{kg} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2} = \text{Nm} = \text{Joule} = \text{J}$$

Die Leistung  $P$  ergibt sich aus der Ableitung der Energie nach der Zeit  $\dot{E} = \frac{dE}{dt}$  und für fließende Medien

wie Luft aus dem Massenfluss  $\dot{E} = \frac{\dot{m}}{2} v^2$ :

$$(2) \quad P = \dot{E} = \frac{\dot{m}}{2} v^2 \quad [P] = \frac{\text{Nm}}{\text{s}} = \text{Watt} = \text{W}$$

Mit dem Massenfluss

$$(3) \quad \dot{m} = \rho \cdot v \cdot A \quad [m] = \frac{kg}{s}$$

mit  $\rho$  als Luftdichte in  $\frac{kg}{m^3}$  und  $A$  als Kontrollfläche senkrecht zur anströmenden Luft ergibt sich die Leistung des Windes mit:

$$(4) \quad P = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3$$

Für die Standardatmosphäre (Lufttemperatur 15°C und Luftdruck 1013.3 hPa) beträgt die Luftdichte 1.225 kg/m<sup>3</sup>.

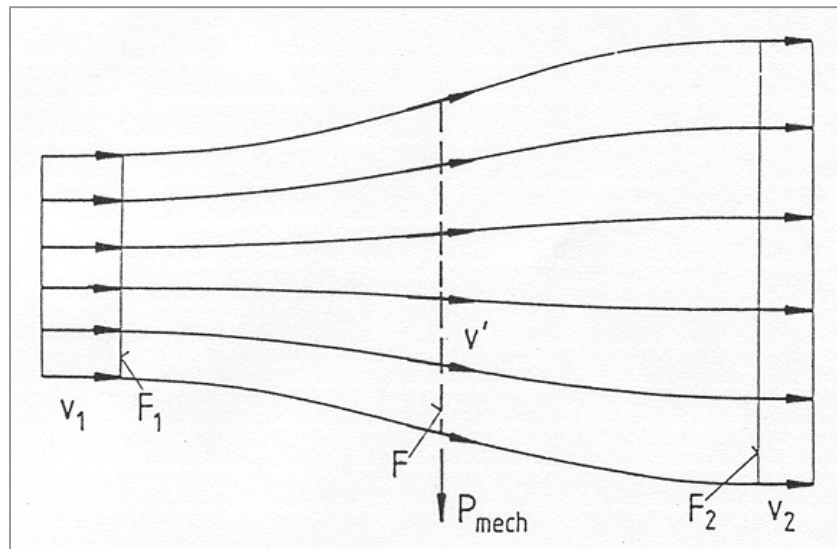
### 03.2.2 Leistungsentnahme aus dem Wind

Der Vorgang der Umwandlung der Energie des bewegten Luftstromes in mechanische Arbeit folgt einer grundlegenden Gesetzmäßigkeit. Der deutsche Luftfahrttechniker Albert Betz konnte in seinen 1920 - 1925 erschienenen Schriften nachweisen, dass die einem Luftstrom entnehmbare mechanische Leistung auf einen bestimmten Wert im Verhältnis zu der im Luftstrom enthaltenen Leistung begrenzt ist. Die mechanische Leistung, die der Wandler dem Luftstrom entzieht, entspricht der Leistungsdifferenz des Luftstromes vor und hinter dem Wandler. Da der Entzug von mechanischer Leistung nur auf Kosten der im Windstrom enthaltenen kinetischen Energie möglich ist, heißt dies bei unverändertem Massenstrom, dass die Geschwindigkeit hinter dem Wandler abnehmen muss.

Bremst die Windkraftanlage den Luftstrom zu wenig, strömt ein Teil der bewegten Luft bei schlechtem Wirkungsgrad des Rotors ungenutzt hindurch. Wird der Luftstrom durch den Rotor zu sehr gebremst, ist die Luft gezwungen, seitlich auszuweichen. Bei 100%iger Nutzung der Energie des Windes müsste daher die bewegte Luft durch das Windrad von der vollen Geschwindigkeit auf Stillstand gebremst werden und der Energiefluss würde dadurch gänzlich zum Stillstand kommen. Der Impulstheorie von Albert Betz zufolge erreicht der Leistungsbeiwert des Rotors dann ein Maximum, wenn die Geschwindigkeit auf etwa 1/3 abgebremst wird. Der Leistungsbeiwert erreicht in diesem Fall mit 16/27 sein Maximum. Dieser ideale Leistungsbeiwert wird auch als "Betz'scher-Faktor" bezeichnet.

#### 03.2.2.1 Rotorleistung

Bedingt durch die Entnahme kinetischer Energie durch die WEA ist die Geschwindigkeit  $v_2$  hinter dem Rotor kleiner als die ungestörte Anströmgeschwindigkeit  $v_1$ . Unter der Annahme konstanter Luftdichte  $\rho$  (gilt für Geschwindigkeiten kleiner als 100 m/s), weitet sich die Stromröhre mit abnehmender Strömungsgeschwindigkeit auf.



