

Sommerakademie Salem 2008 „Neue Energien“ | Vortrag: „Windenergie und ihre Nutzung“ (Carl Pölking)

Windenergie und ihre Nutzung



Ein wenig Vortragstheorie...



Text:
Informativ

Lehrreich



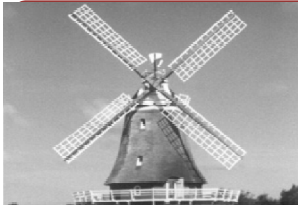
Bildchen:
Illustrativ

Schön

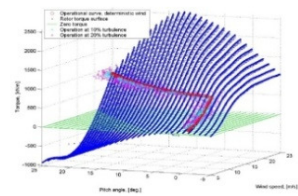


Mathematik:
Instruktiv

Schön lehrreich



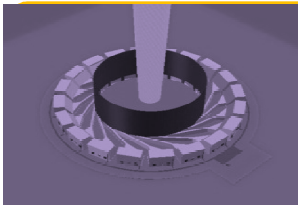
1. Geschichte der Windenergienutzung



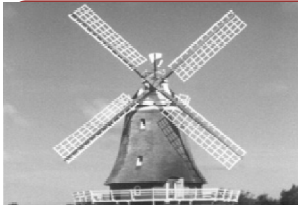
2. Windleistung und Betzsches Gesetz



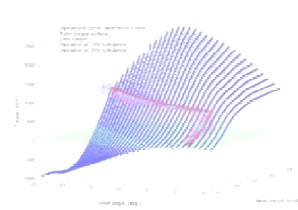
3. Windkraftkonverter



4. Zukunftspotenzial - Entwicklungstrends



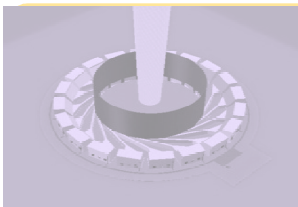
1. Geschichte der Windenergienutzung



2. Windleistung und Betzsches Gesetz



3. Windkraftkonverter



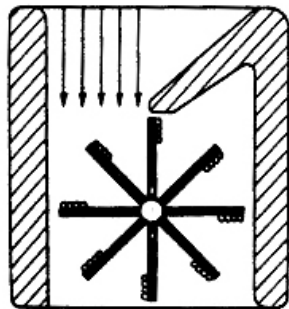
4. Zukunftspotenzial - Entwicklungstrends

- ca. 1000 v.Chr. erste Zeugnisse
von Windmühlen in Persien und China

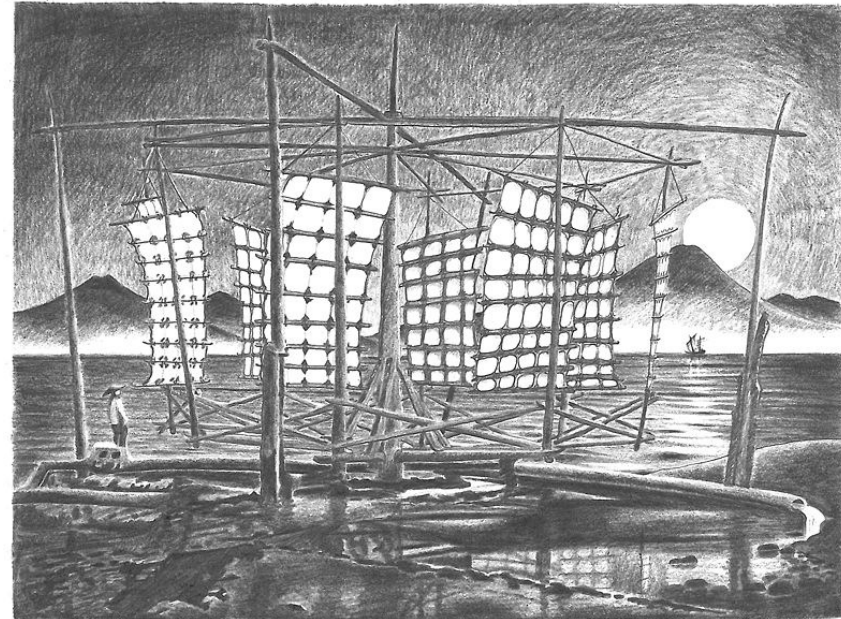
Zweck: Getreidemühlen, Wasserpumpen

- Älteste Varianten sind **Widerstandsläufer**
(Antrieb durch Impulsübertrag) mit
vertikaler Drehachse.

Beispiel: Persische Windmühle



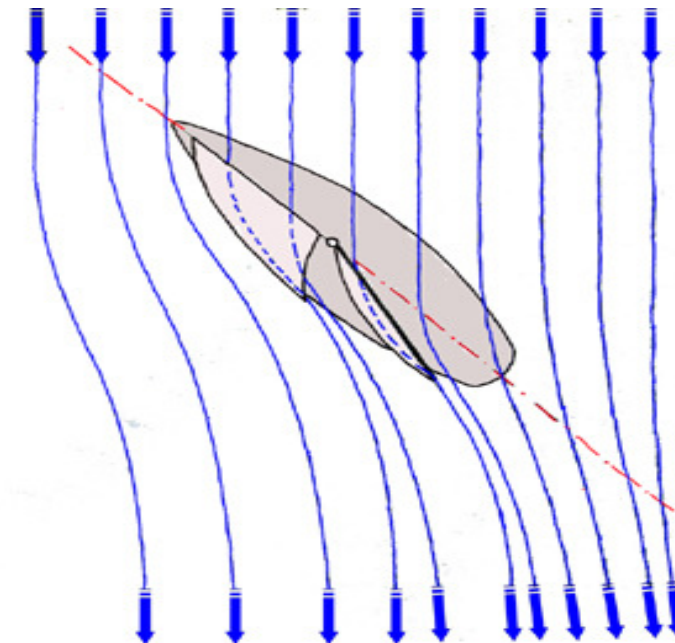
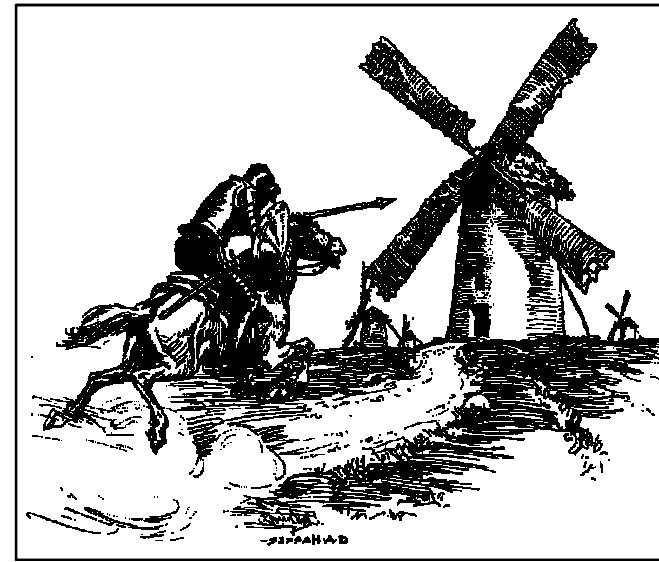
- Aber: Chinesische Windmühle war
Auftriebsläufer.



- 12. Jahrhundert: Windmühlen kommen nach Europa.

Es werden von vornherein nur **Auftriebsläufer mit horizontaler Drehachse** gebaut!

- Grund? Wissensaustausch mit den see- und segelerfahrenen nordischen Völkern
=> aerodynamische Kenntnisse + hohes Level der Handwerkskunst (Zünfte)
- **Neue Anwendungsgebiete:** Textilindustrie, Sägewerke, Eisenverarbeitung etc.
- Industrialisierung: Windkraftnutzung wird zur **Nische der technischen Entwicklung**



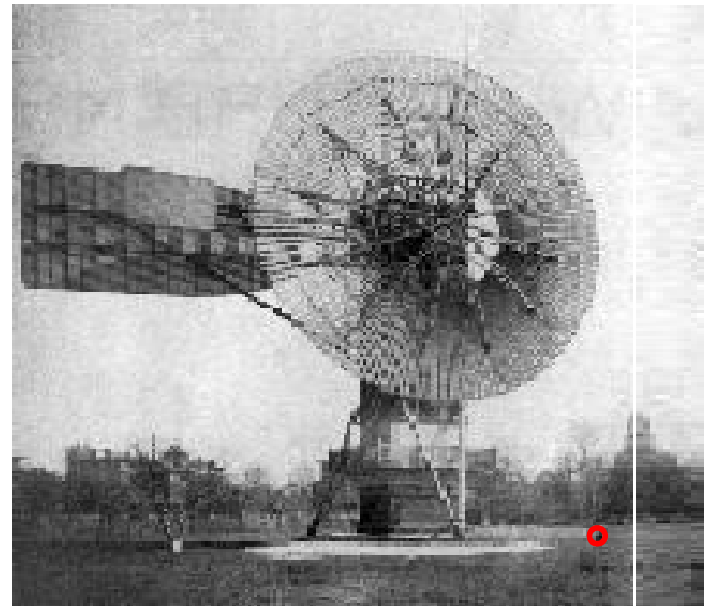
- Ende des 19. Jahrhunderts: Windräder versorgen ländliche Gebiete erstmals mit **Elektrizität**.

=> Windkraft wird für wissenschaftliche Forschung interessant.

- 1920: Albert Betz entdeckt das nach ihm benannte „**Betzsche Gesetz**“.

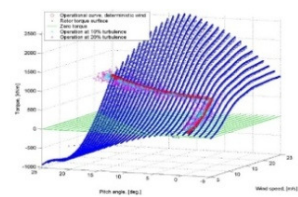


- Konzeptfülle: Windkraftanlagen werden zusehends **leistungstärker, effizienter, leiser**.





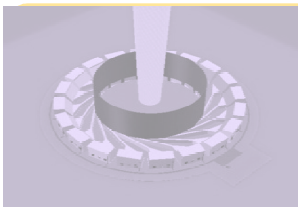
1. Geschichte der Windenergienutzung



2. Windleistung und Betzsches Gesetz

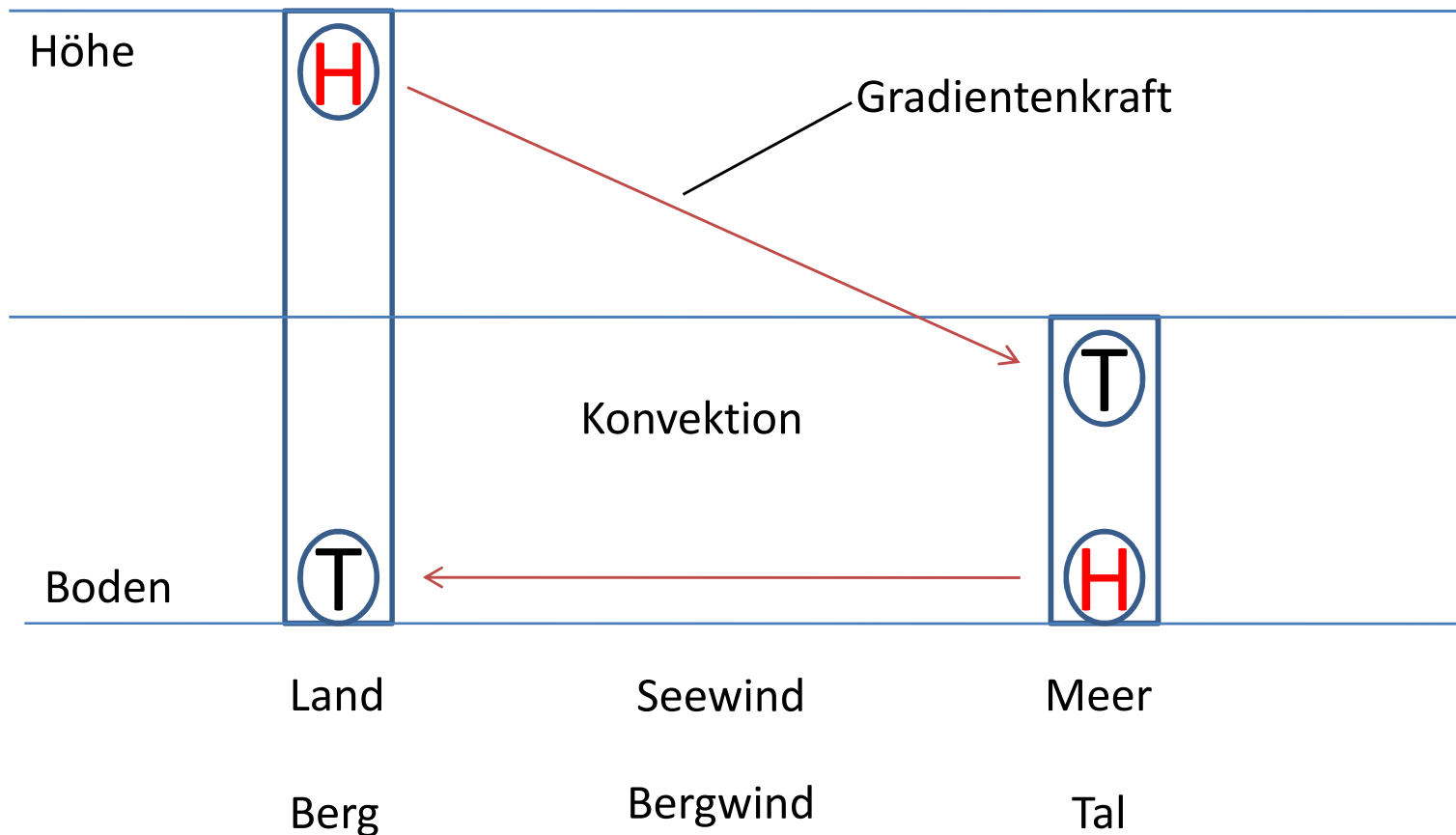


3. Windkraftkonverter



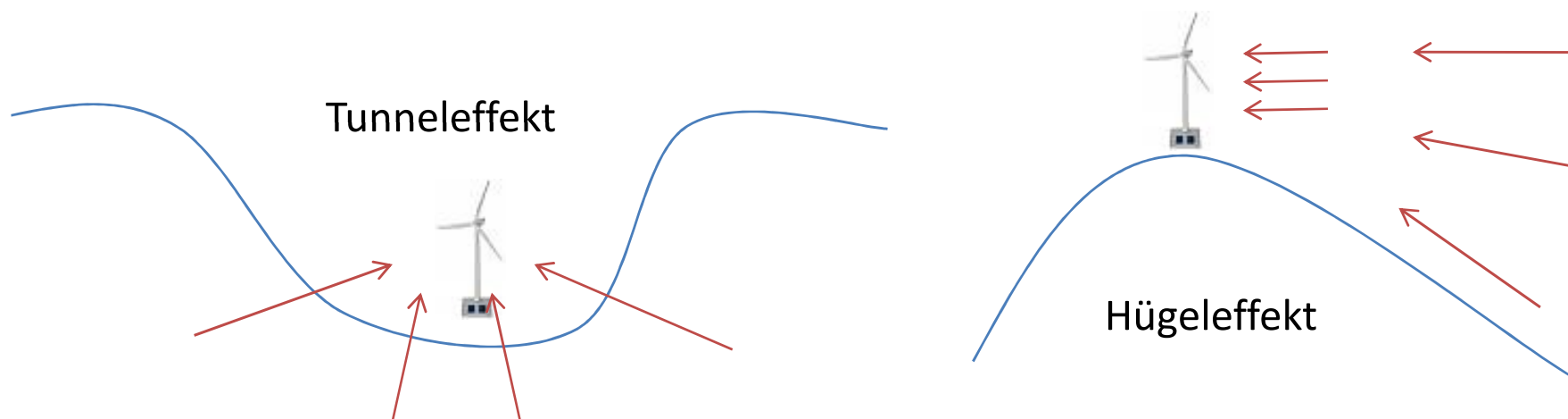
4. Zukunftspotenzial - Entwicklungstrends