Prinzipielle Leistungsentnahme einer WKA aus dem Wind

Per Definition wird kein Massenstrom durch die Wände der Stromröhre zugelassen. Bei inkompressibler Strömung muss die vor dem Rotor eintretende Luftmenge gleich der hinter dem Rotor austretenden Luftmenge sein. Die so genannte Kontinuitätsbedingung für die Schnitte vor, im und hinter dem Rotor ergeben für jede Stelle ein konstantes Produkt aus der Geschwindigkeit und der jeweiligen Kontrollfläche (Kontinuitätsgleichung):

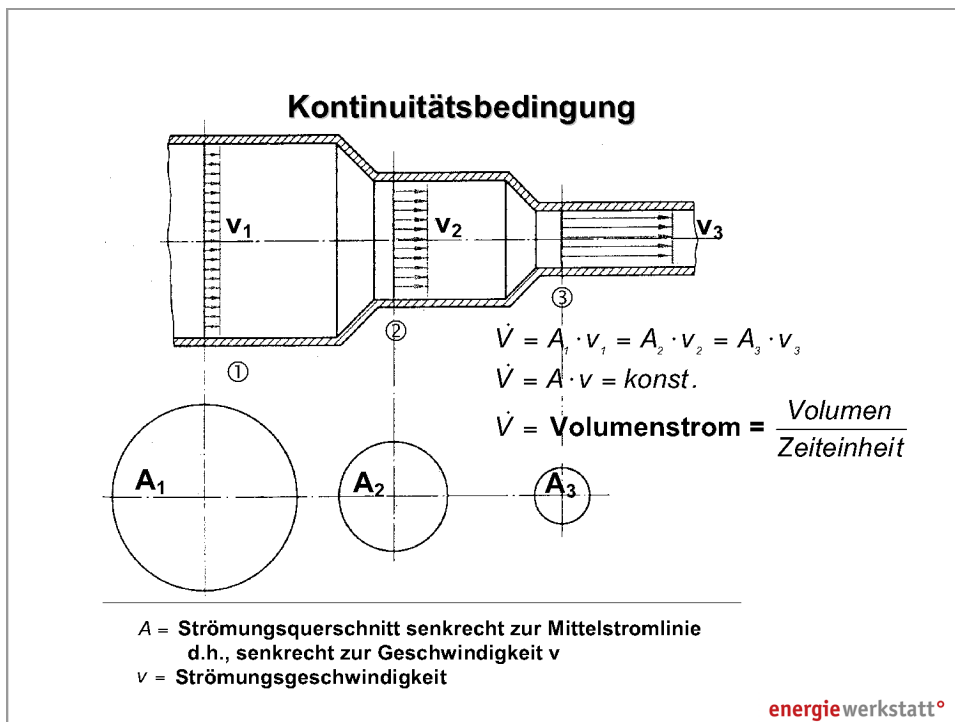


Abb.: Kontinuitätsbedingung

$$(5) \quad v \cdot A = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 \quad \frac{m^3}{s}$$

Mit Gleichung (4)

$$(6) \quad P = \frac{\rho}{2} \cdot (A_1 v_1^3 - A_2 v_2^3) \quad \text{und Gleichung (5):}$$

kann die Leistungsbilanz vor und nach dem Rotor bestimmt werden:

$$P = \frac{\rho}{2} \cdot v \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2)$$

Der Widerstand des Rotors oder die Schubkraft  $N$ , kann aus der Differenz des Impulses vor und hinter dem Rotor mit dem Impulserhaltungssatz berechnet werden:

$$(7) \quad N = \dot{m} v_1 - \dot{m} v_2 \quad [N] = \frac{kg}{s} \cdot \frac{m}{s} = \text{Newton}$$

Der Rotorschub multipliziert mit der örtlichen Geschwindigkeit  $v$  in der Rotorebene ergibt die entziehbare Rotorleistung  $P$ :

$$(8) \quad P = N \cdot v = \dot{m} \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad \text{oder mit Gleichung (3)}$$

$$P = \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot (v_1 - v_2)$$

Gleichsetzen der Gleichungen (6) und (8) ergibt die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  in der Rotorebene als arithmetisches Mittel der Geschwindigkeiten vor und hinter dem Rotor:

$$(9) \quad v = \frac{(v_1 + v_2)}{2}$$

Durch Einsetzen von Gleichung (9) in (8) kann die Rotorleistung berechnet werden:

$$(10) \quad P = \frac{\rho}{4} \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)$$

### 02.2.2.2 Der Leistungsbeiwert $c_p$

Der dimensionslose Leistungsbeiwert  $c_p$  ist als Quotient der Rotorleistung geteilt durch die im Wind enthaltene Leistung  $P = \frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \cdot A$ , bezogen auf die Rotorkreisfläche, definiert:

$$(11) \quad c_p = \frac{P}{\frac{\rho}{2} v_1^3 A} \quad \text{mit Gleichung (10)}$$

$$c_p = \frac{\frac{\rho}{4} \cdot A \cdot (v_1^2 - v_2^2)(v_1 + v_2)}{\frac{\rho}{2} \cdot v_1^3 \cdot A}$$

$$c_p = \frac{1}{2} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right] \cdot \left[ 1 + \frac{v_2}{v_1} \right] \quad \text{mit } \xi = v_2/v_1$$

$$(12) \quad c_p = \frac{(1 - \xi^2)(1 + \xi)}{2}$$

### 02.2.2.3 Maximaler Leistungsentzug (Betz'sches Optimum)

Es gibt zwei Grenzfälle für die Geschwindigkeitsreduktion durch Leistungsentnahme:  $\xi = 1$  bedeutet keine Abminderung der Windgeschwindigkeit und damit kein Entzug von Leistung.  $\xi = 0$  bedeutet vollständige

Abminderung der Geschwindigkeit hinter dem Rotor auf null ( $v_2 = 0$ ). Auch hier kann keine Leistung entzogen werden ( $P = 0$ ), da der Rotor nicht mehr durchströmt wird. Zwischen beiden Extrema muss es also ein Optimum für den Leistungsentzug geben.