- **Lokal:** Allein Druckgradienten / Temperaturgradienten sind Ursache für Windentstehung (Druck und Temperatur über Gasgleichung in Beziehung gesetzt)
- **Global:** Zusammenspiel von Druckgradient, Corioliskraft und Zentrifugalkraft



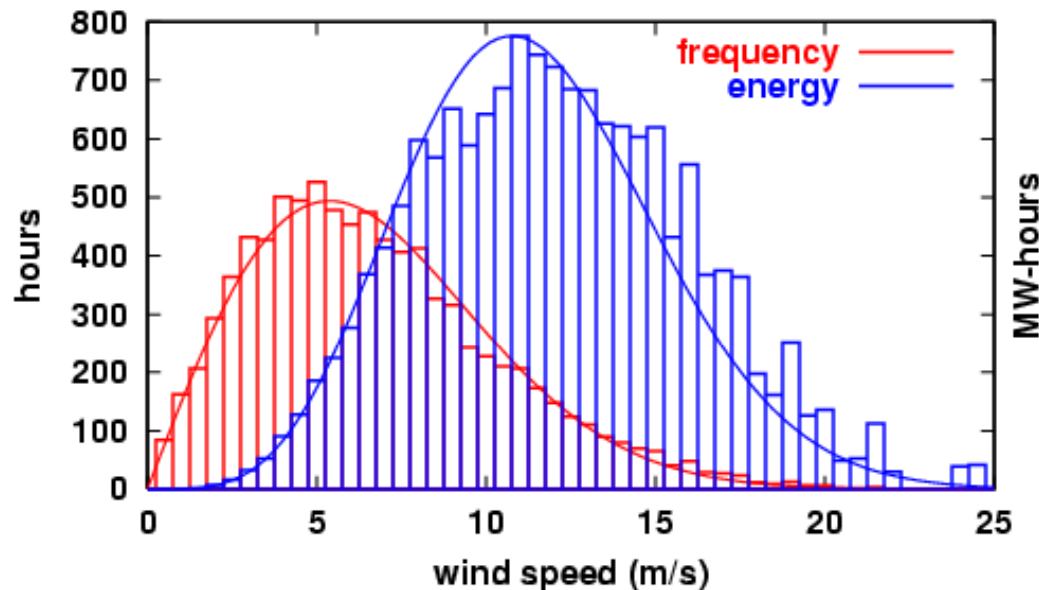
- Natürlich versucht man, Windkraftanlagen dort zu bauen, wo die Windenergie-dichte besonders hoch ist.

=> Ausnutzen von See- und Bergwinden sowie natürlichen **Windkonzentratoren**:



- **Rauigkeit des Terrains:** Wälder bremsen den Wind stark, Wasser hingegen kaum
- **Windscherung:** Windgeschwindigkeit nimmt mit Höhe zu ($v \propto \sqrt[3]{h}$)

- Kontinuierliche **Weibull-Verteilung** (Rote Kurve): Gibt für einen festen Ort die Häufigkeit verschiedener Windgeschwindigkeiten an



- Leistung des Windes pro Fläche:
$$\frac{P_W}{A} = \frac{dW}{Adt} = \frac{1}{2} v^2 \cdot \frac{dm}{Adt} = \frac{1}{2} \rho v^3$$

=> **Windleistung wächst mit dritter Potenz der Geschwindigkeit!**

- Verdopplung der Höhe: $v_{2h} = v_h \cdot \sqrt[3]{2} \approx 1,1v_h; P_W(1,1v_h) \approx 1,34P_W(v_h)$

- Bernoulli-Gleichung (Strömendes Medium): $p_s + \frac{1}{2}\rho v^2 = \text{konstant}$

$$\Rightarrow p_1 - p_2 = \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)$$

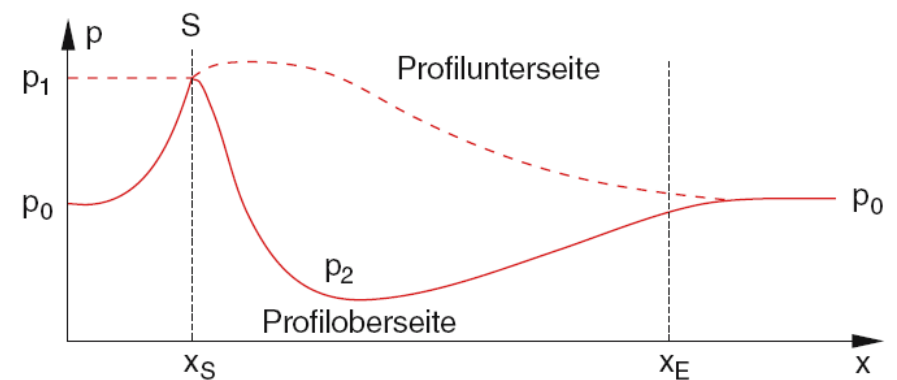
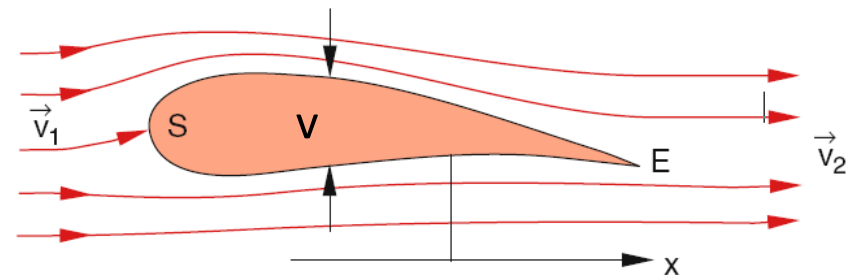
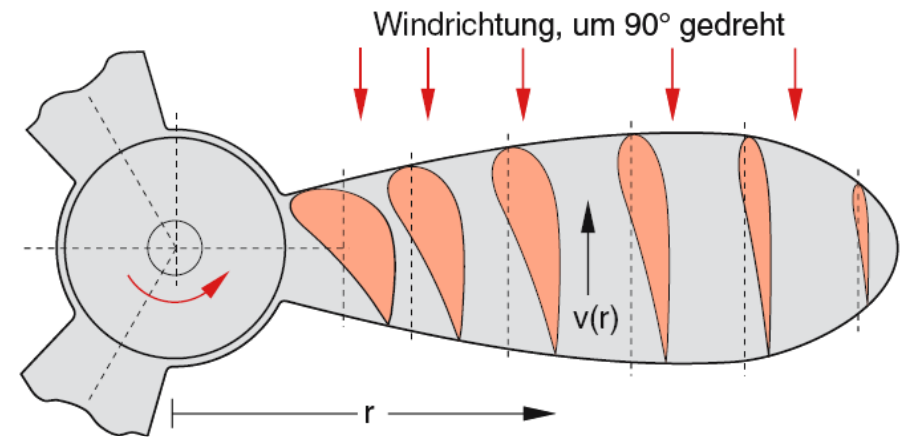
Dies liefert für die auf den Rotor ausgeübte Kraft

$$\begin{aligned} F &= \text{Druck} * \text{Fläche} = (p_1 - p_2)A \\ &= \frac{1}{2}\rho(v_2^2 - v_1^2)A. \end{aligned}$$

Wir kennen noch eine andere Darstellung:

$$\begin{aligned} F &= \text{Impulsänderung} = (v_2 - v_1) \frac{dm}{dt} \\ &= \rho(v_2 - v_1)vA \end{aligned}$$

$$\Rightarrow v = \frac{1}{2}(v_1 + v_2)$$



- Wir berechnen nun die vom Kraftwerk **umgesetzte Leistung**:

$$P_K = F \cdot v = \rho A(v_1 - v_2)v^2 = a \cdot P_W ,$$

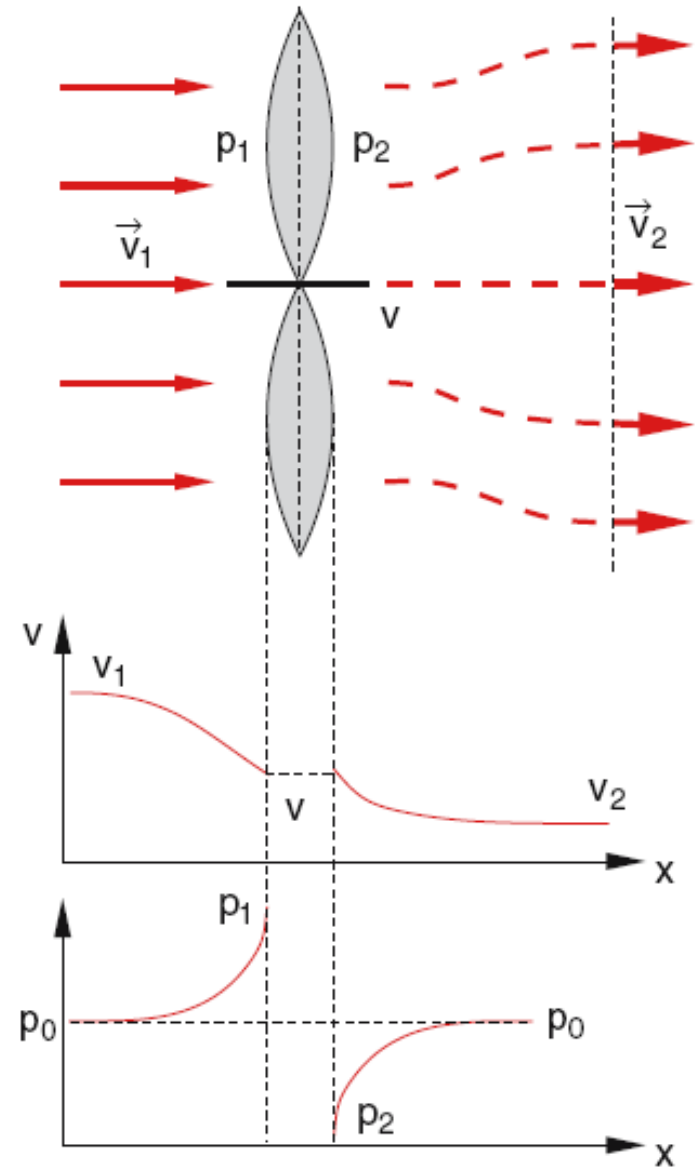
wobei wir eingesetzt bzw. definiert haben:

$$P_W = \frac{1}{2} \rho A v_1^3 ; \quad a = \frac{(v_1 - v_2)(v_1 + v_2)^2}{2v_1^3} .$$

- Bei welchem v_2 und gegebenem v_1 wird $a = \frac{P_K}{P_W}$ maximal?

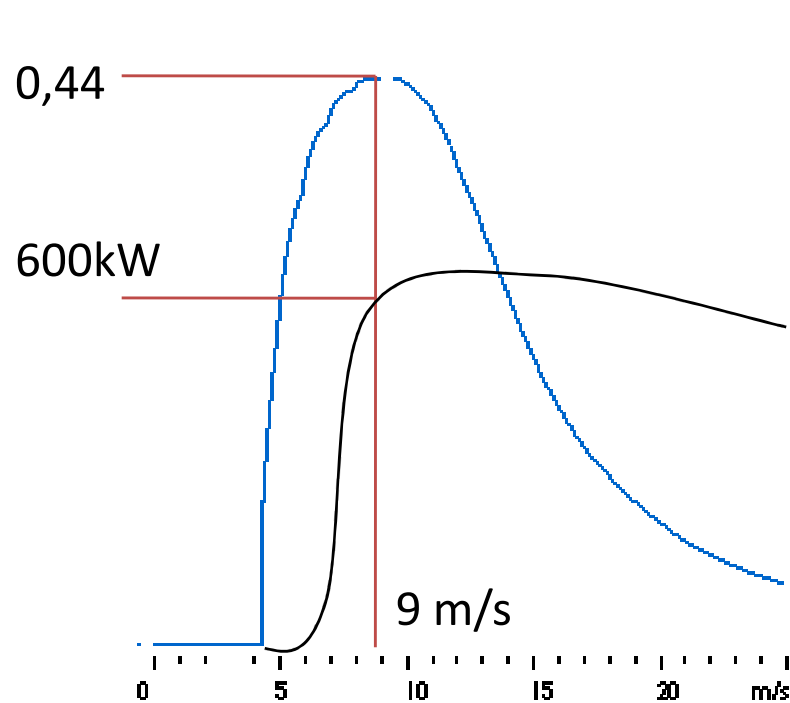
$$\frac{da}{dv_2} = 0 \text{ f\"ur } v_2 = \frac{1}{3} v_1 \Rightarrow a \leq \frac{16}{27} \approx 0,59$$

- Jedes **wie auch immer** geartete Windkraftwerk kann dem einströmenden Wind **höchstens 59%** seiner Leistung entziehen!