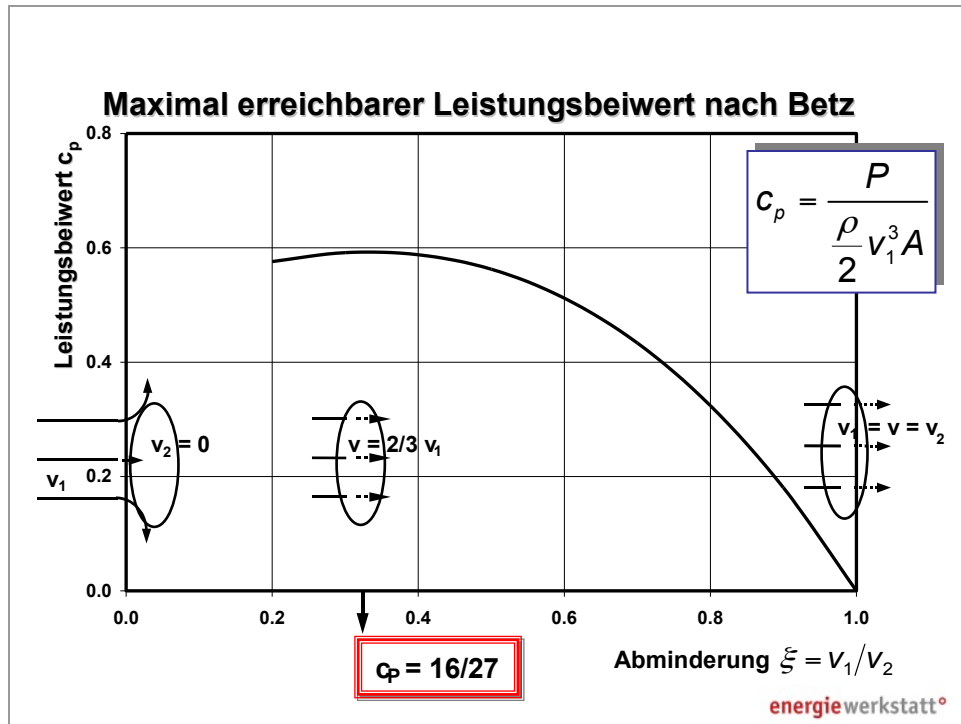


Abb.: Leistungsbeiwert über der Abminderung bei drall- und reibungsfreier Strömung.

Durch Ableiten der Gleichung (12) nach  $\xi$  und Setzen der Maximumsbedingung  $dc_p/d\xi = 0$  kann der theoretisch maximale Leistungsbeiwert ermittelt werden:

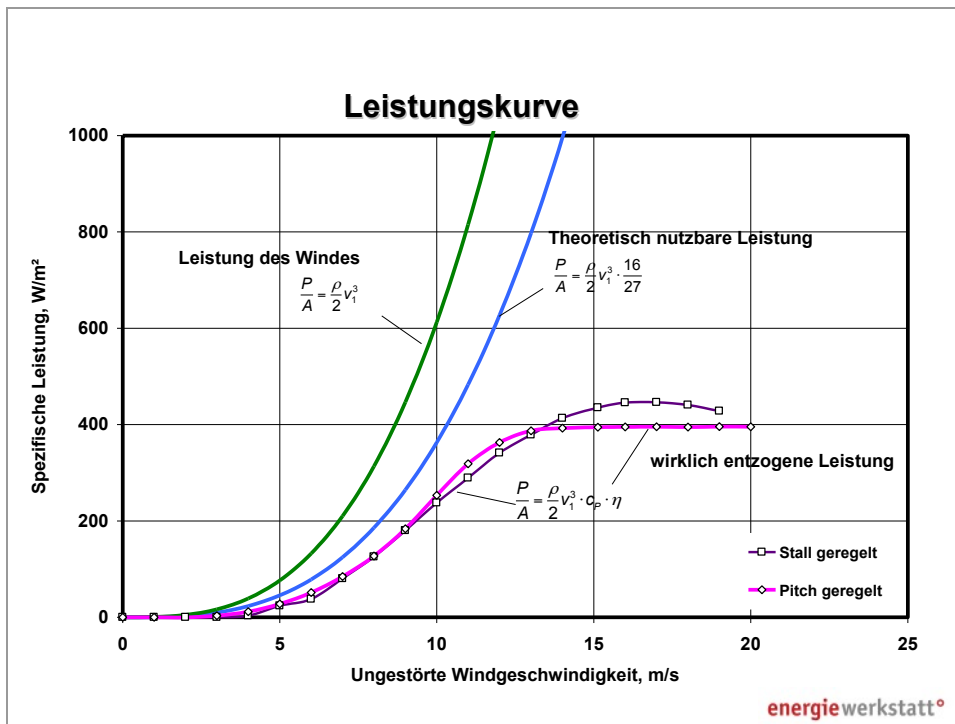
$$(13) \quad dc_p/d\xi = -\frac{3}{2} \cdot \xi^2 - \xi + \frac{1}{2} = 0$$

Maximalen Leistungsentzug liefert das Geschwindigkeitsverhältnis:  $\xi_{opt} = \frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ , bzw. mit Gleichung

$$(9) \quad \frac{v}{v_1} = \frac{2}{3},$$

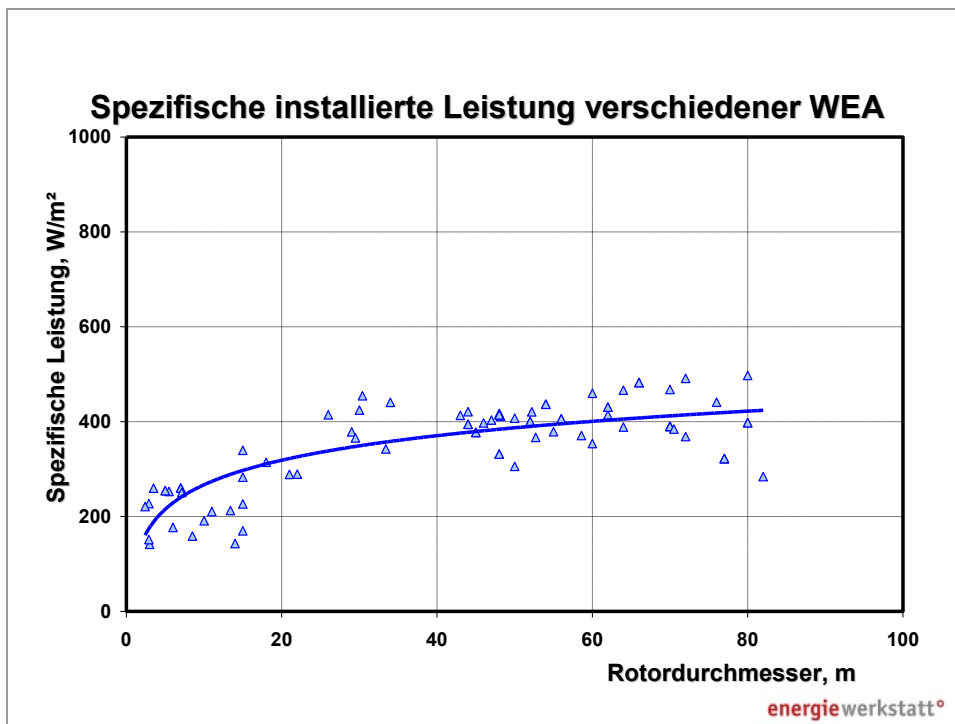
und als maximal theoretisch erreichbaren Leistungsbeiwert des Rotors ergibt sich:  $c_{Pmax} = \frac{16}{27} = 0.593$