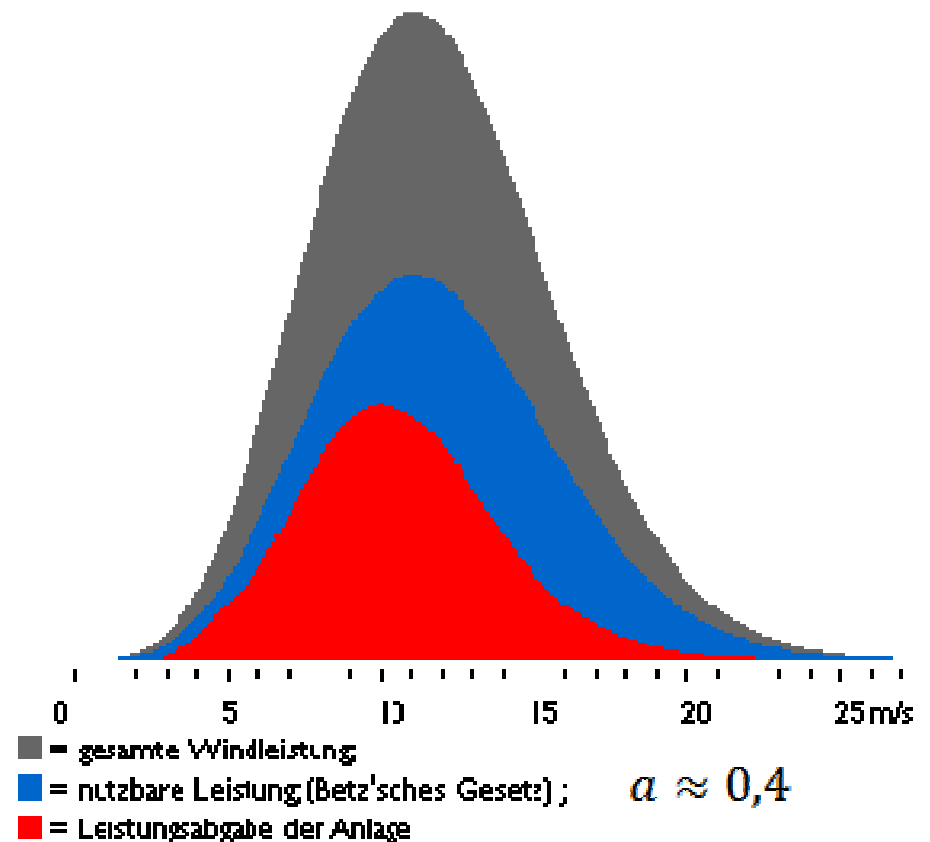


- Das Betz'sche Gesetz beschreibt **keinen** Wirkungsgrad. Es definiert den maximalen

$$\text{Leistungsbeiwert} = \frac{\text{Leistungsabgabe pro m}^2}{\text{Windleistung pro m}^2}$$

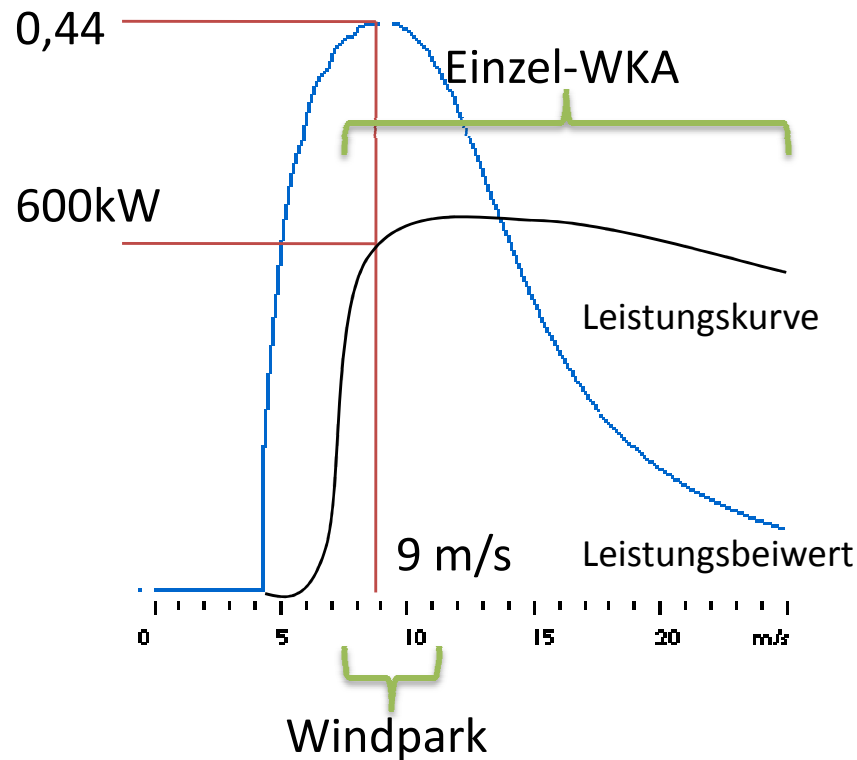


Leistungsbeiwertkurve ———
Leistungskurve ———



- Zum Vergleich: **Widerstandsläufer** lassen deutlich mehr Leistung passieren: $a \leq 0,2$

- Windkraftwerke werden stets für bestimmte **Windklassen** (gemäß Weibull) optimiert.



Durchschnittliche Leistung in Periode T:

$$P_K = \frac{1}{T} \int_0^T P_K(v(t)) dt$$

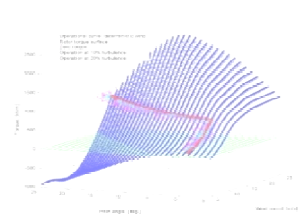
Wir wissen aber, dass P_K stark mit v variiert. Deswegen sind Standorte mit **möglichst konstanter Windstärke** gefragt.

=> Offshore – Windparks

- **Nennleistung:** Leistung bei Nennwindgeschwindigkeit > **Auslegungswindgeschwindigkeit**
Bei Auslegungswindgeschwindigkeit wird der Leistungsbeiwert maximal.



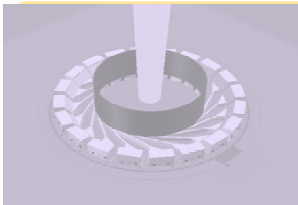
1. Geschichte der Windenergienutzung



2. Windleistung und Betzsches Gesetz



3. Windkraftkonverter



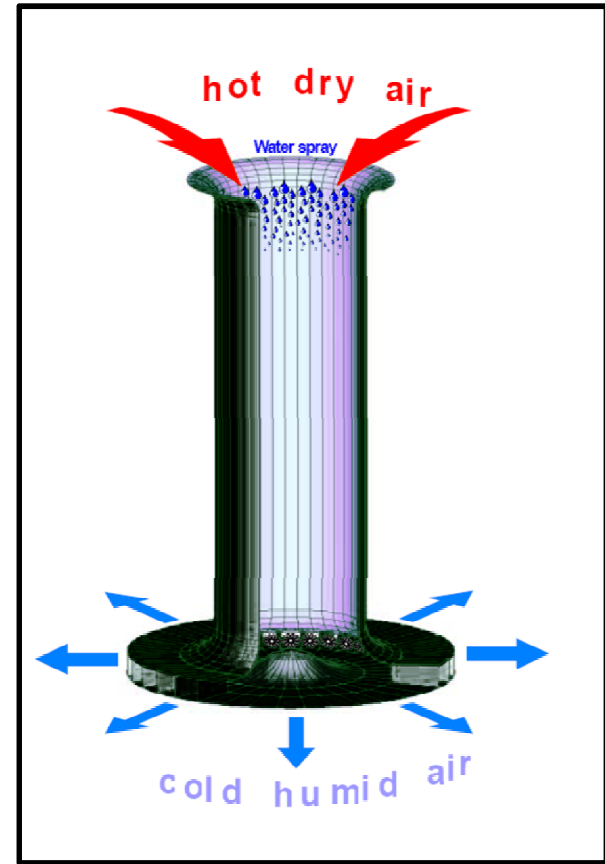
4. Zukunftspotenzial - Entwicklungstrends



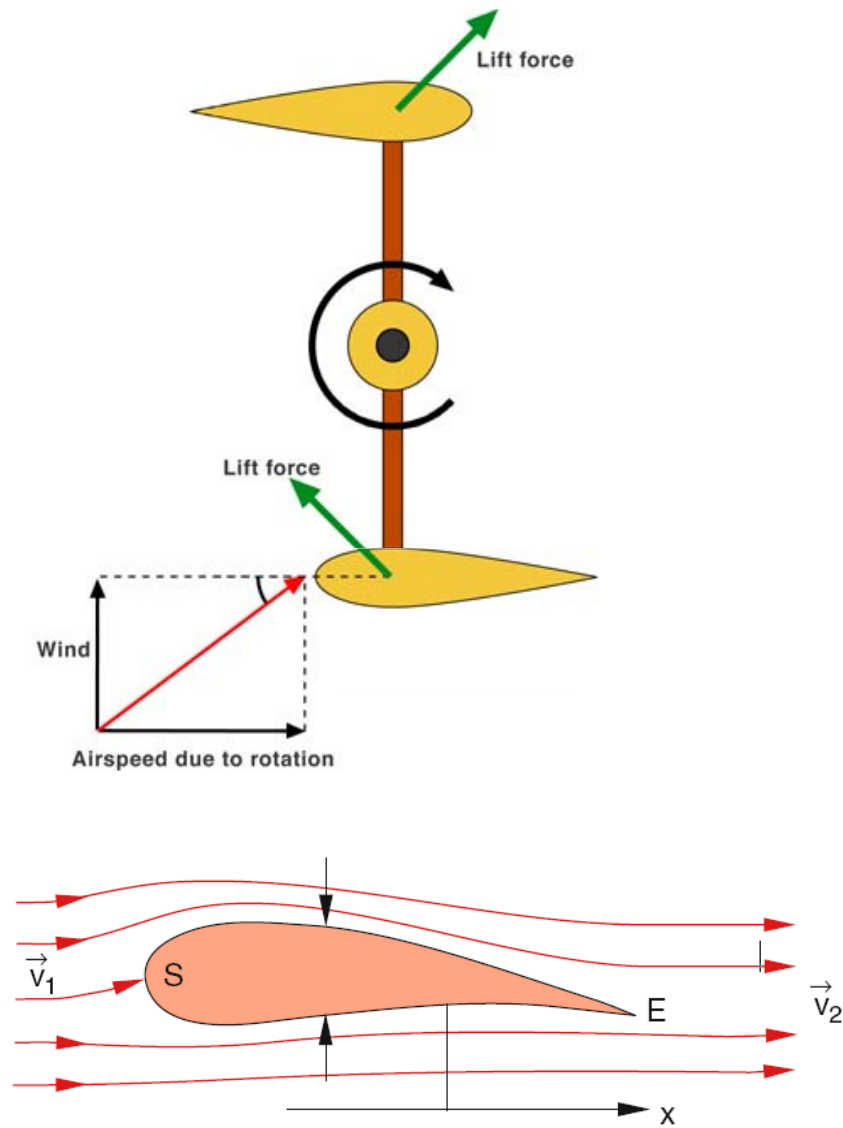
„Crossdraft“



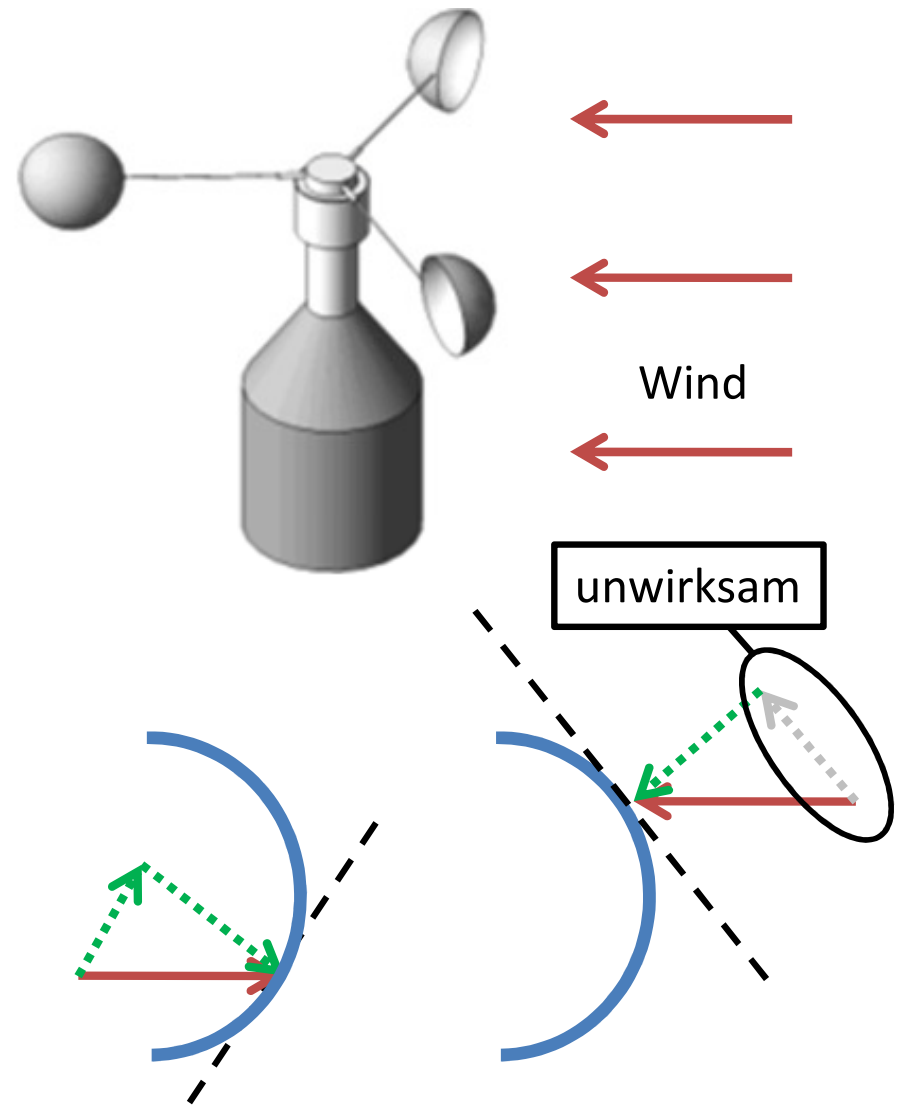
Updraft



Downdraft



Auftriebsläufer $a \leq 0,59$



Widerstandsläufer $a \leq 0,2$

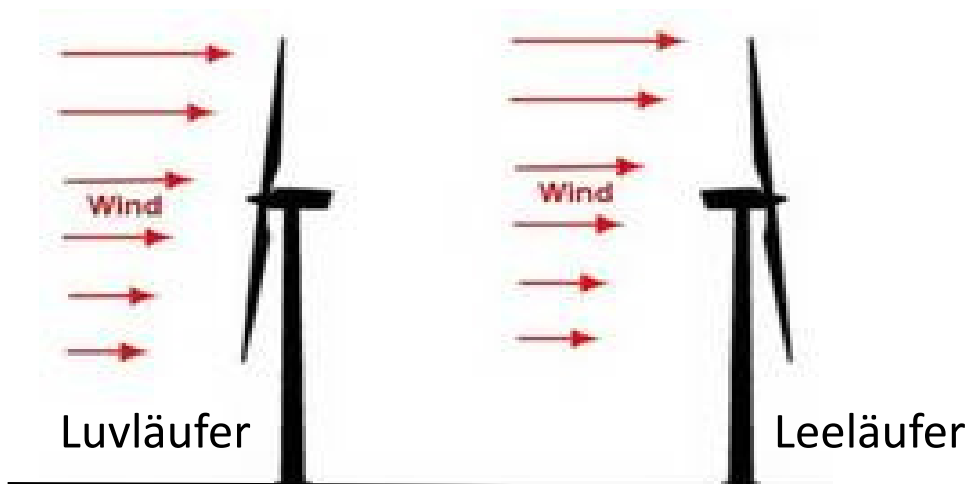
HAWT (Horizontale Drehachse):

Vorteile

- Dank **Pitch/Stall** besser kontrollierbar
- Profitiert wegen Turmhöhe von Windscherung
- **Hoher Leistungsbeiwert**

Nachteile:

- **Turbulenzanfällig**
- Luvläufer: Ausrichtung am Wind notwendig
- Starke **mechanische Belastungen**
- Hohe Installationskosten (u.a. massiver Turm)

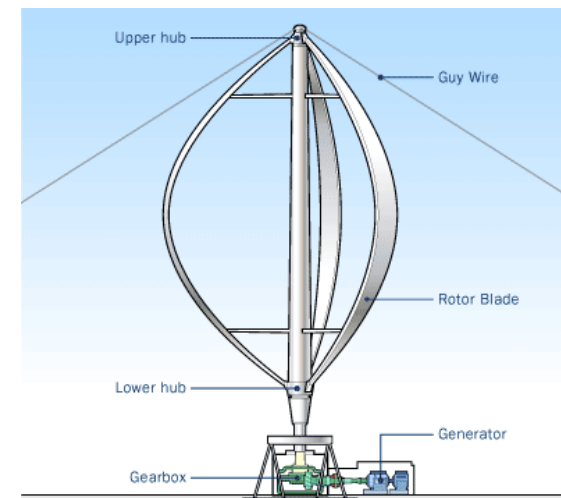
**VAWT** (Vertikale Drehachse):

Vorteile:

- **unabhängig von Windrichtung**
- Geringere Materialbelastung
- Bau, Betrieb, Wartung einfacher
- **Hohe Turbulenztoleranz**
- Geringe Reibungsverluste

Nachteile

- **Leistungsbeiwert geringer**
- Profitieren nicht von Windscherung



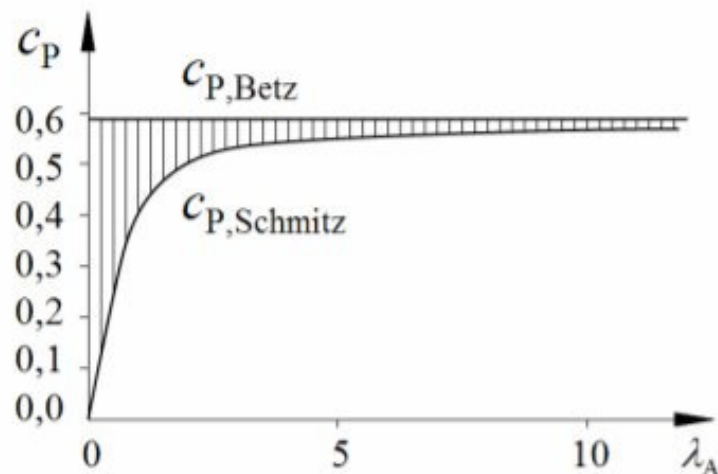
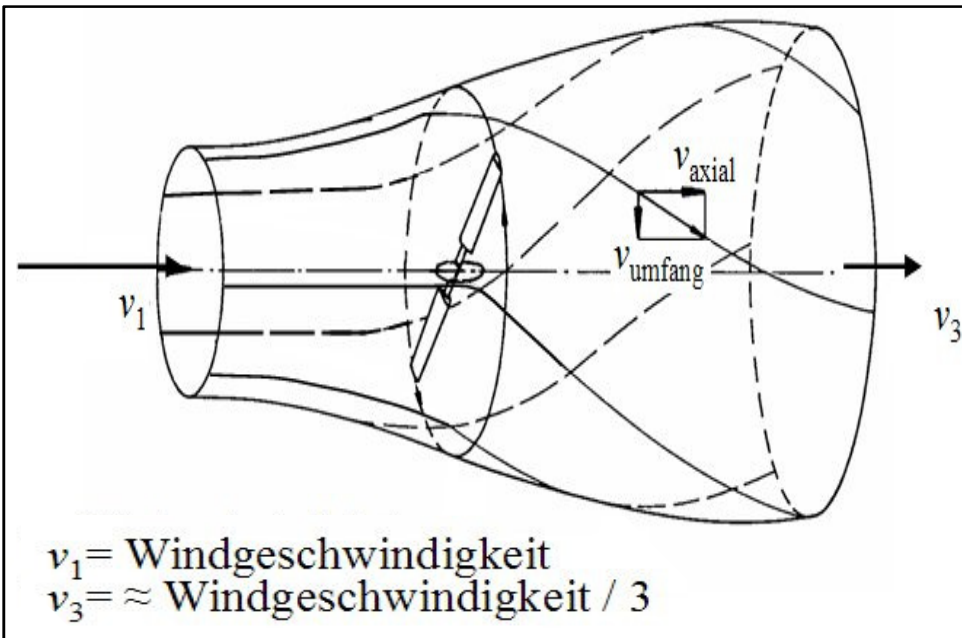
$$\text{Schnelllaufzahl } \lambda = \frac{\text{Blattspitzengeschwindigkeit}}{\text{Windgeschwindigkeit}}$$

 $\lambda < 1$ $\lambda \approx 1$ $\lambda \approx 6$ $\lambda \approx 11$

Langsamläufer

Schnelläufer

- **Dralleffekt:** Hinter einem Windkraftwerk ist der Wind zum einen abgebremst, zum anderen aber erhält er eine neue Geschwindigkeitskomponente $v_{Umfang} \perp v_{Axial}$.



- Es ergibt sich eine weitere Verschärfung des Betzschen Gesetzes (**Maximaler Leistungsbeiwert nach Schmitz**).

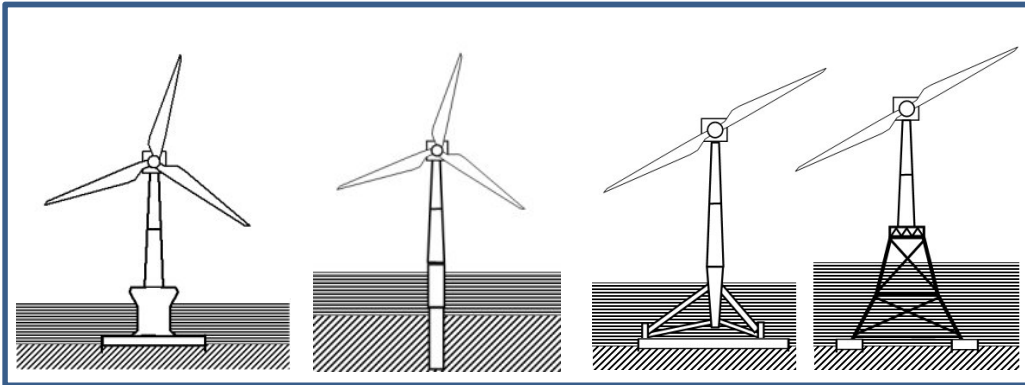
Besonders Langsamläufer sind vom Dralleffekt betroffen.

- Was sollte ein Windkraftwerk erfüllen?

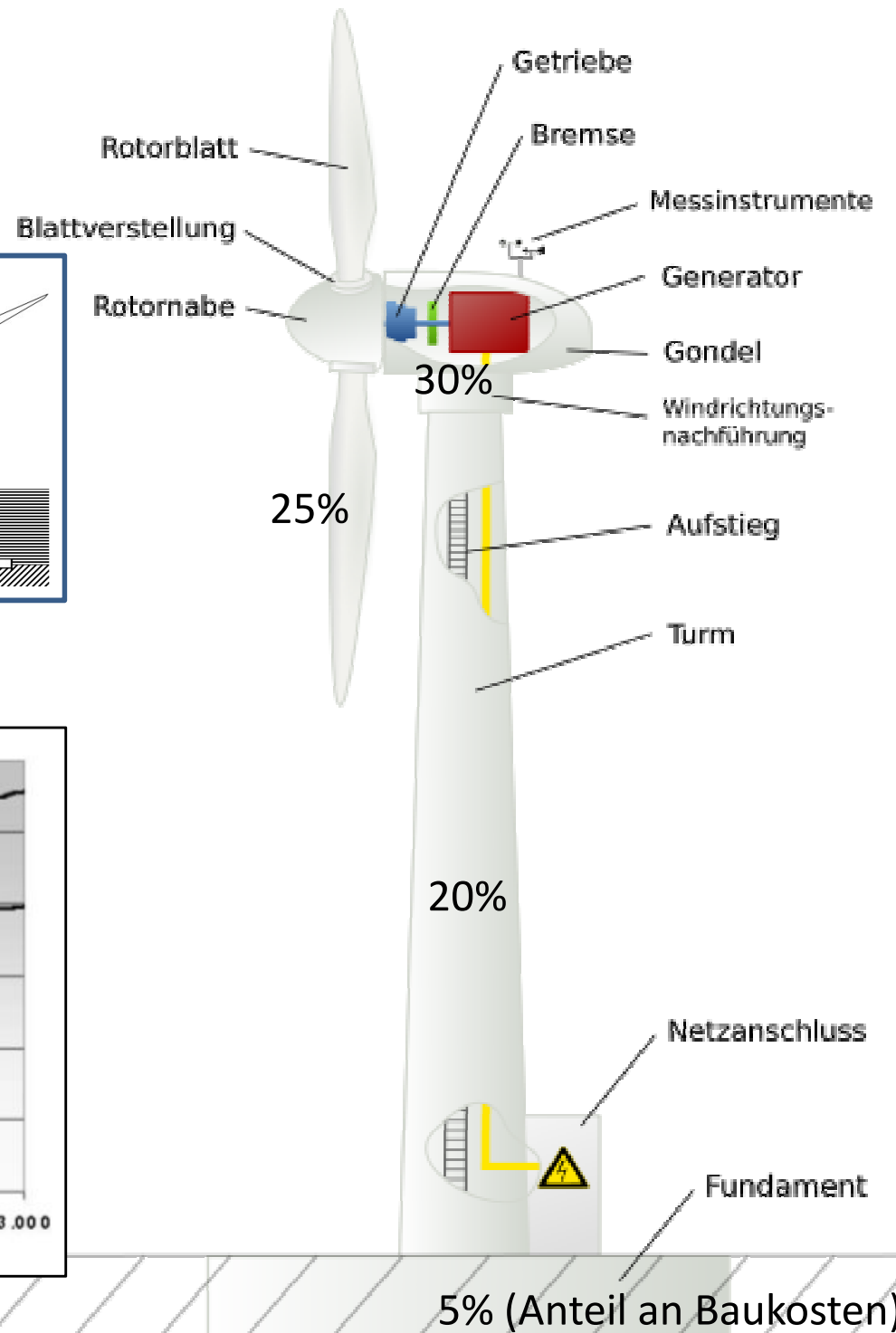
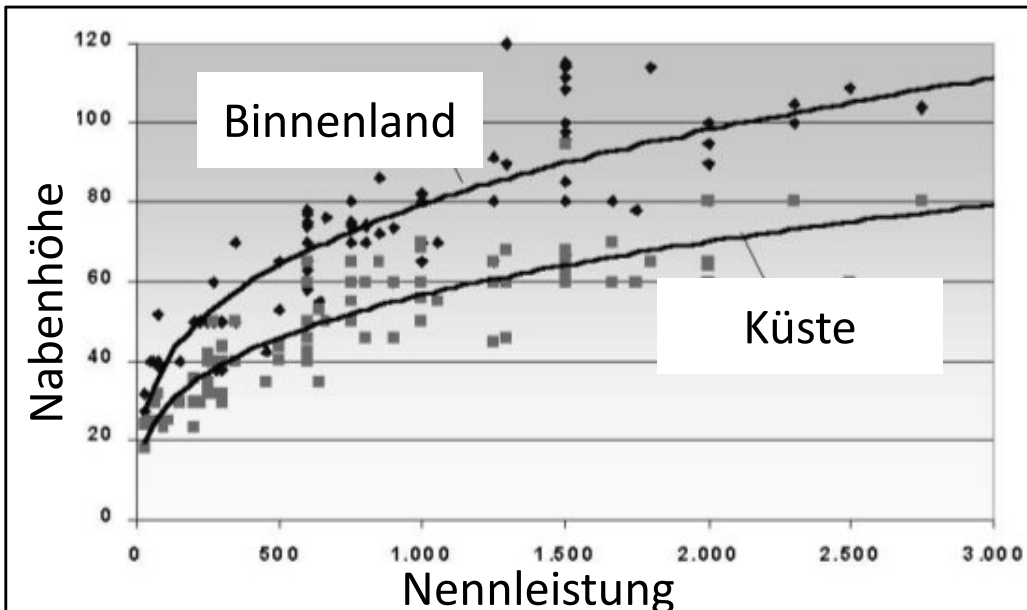
- Hoher Leistungsbeiwert => Auftriebsläufer; HAWT
- Möglichst geringer Dralleffekt => Schnellläufer
- Schnellläufer => Geringe Rotoranzahl