Das heißt, dass als theoretisches Maximum 59.3 % der im Wind enthaltenen kinetischen Energie von einer Windenergieanlage umgesetzt werden können (Betz, 1920).



Leistung pro Quadratmeter Rotorkreisfläche über der ungestörten Windgeschwindigkeit. Mit  $\eta$  als mechanischem und elektrischem Wirkungsgrad.

Wie viel Leistung pro m<sup>2</sup> im Wind enthalten ist, wie viel spezifische Leistung über der Windgeschwindigkeit maximal theoretisch entziehbar ist und wie viel Leistung typische Windenergieanlagen heutiger Bauart pro Quadratmeter Rotorfläche dem Wind entnehmen, zeigt die oben stehende Abbildung.



Beispiele für spezifische Anlagenauslegung in Bezug zum Rotordurchmesser

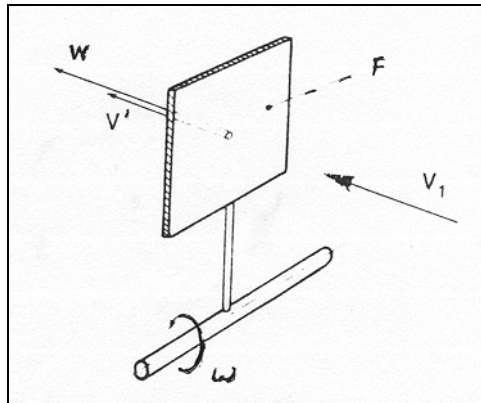


### 03.3 Rotorbauformen

Jeder angeströmte Körper erfährt eine Luftkraft, deren Komponenten in Strömungsrichtung definitionsgemäß als **Luftwiderstand** und senkrecht zur Anströmrichtung als **aerodynamischer Auftrieb** bezeichnet werden. Je nachdem, ob vorwiegend der Luftwiderstand oder die Auftriebskraft genutzt wird, ergeben sich sehr unterschiedliche reale Leistungsbeiwerte des Windenergiewandlers.

#### 03.3.1 Widerstandsläufer

Windräder nach dem Widerstandsprinzip sind besonders einfach gebaut und nutzen die einfachste Art der Energieumwandlung mit Hilfe reiner Widerstandsflächen. Sie funktionieren nach dem Prinzip, dass jeder Körper dem Wind einen gewissen Widerstand entgegensetzt. Im einfachsten Fall ist das ein Brett, das, entsprechend schräg zur Windrichtung gestellt, vom Wind zur Seite bewegt wird und somit eine nutzbare Kraft erzeugt.



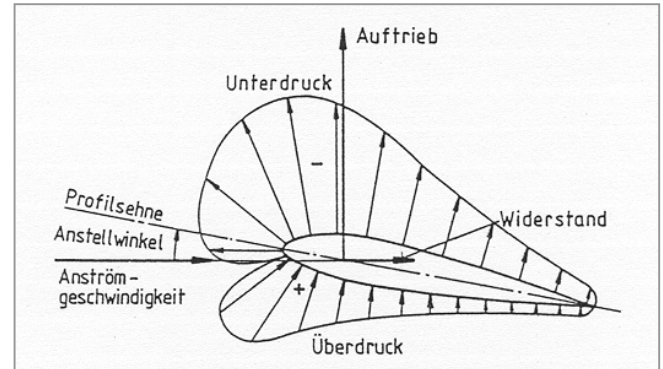
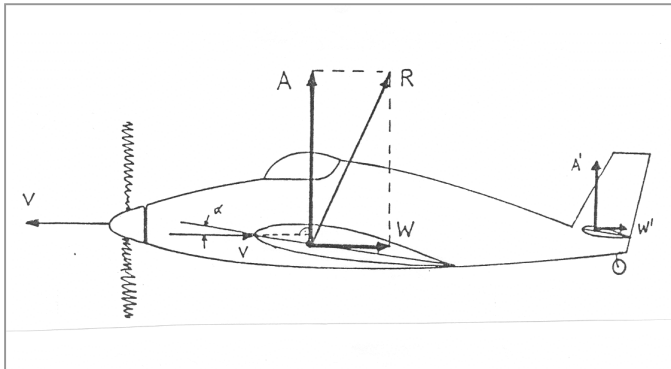
Prinzipanordnung eines widerstandsnutzenden Systems

Am Beispiel der Energieumwandlung durch reine Widerstandsflächen lässt sich ein deutlich kleinerer Leistungsbeiwert nachweisen, als dies entsprechend der Impulstheorie nach Betz theoretisch möglich wäre. Die Nutzung des Widerstandsprinzips, z.B. mit einer Vielzahl konkav zur Windrichtung gekrümmter Flächen, bietet zwar den Vorteil einer einfachen Konstruktion, erreicht jedoch infolge der hohen Widerstandsbeiwerte der Profil- und Rotorform Leistungsbeiwerte von **weniger als  $c_p=0,15$** . Dieser Wert entspricht lediglich einem Viertel des idealen Betz'schen Wertes von  $c_p=0,593$ .