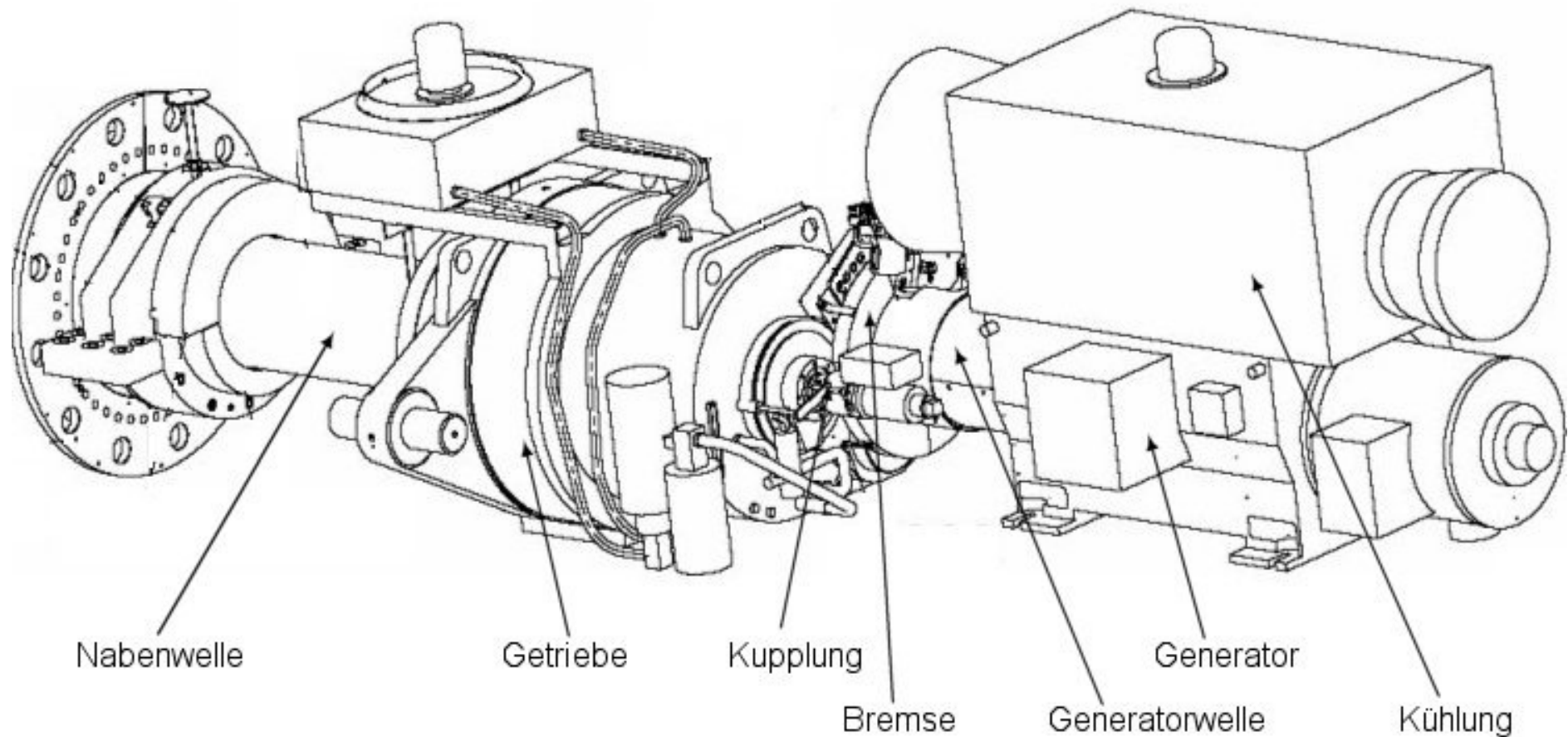


Fundament



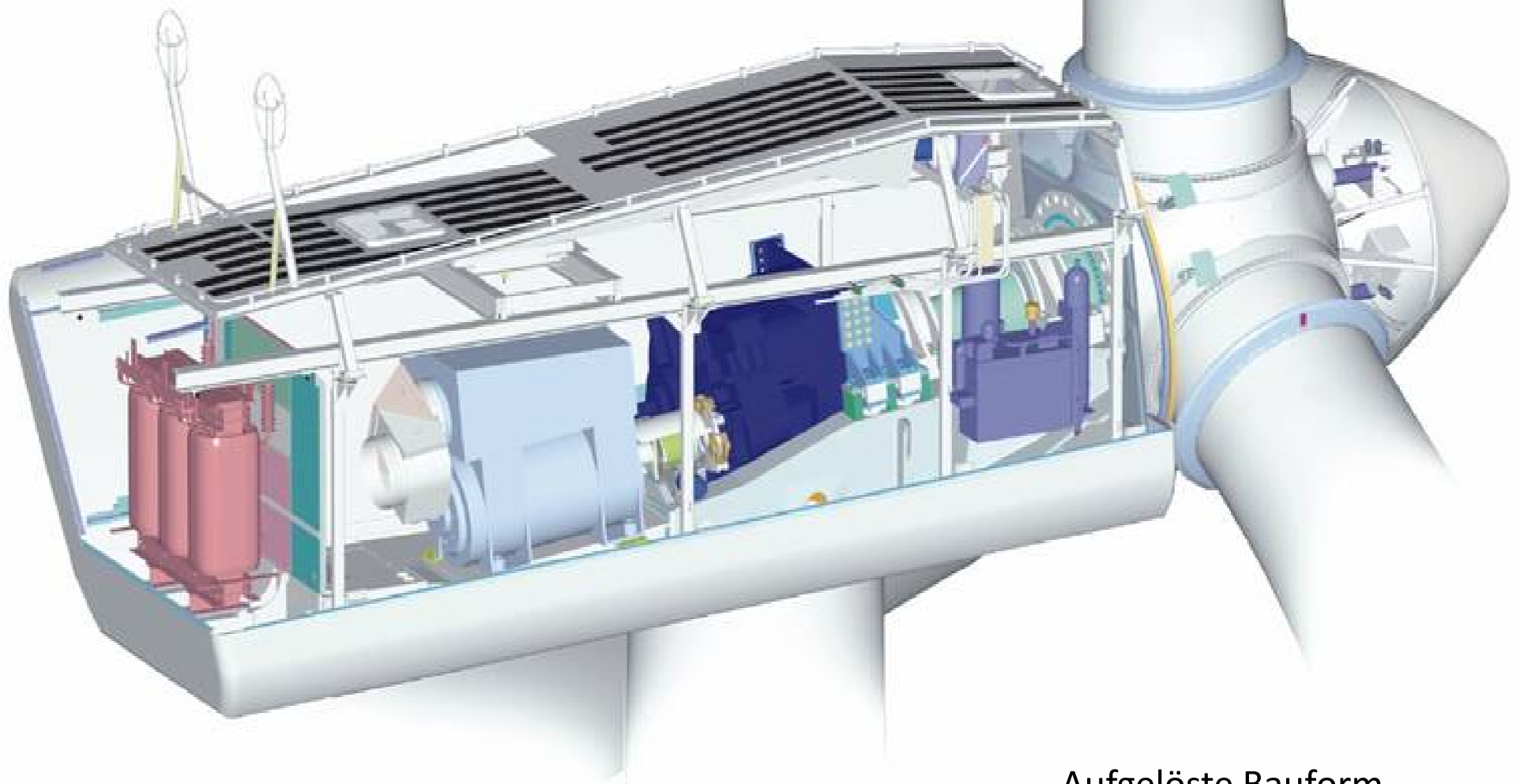
Turmhöhe



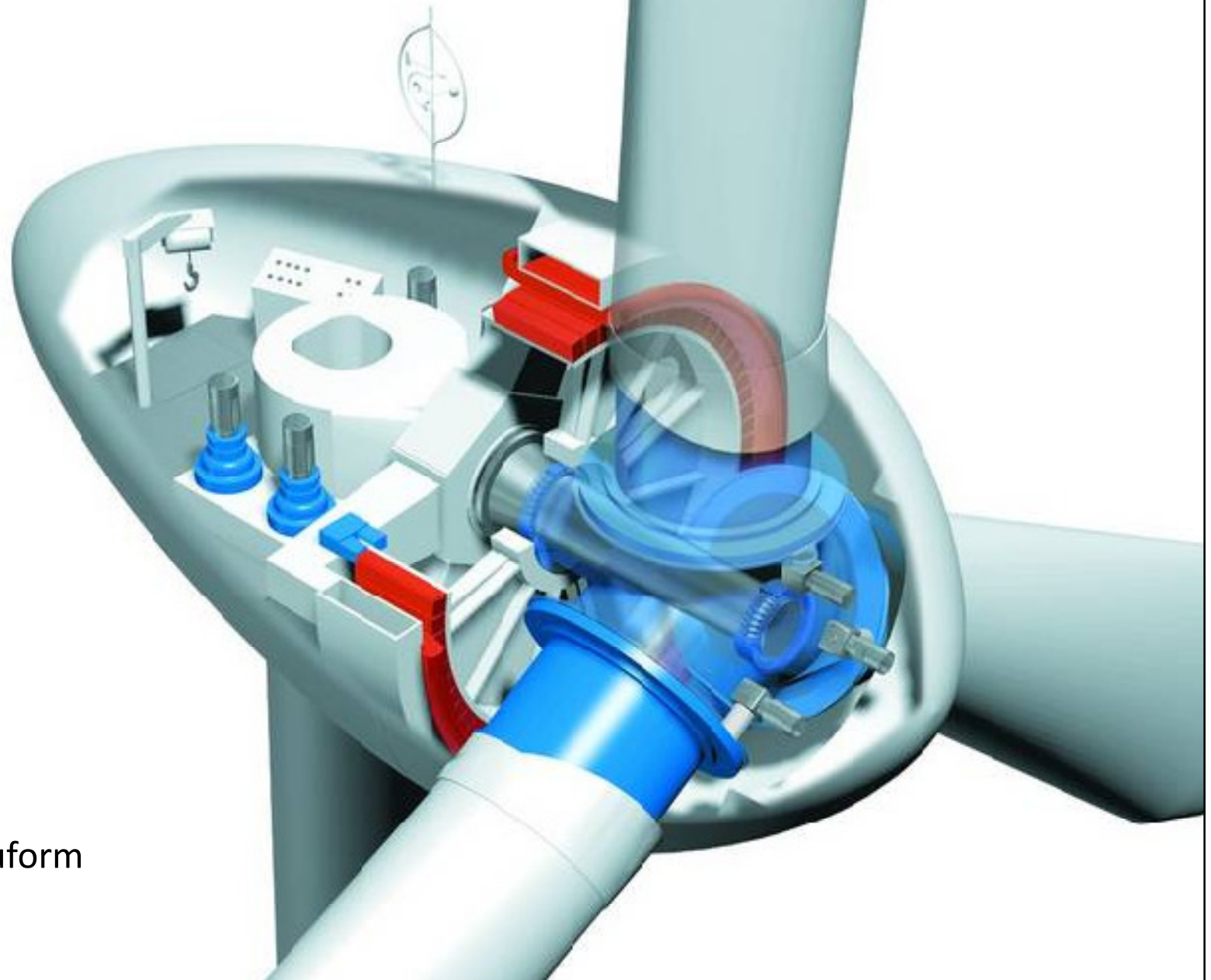


Getriebe: Die Rotorwelle dreht sich langsam mit hohem Drehmoment, der Generator schnell bei geringem Drehmoment

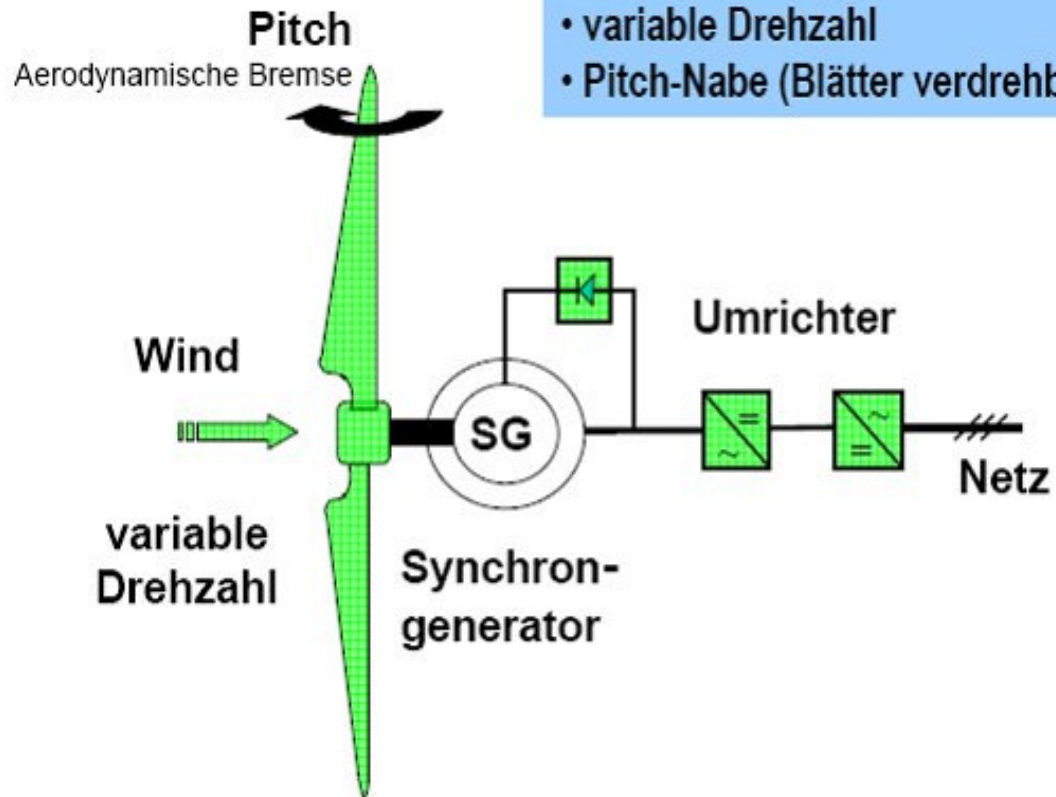
Kühlung: Generatorwirkungsgrad $> 94\%$ \Rightarrow Wasserkühlung bei großen Anlagen nötig



Aufgelöste Bauform



Getriebelose Bauform



- Netzanbindung mit Umrichter
- variable Drehzahl
- Pitch-Nabe (Blätter verdrehbar)

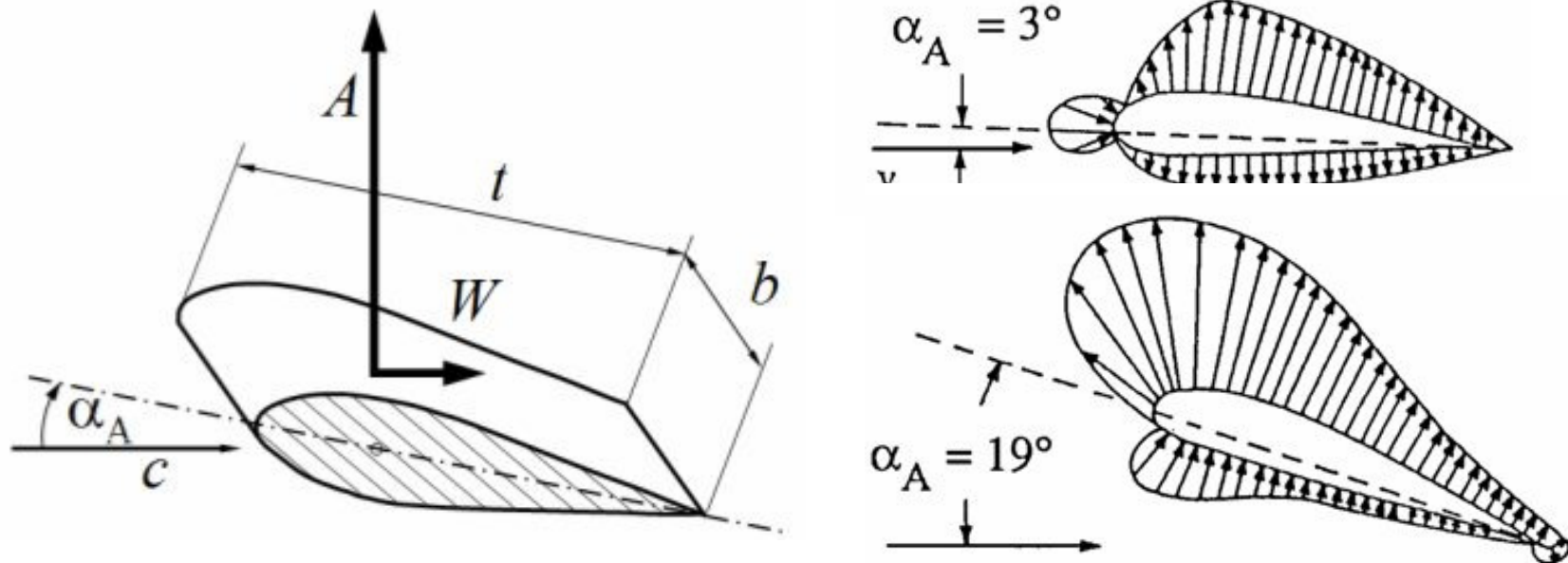


Ringgenerator mit hoher Polzahl: Geringe Umdrehungsfrequenz, erspart u.a. Getriebe
Aber: Ringgeneratoren sind teuer und schwer.

Deswegen: Hauptsächlich Verwendung von modifizierten **Asynchron-Generatoren** mit Getriebe

- **Widerstandsbeiwert** c_W : Maß für den Strömungswiderstand eines Körpers
- **Auftriebsbeiwert** c_A : Maß für die „Auftriebsfreudigkeit“ eines Profils
- **Gleitzahl** $\varepsilon = \frac{c_A}{c_W}$

$$A = c_A(\alpha) \frac{\rho}{2} v^2 \cdot (tb) ; \quad W = c_W(\alpha) \frac{\rho}{2} v^2 \cdot (tb) ; \quad F = \sqrt{A^2 + W^2}$$



- Parameter beim Rotorendesign: **Profil** und **Tiefe**

Das Optimierungsziel ist schlicht **maximaler Auftrieb**.

- Windgeschwindigkeit v , Umlaufgeschwindigkeit $u(r)$

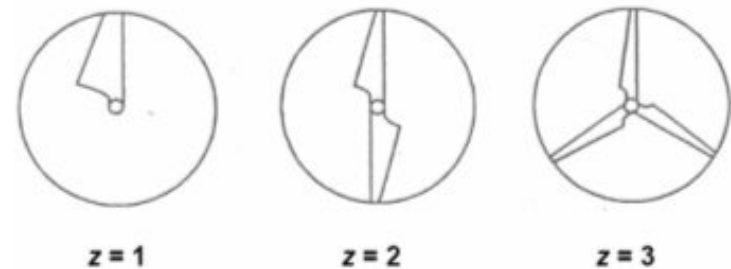
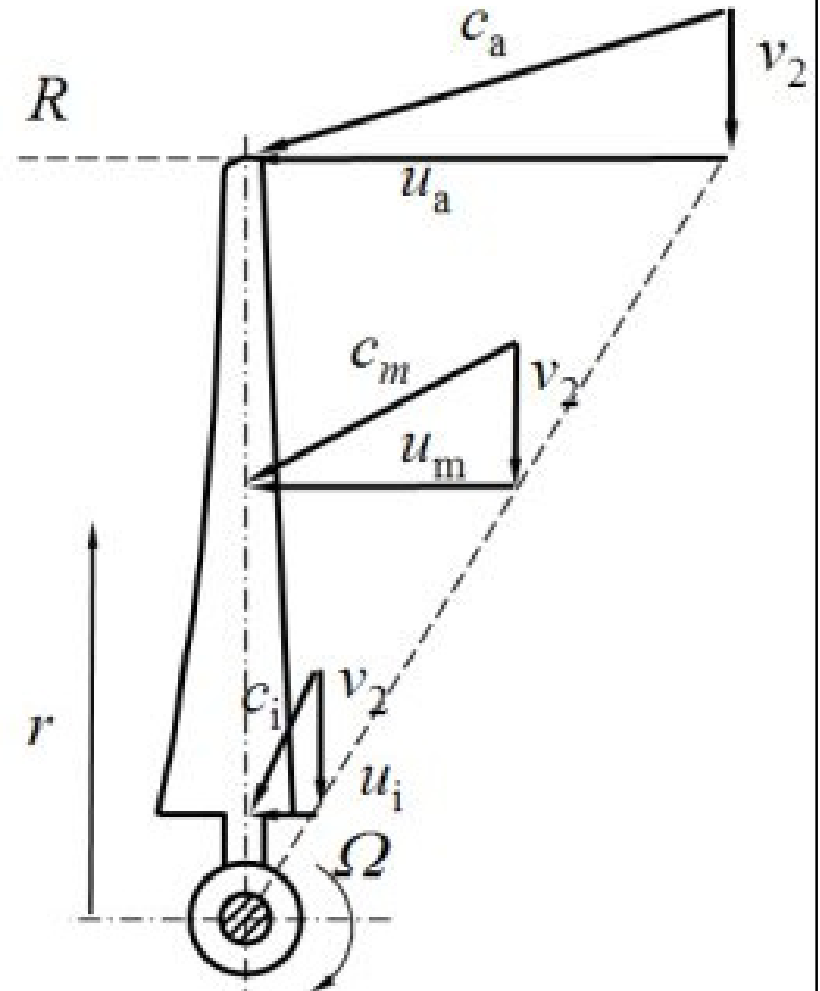
=> Anströmgeschwindigkeit $\vec{c} = \vec{v} + \vec{u}$

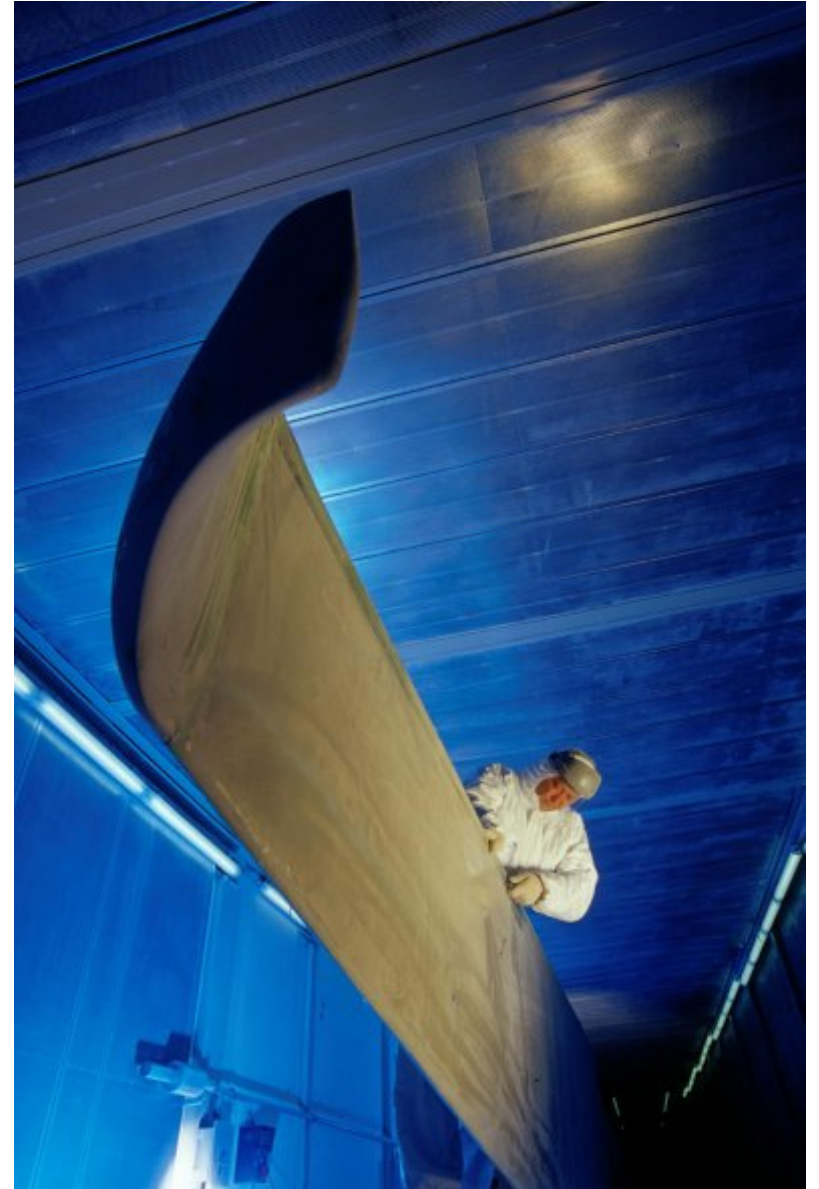
Auftriebs-, Widerstandskraft (s.o.): $A \propto c_A(\alpha) \cdot c^2$

Profil und Blatattiefe sollten also **radiusabhängig** sein
(=> u.a. **Verwindung**).

- Die optimale Blatattiefe kann theoretisch hergeleitet werden:

$$t(r) = \frac{1}{Z} \cdot \frac{1}{C_a} \cdot \frac{8}{9} \cdot \frac{2\pi \cdot R}{\lambda \cdot \sqrt{\left(\frac{r}{R}\right)^2 \cdot \lambda^2 + \frac{4}{9}}}$$





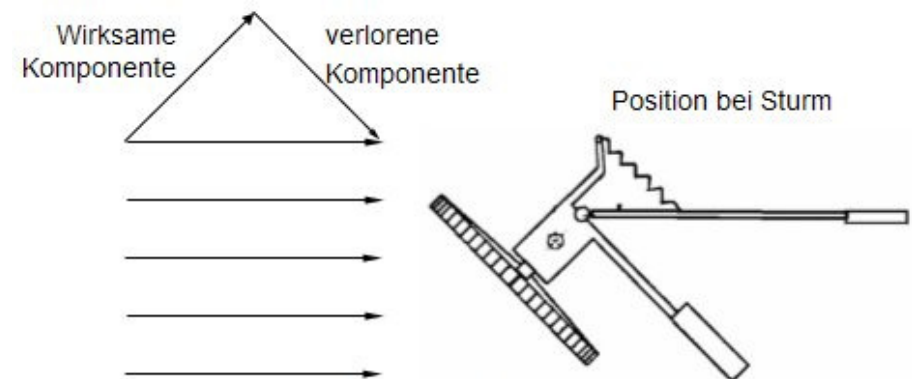
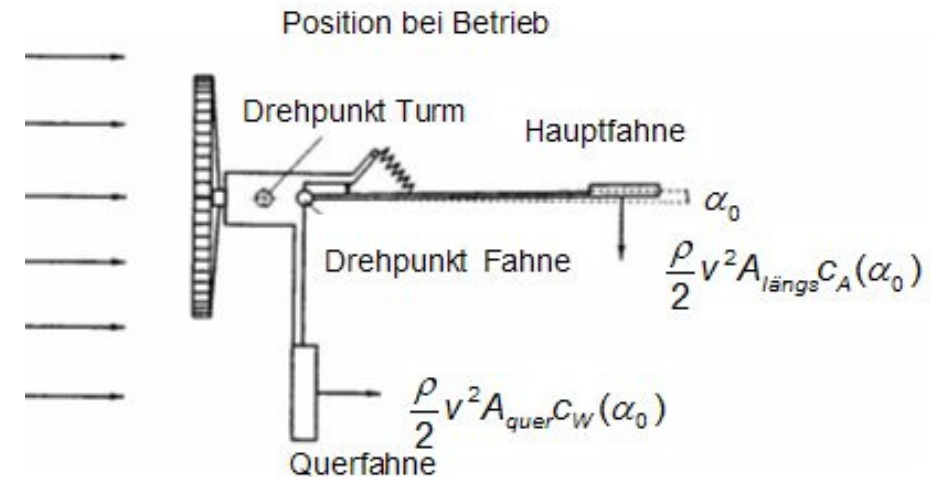
- Wir haben gesehen, dass Windkraftwerke bei bestimmten Schnelllaufzahlen besonders effizient arbeiten.