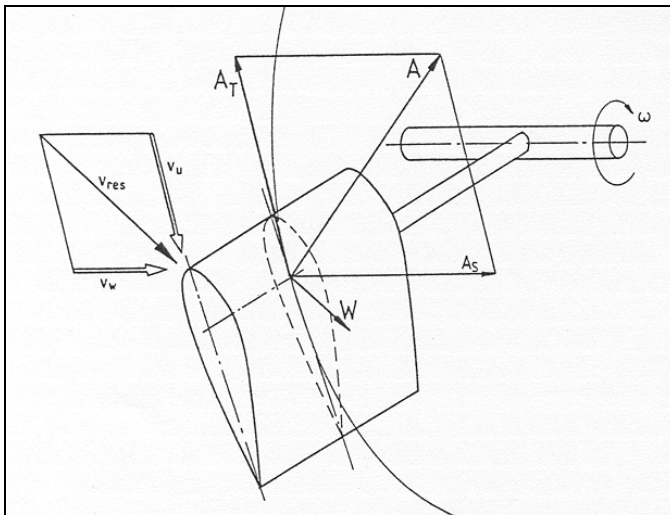
Charakteristische Eigenschaften widerstandsnutzender Rotoren sind die **niedere Rotordrehzahl** und ein **hohes Rotordrehmoment**. Dadurch eignen sich diese Rotoren sehr gut zur Verrichtung mechanischer Arbeiten mit hohen Anlaufdrehmomenten. Bei der Anwendung von Widerstandsläufern zur Erzeugung von Elektrizität stellt die Eigenschaft kleiner Rotordrehzahlen einen Nachteil dar, weil daraus ein größerer Aufwand für die Getriebeübersetzung resultiert.

#### 03.3.2 Auftriebsläufer

Ist die Form der Rotorblätter so gestaltet, dass der aerodynamische Auftrieb genutzt werden kann, lassen sich erheblich höhere Leistungsbeiwerte erzielen. Die Nutzung des aerodynamischen Auftriebes, analog den Verhältnissen an einem Flugzeugtragflügel, steigert den Wirkungsgrad beträchtlich. Alle modernen Bauformen von Windrotoren zielen auf diesen Effekt ab.