=> Drehzahlregulierung

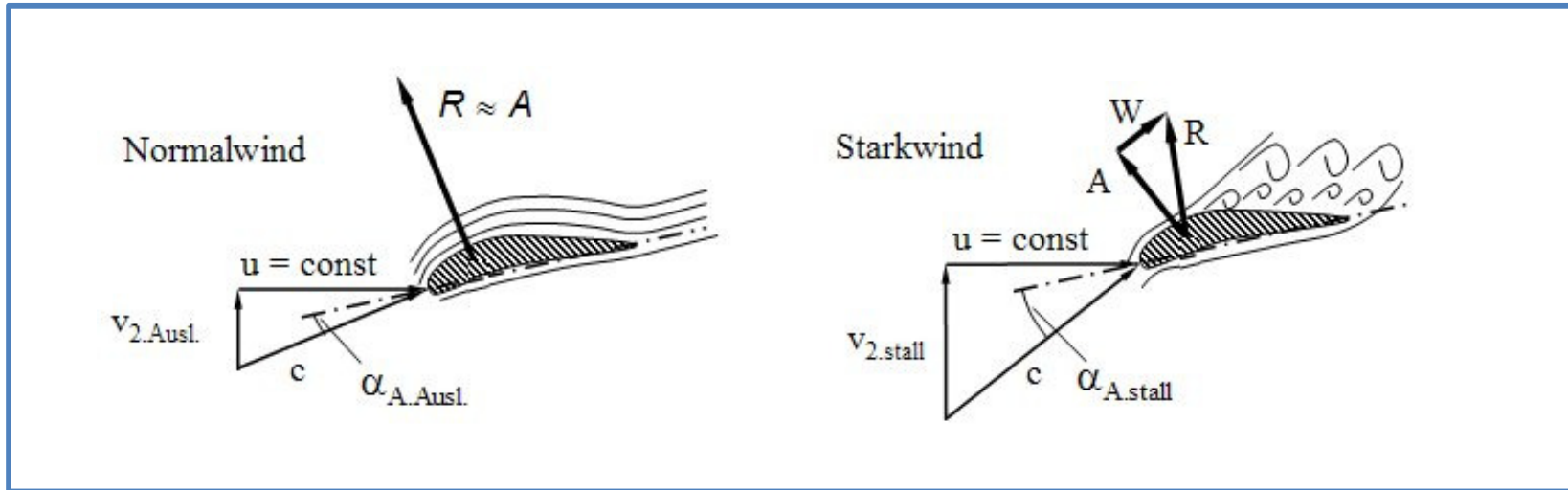
- Durchgängig hoher Leistungsbeiwert
- Betrieb bei hohen Windgeschwindigkeiten möglich (verhindert Überbeanspruchung)

- Methoden zur Drehzahlregulierung

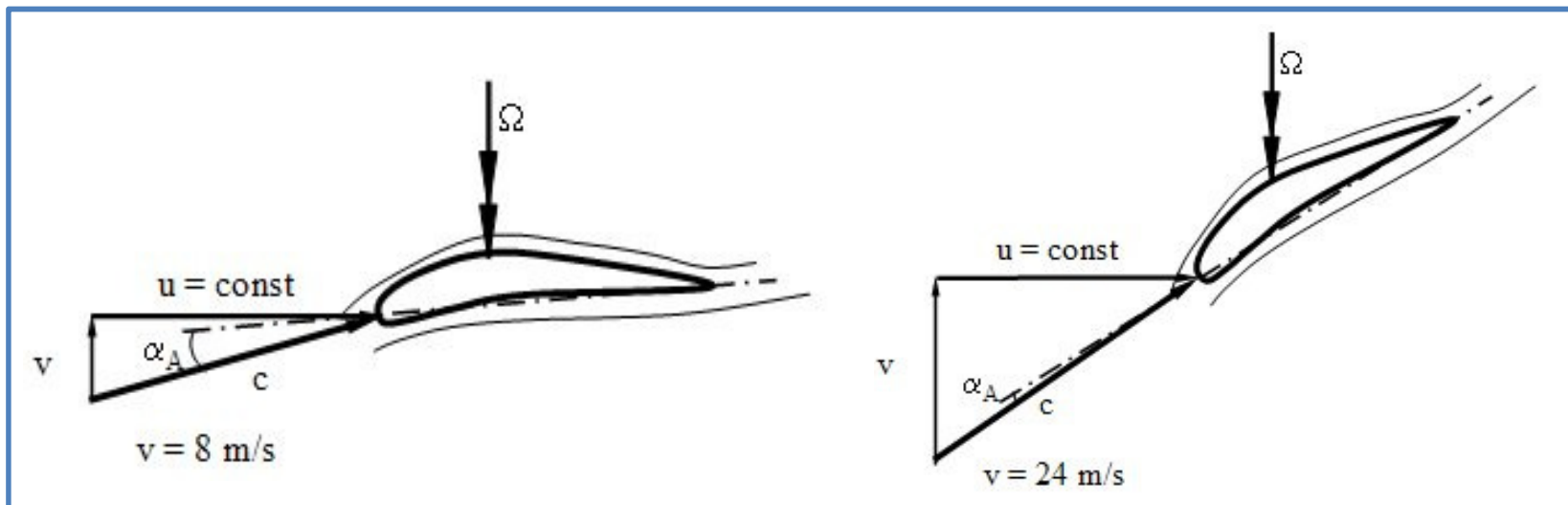
- **Stall** (Selbstregulierend)
- **Pitch**
- **Aktiv-Stall**