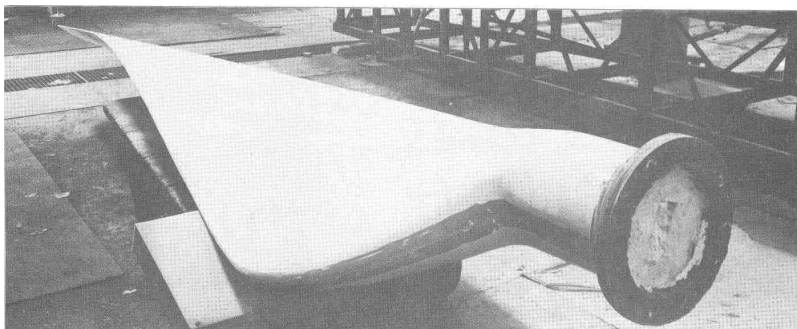


Anströmgeschwindigkeit und Luftkräfte am Tragflügel eines Flugzeugs

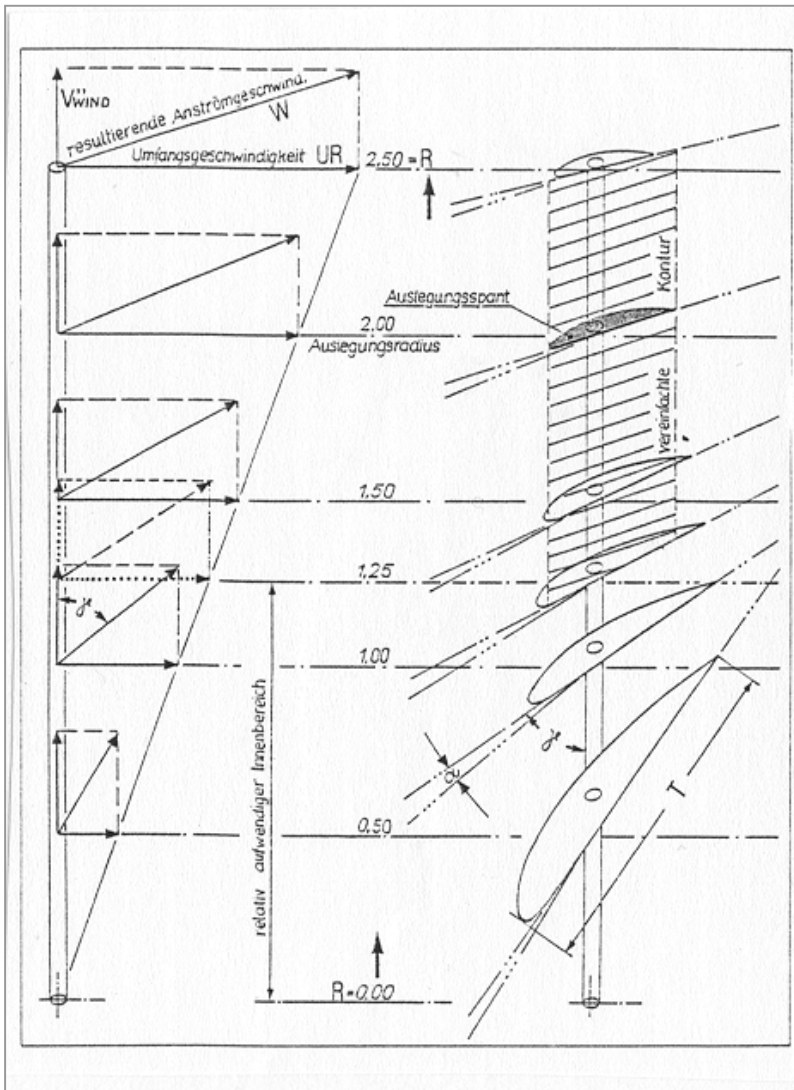


Anströmgeschwindigkeiten und Luftkräfte an einem auftriebsnutzenden Rotor

Damit sich die Auftriebskraft voll entfalten kann, muss die Strömung laminar am Profil anliegen, was wiederum bedeutet, dass das Flügelprofil immer unter dem jeweils günstigsten Winkel angeströmt werden soll. Größe und Winkel der Anströmgeschwindigkeit ändern sich in Abhängigkeit von Windgeschwindigkeit und Umlaufgeschwindigkeit am jeweiligen Punkt des Rotorblattes. Nachdem die Umfangsgeschwindigkeit an der Flügelspitze am größten ist und zur Nabe hin abnimmt, ergibt sich daraus eine Zunahme des Anströmwinkels von der Blattspitze in Richtung Nabe. Damit das Flügelprofil an jedem Punkt des Rotorblattes optimal angeströmt wird, werden daher die Rotorblätter mit Verwindung ausgeführt



Verwindenes Rotorblatt in GFK-Bauweise



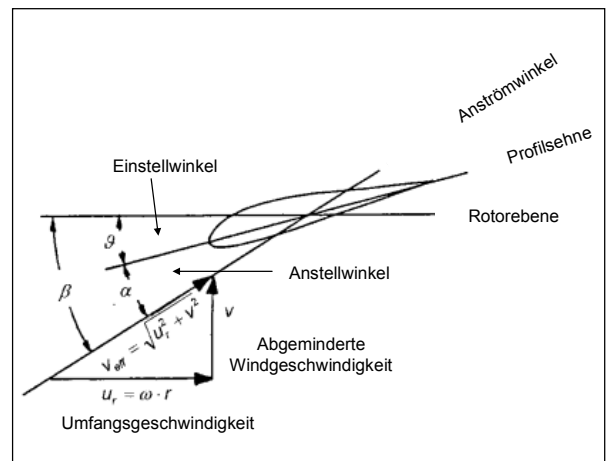
Anströmverhältnisse und Verwindung des Rotorblattes

### 03.4 Luftkräfte am Rotor

#### 03.4.1 Anströmgeschwindigkeiten am Rotorblatt

Die effektive Anströmgeschwindigkeit  $v_{eff}$  am Rotorblattradius  $r$  ist die Vektorsumme der Umfangsgeschwindigkeit  $u_r = \omega \cdot r$  und der abgeminderten Windgeschwindigkeit  $V$  in der Rotorebene (Abb.):

$$(14) \quad v_{eff} = \sqrt{u_r^2 + v^2}$$



### 03.4.2 Definition der Schnelllaufzahl

Ähnlich wie die Auftriebskraft am Tragflügel eines Flugzeugs die Schwerkraft erst dann überwinden kann, wenn das Flugzeug auf der Startbahn eine gewisse Geschwindigkeit erreicht, hängt der optimale Blattauftrieb vom Erreichen einer vorgegebenen Umlaufgeschwindigkeit ab. Der Auftrieb eines Rotorblattes ist somit abhängig vom Verhältnis der herrschenden Windgeschwindigkeit zur Umlaufgeschwindigkeit am jeweiligen Punkt des Rotorblattes. Man bezeichnet dieses Verhältnis als **Schnelllaufzahl**. Die Schnelllaufzahl  $\lambda$  des Rotors ist definiert als die Blattspitzengeschwindigkeit  $u$  ( $\omega \cdot R$ ) dividiert durch die ungestörte Windgeschwindigkeit:

$\lambda$  Schnelllaufzahl

$u$  Umfanggeschwindigkeit der Blattspitze

$v_w'$  Ungestörte Windgeschwindigkeit

$$\lambda = \frac{u}{v_w'}$$

**Dreiblattrotoren** erreichen bei Schnelllaufzahlen zwischen **6 und 8** ihr Optimum, während **Zweiblattrotoren** ihre maximalen Leistungsbeiwerte bei Schnelllaufzahlen von etwa **8 - 10** erreichen. **Einblattrotoren** arbeiten mit Schnelllaufzahlen von **10 - 15**. Die maximal erreichbaren Leistungsbeiwerte verschiedener Auslegungsschnelllaufzahlen unterscheiden sich im Bereich zwischen 5 und 15 nur geringfügig, erst bei Werten unter 5, also bei Langsamläufern, fällt der  $c_p$ -Wert schnell ab. Schnelllaufzahlen zwischen 6 und 10 sind in der Praxis üblich.

### 03.4.3 Verwindung, Anströmwinkel und Anstellwinkel

Der **Einstellwinkel**  $\vartheta$  ist als Winkel zwischen der Profilschne (Chord line) und der Rotorebene (rotor plane) definiert.

Der **Anströmwinkel**  $\beta$  (direction of effective inflow) ist als Winkel zwischen der effektiven Anströmung und der Rotorebene definiert.

Der für die Aerodynamik des Rotorblattprofils wichtige **Anstellwinkel** ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Anströmwinkel und dem örtlichen Einstellwinkel:

$$(16) \quad \alpha = \beta - \vartheta$$

Da bei konstanter Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  des Rotors der Anströmwinkel  $\beta$  mit abnehmendem Radius  $r$  betragsmäßig größer wird, muss der örtliche Einstellwinkel  $\vartheta$  ebenso in Richtung Nabe dem Betrag nach zunehmen, um jeweils den optimalen Anstellwinkel  $\alpha$  am Profil des Blattelements entlang dem Rotorblatt zu erhalten.

Für einen stall - geregelten Rotor ist der Einstellwinkel  $\vartheta$  fest eingestellt. Bei so genannten pitch- oder blattgeregelten Rotoren wird das Rotorblatt um seine Achse mit dem Einstellwinkel oder Pitchwinkel  $\Delta\vartheta$  verstellt, um die Leistung durch aktive Änderung des Anstellwinkels und damit der aerodynamischen Kräfte am Blattelement zu regeln.

Beim stall - geregelten Rotor muss der Verwindungsverlauf und der Bezugswinkel der Verwindung so eingestellt sein, dass bei Erreichen der Nennleistung der Anstellwinkel des Maximalauftriebs erreicht ist und die Strömung abreißt (engl. Strömungsabriss = stall). Trotz fest eingestelltem Blattwinkel wird durch Widerstandszunahme und Auftriebseinbruch eine Begrenzung der Leistung erreicht.

### 03.4.4 Aerodynamische Kräfte am Blattelement

Am Blattelement mit der Fläche  $dA = dr \cdot l$ , mit  $dr$  als radiale Ausdehnung des Blattelements und  $l$  als Profil-Sehnenlänge erzeugt die effektive Anströmgeschwindigkeit  $v_{eff}$  bei dem resultierenden örtlichen Anstellwinkel  $\alpha$ , die folgenden aerodynamischen Kräfte:

$$(17) \quad dL = \frac{\rho}{2} \cdot v_{eff}^2 \cdot dA \cdot c_l \quad \text{Auftriebskraft am Blattelement}$$

$$(18) \quad dD = \frac{\rho}{2} \cdot v_{eff}^2 \cdot dA \cdot c_d \quad \text{Widerstandskraft am Blattelement}$$

Dabei sind  $\rho$  die Luftdichte und  $c_l$  beziehungsweise  $c_d$  die von dem Anstellwinkel  $\alpha$  abhängigen aerodynamischen Koeffizienten. Diese werden dem für das jeweilige Rotorblattprofil charakteristischen Profilpolaren entnommen.

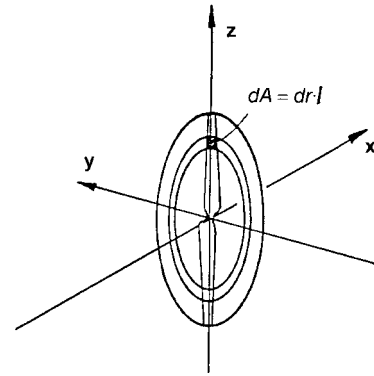
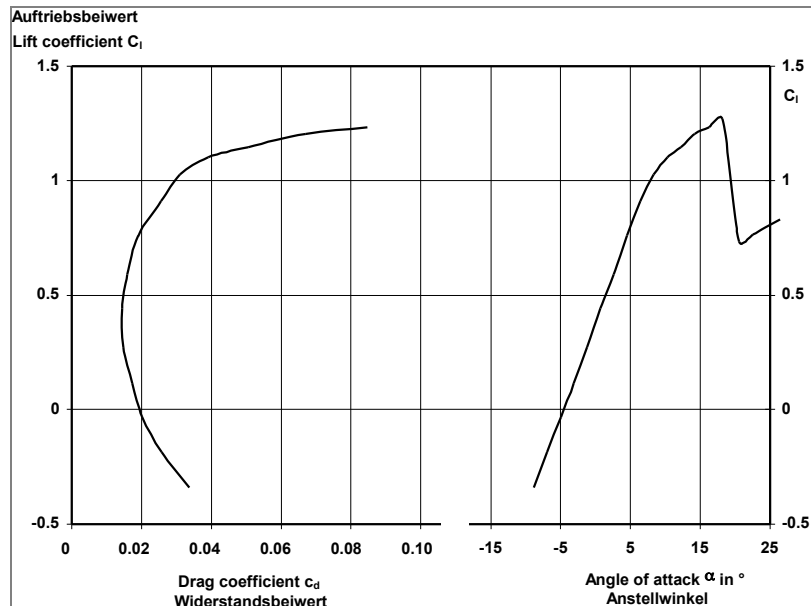


Abb.: Blattelement



Typische Polare eines Rotorblattprofils

Die Auftriebskraft  $dL$  steht dabei stets senkrecht auf der örtlichen effektiven Anströmgeschwindigkeit  $v_{eff}$  und die Widerstandskraft  $dD$  liegt stets parallel zur Richtung von  $v_{eff}$ . Diese Kräfte werden nun vom Koordinatensystem des Profilquerschnitts in das Koordinatensystem des Rotorblattes über den Blattanströmwinkel  $\beta$  transformiert. Senkrecht zur Rotorebene ergibt sich der Rotorschubanteil  $dN$  und in Rotorebene der Tangentialkraftanteil  $dT$ , der, aufsummiert über den Radius und multipliziert mit der Blattzahl, als Drehmoment zur Leistungserzeugung genutzt wird:

$$(19) \quad dT = dL \cdot \sin \beta - dD \cdot \cos \beta$$

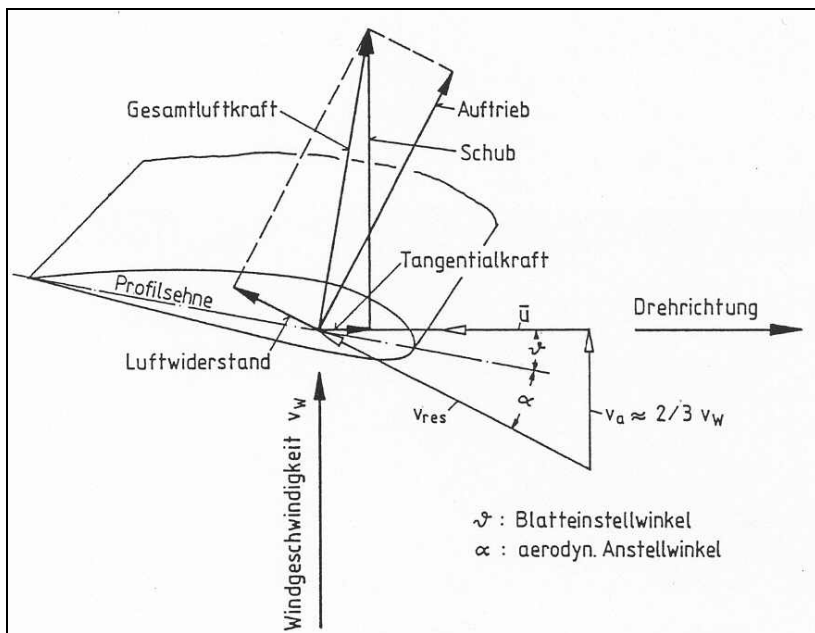
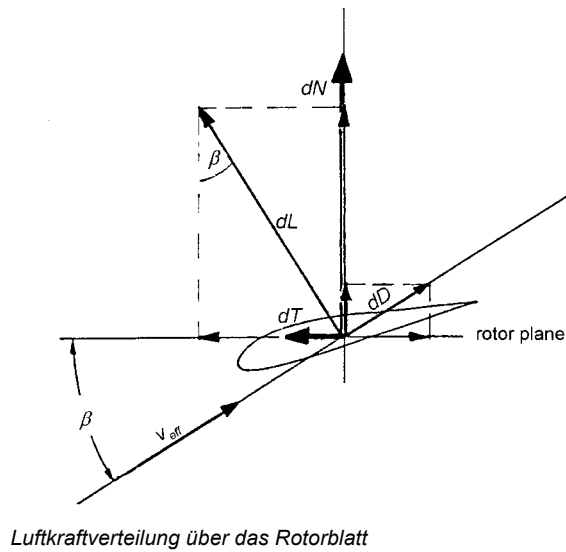
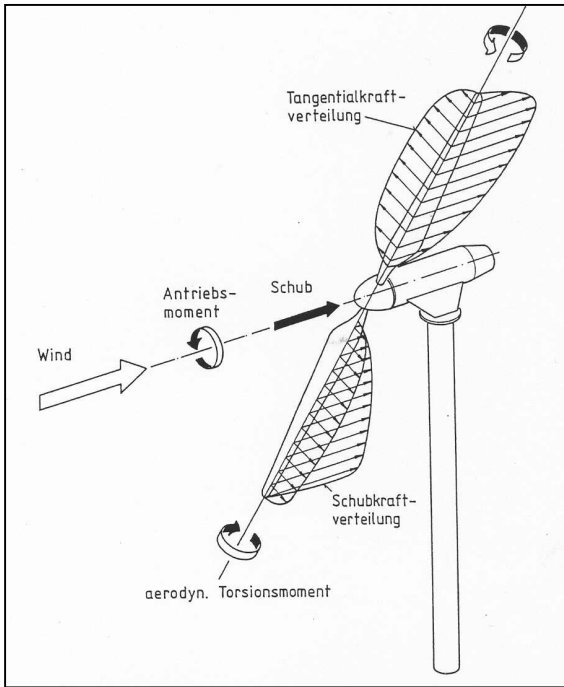
$$(20) \quad dN = dL \cdot \cos \beta + dD \cdot \sin \beta$$

Die Tangentialkraft  $dT$  erzeugt also das Rotordrehmoment während die viel größere Schubkraft  $dN$  nur „unnötigerweise“ das Rotorblatt und den Turm belastet.

Für ein typisches Rotorblattprofil heutiger, schnell laufender WKA Rotorblätter stellt der aerodynamische Widerstand am Blattelement nur einen sehr kleinen Anteil an den aerodynamischen Kräften dar und beträgt weniger als ein Prozent der Auftriebskraft. Die Gleichungen (19)&(20) können daher wie folgt vereinfacht werden:

$$(21) \quad dT = dL \cdot \sin \beta$$

$$(22) \quad dN = dL \cdot \cos \beta$$



Luftkräfte am Rotorblatt

## Liste der Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Erläuterung	Explanation
$E$	J	Energie	energy
$m$	kg	Masse	mass
$P$	W	Leistung	power
$A$	m <sup>2</sup>	Fläche, Kontrollfläche, Fläche des Blattelements, Rotorfläche	area, control area, blade element area, rotor plane area
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Luftdichte	air density
$N$	N	Normalkraft senkrecht zur Rotorebene, Schub	normal force perpendicular to the rotor plane, thrust
$v_1$	m/s	ungestörte Windgeschwindigkeit	undisturbed wind velocity
$v_2$	m/s	Windgeschwindigkeit hinter dem Rotor	wind velocity behind the rotor
$v$	m/s	Windgeschwindigkeit in der Rotorebene	wind velocity in the rotor plane
$\xi$	-	Abminderungsfaktor $v_2/v_1$	diminishing factor $v_2/v_1$
$u_r$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit am Rotorblattradius $r$	circumferential speed at a blade radial position $r$
$r$	m	örtlicher Radius	local radius
$\omega$	1/s	Winkelgeschwindigkeit	angular velocity
$\lambda$	-	Schnellaufzahl	tip speed ratio
$R$	m	Rotorradius	rotor radius
$\alpha$	°	Anstellwinkel	angle of attack
$\beta$	°	Anströmwinkel	flow angle
$\vartheta$	°	Einstellwinkel	twist angle, pitch angle
$l$	m	örtliche Blatt-Tiefe, Sehnenlänge des Profils	chord length of airfoil
$D$	N	Widerstand	aerodynamic drag
$L$	N	Auftrieb	aerodynamic lift
$z$	-	Blattzahl	number of blades
$c_l$	-	Auftriebsbeiwert am Blattelement	lift coefficient at blade element
$c_T$	-	Schubbeiwert des Rotors	thrust coefficient
$c_d$	-	Widerstandsbeiwert am Blattelement	drag coefficient at blade element