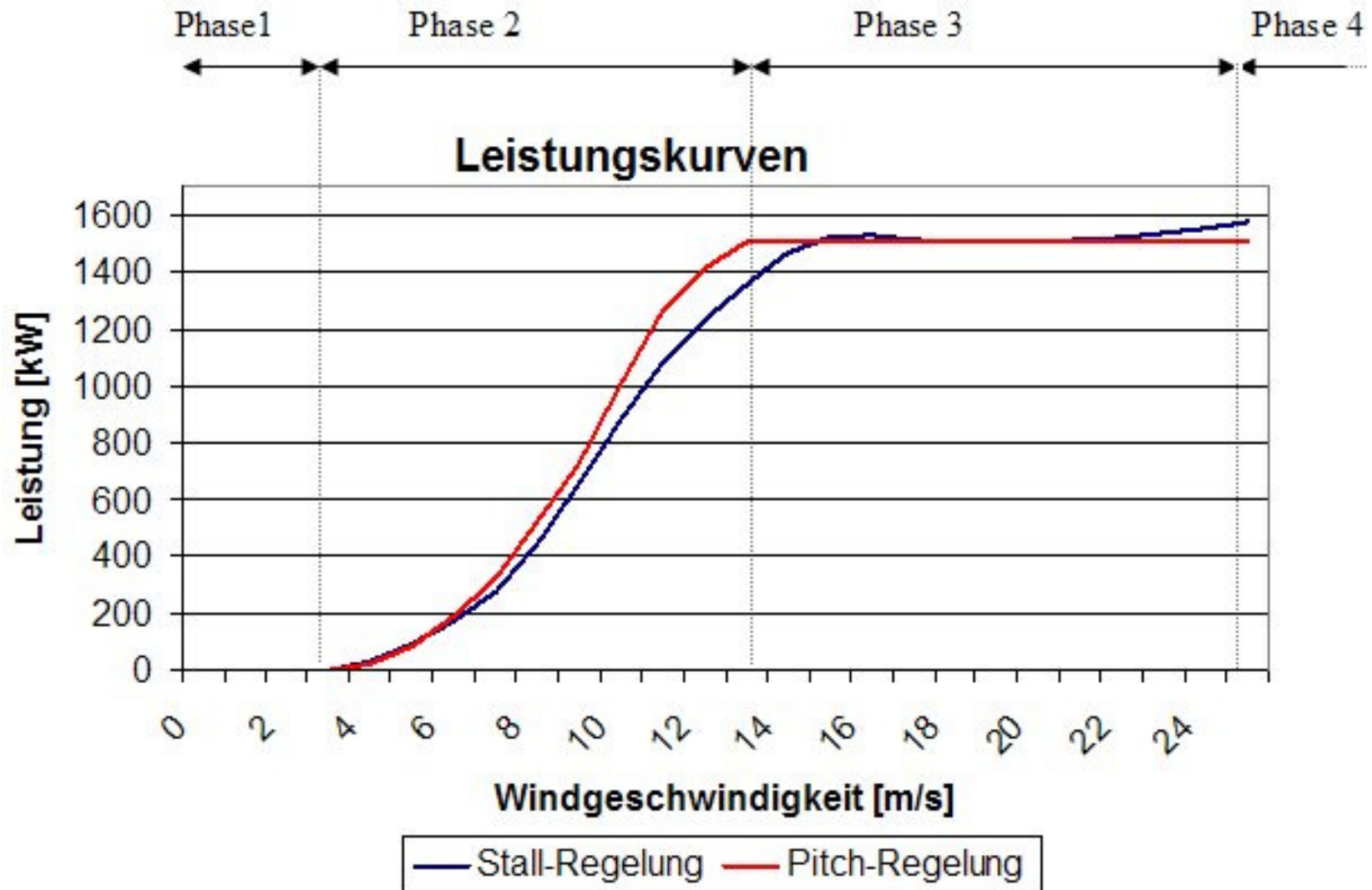


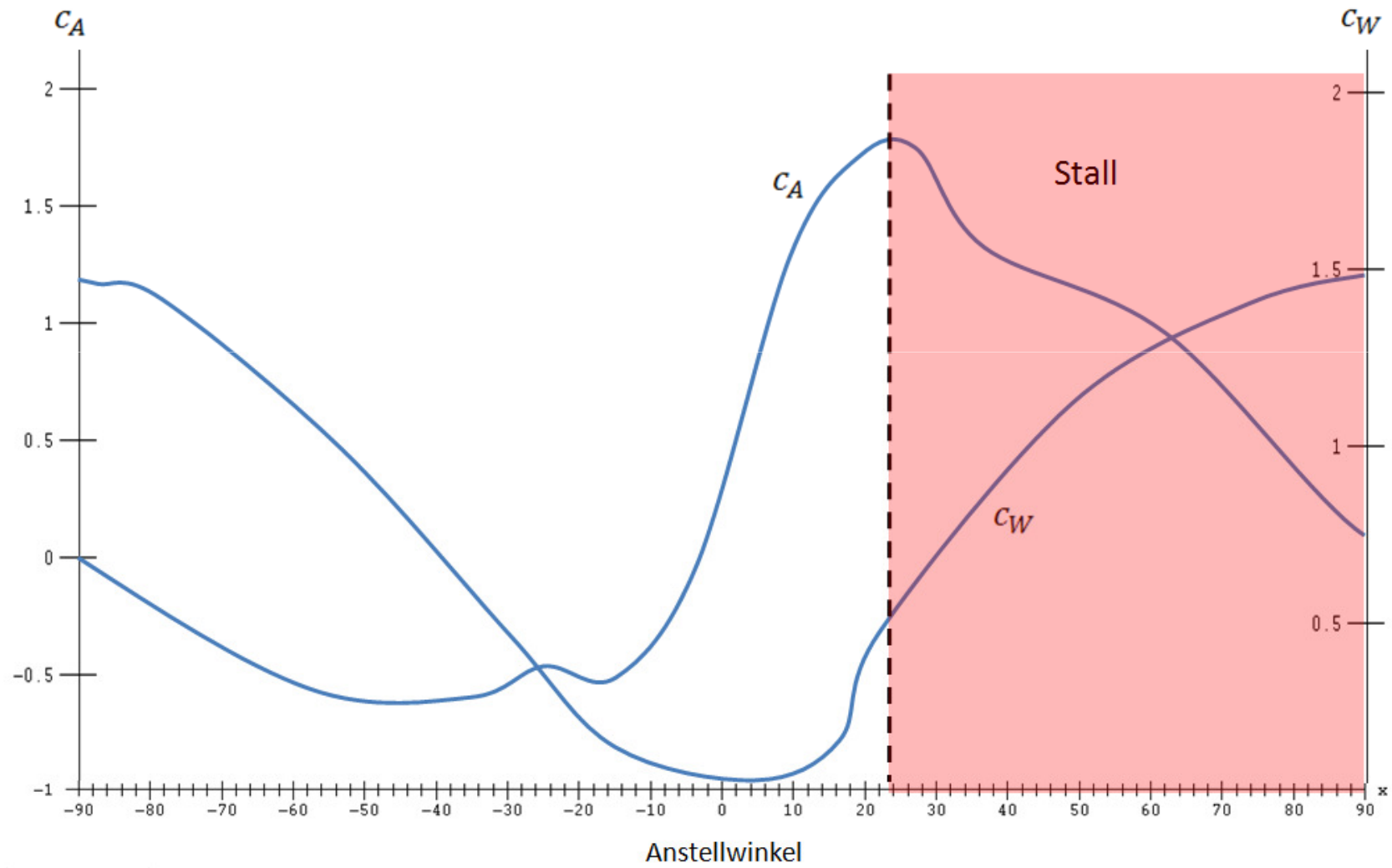
Stall

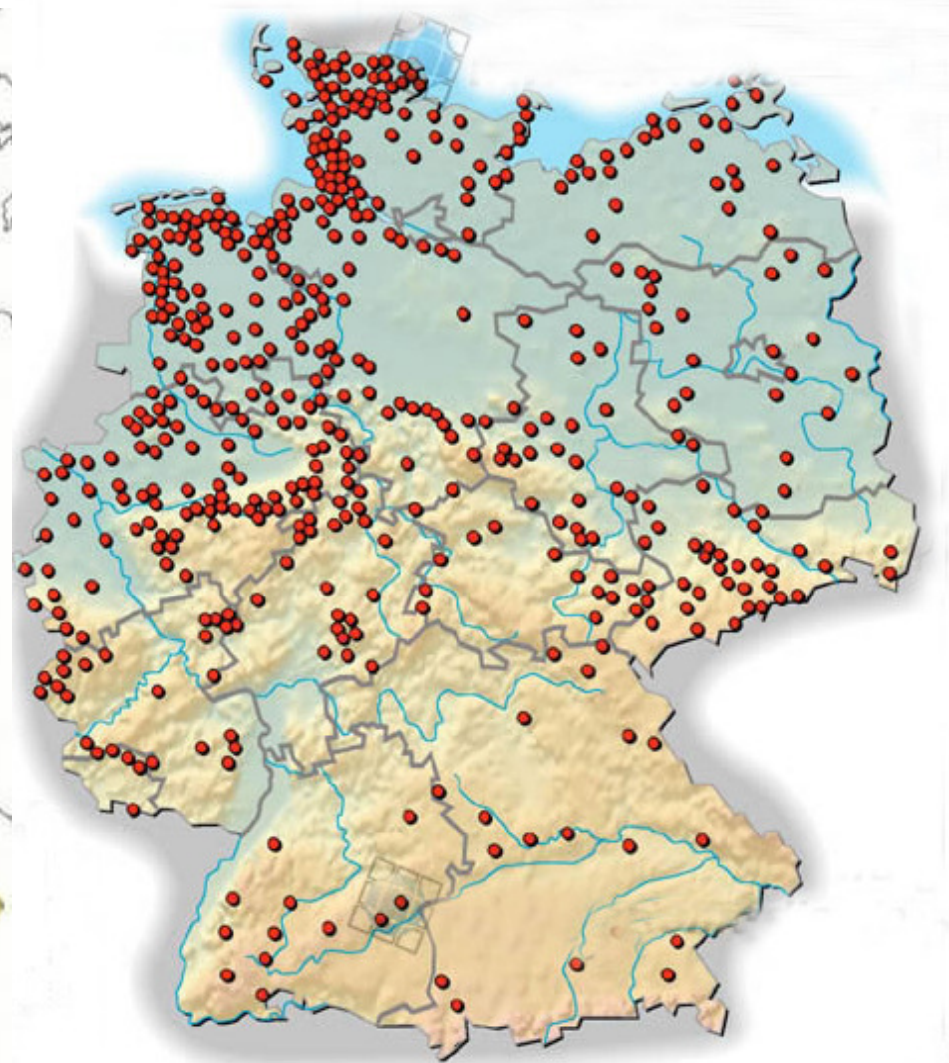
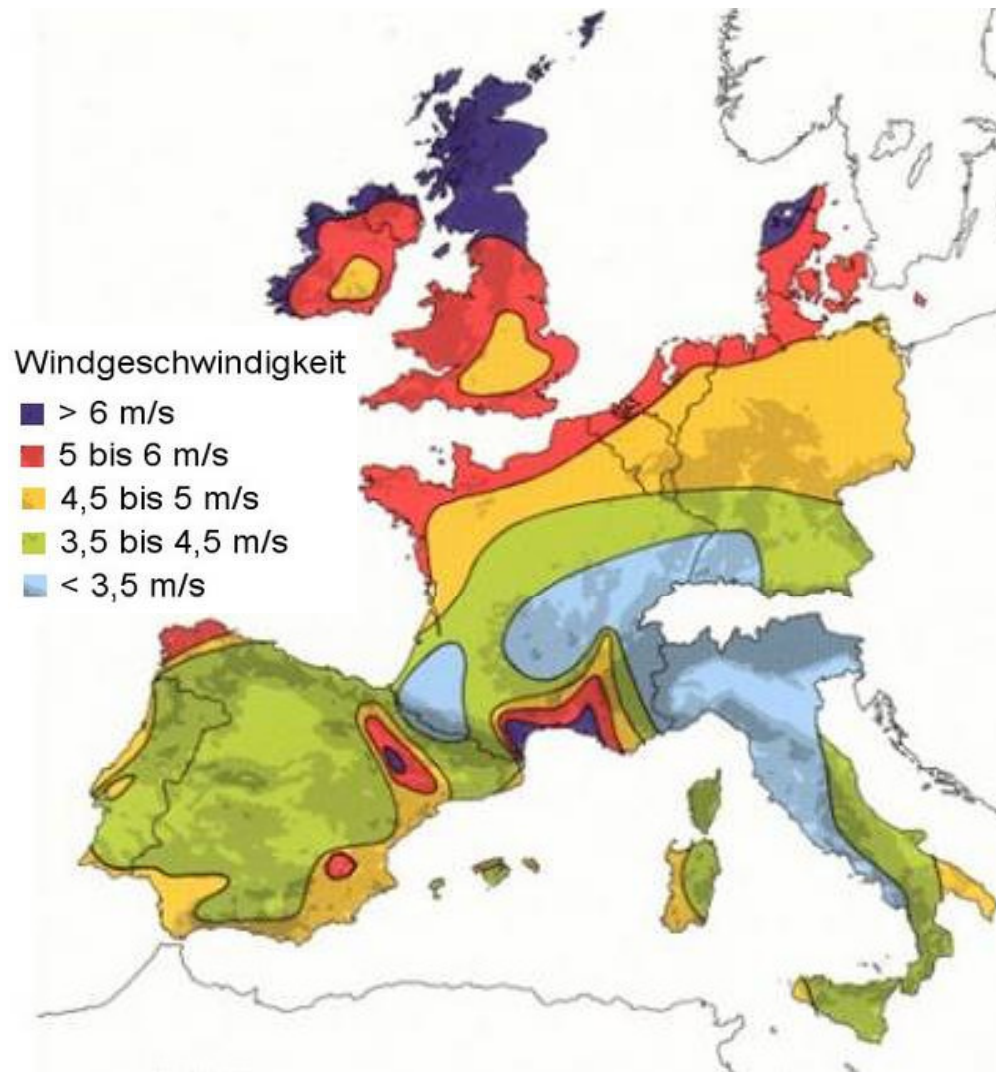


Pitch



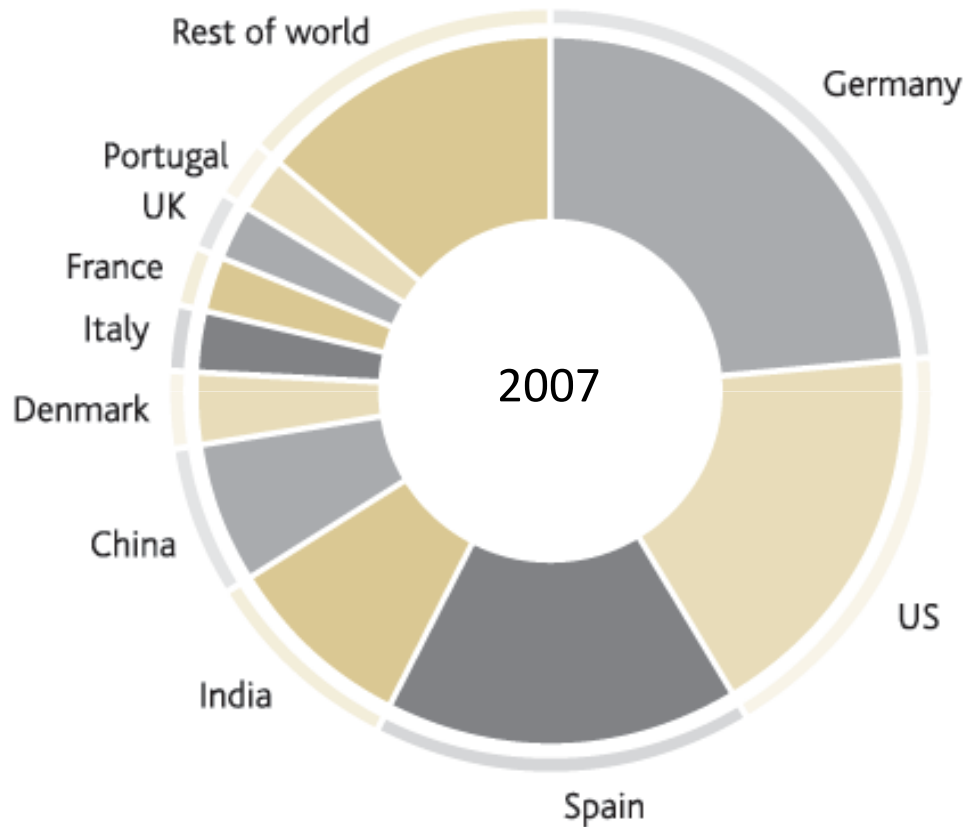






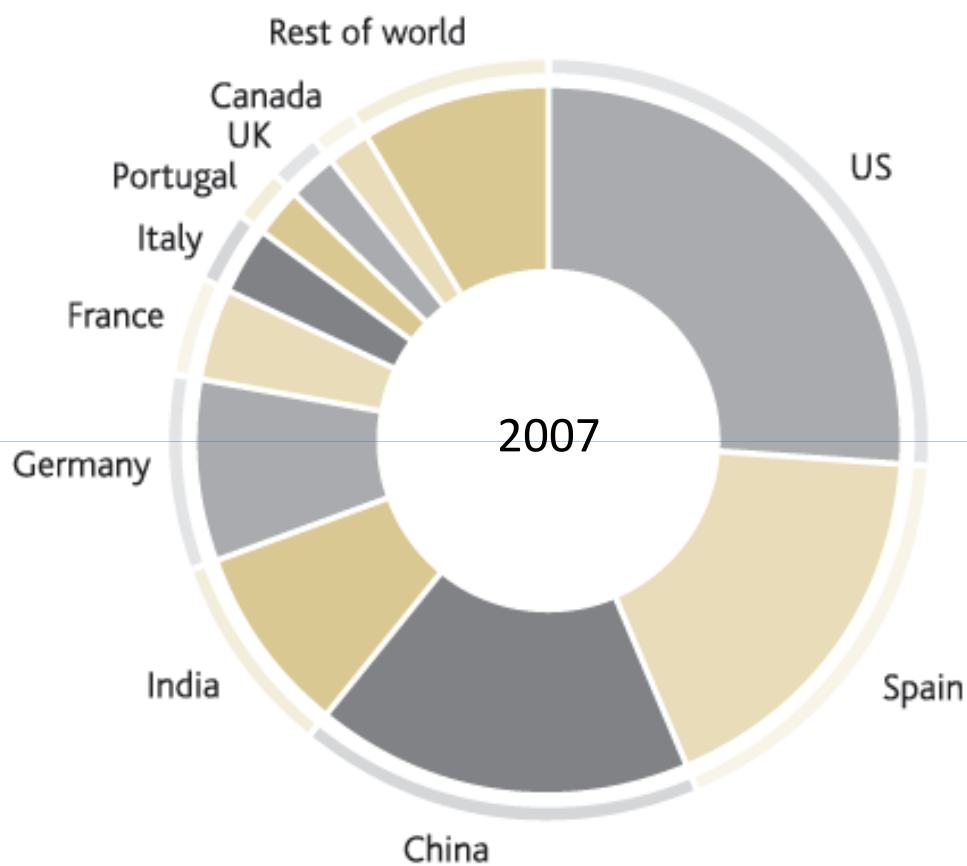
- Umrechnen: $1 \text{ Jahr} = 8760 \text{ Stunden}$; $\text{Vollaststunden} = \frac{\text{Erbrachte Jahresleistung}}{\text{Nennleistung}}$

Schleswig-Holstein: 1MW Nennleistung ergibt 260KW Jahresdurchschnittsleistung!



	MW	%
Germany	22,247	23.6
US	16,818	17.9
Spain	15,145	16.1
India	8,000	8.5
China	6,050	6.4
Denmark	3,125	3.3
Italy	2,726	2.9
France	2,454	2.6
UK	2,389	2.5
Portugal	2,150	2.3
Rest of world	13,019	13.8
Total top 10	81,104	86.2
Total	94,123	100.0

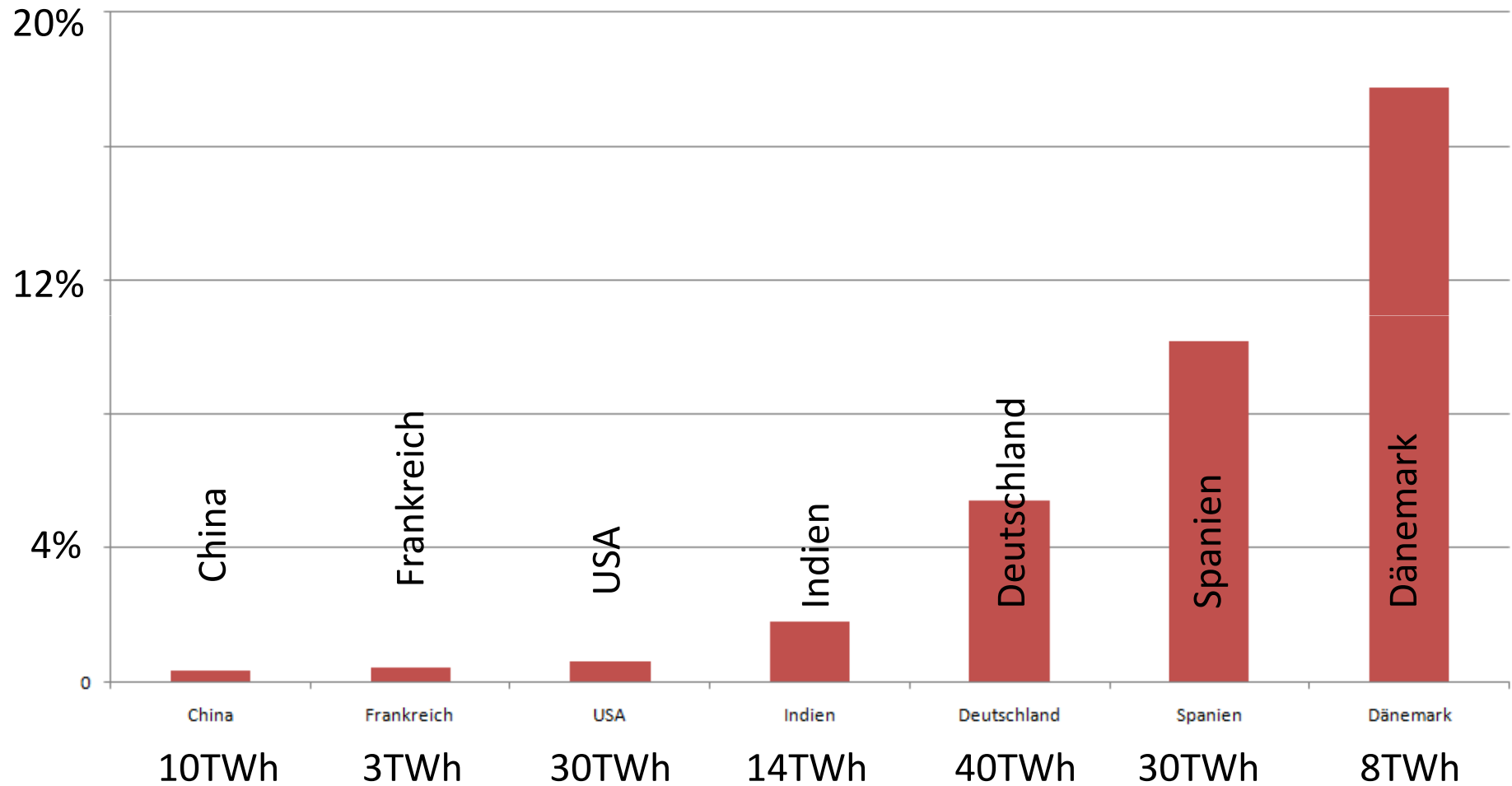
TOP 10 TOTAL INSTALLED CAPACITY



	MW	%
US	5,244	26.1
Spain	3,522	17.5
China	3,449	17.2
India	1,730	8.6
Germany	1,667	8.3
France	888	4.4
Italy	603	3.0
Portugal	434	2.2
UK	427	2.1
Canada	386	1.9
Rest of world	1,726	8.6
Total top 10	18,350	91.4
Total	20,076	100.0

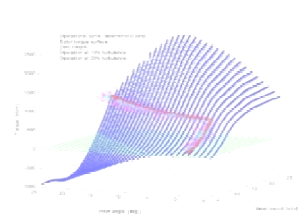
TOP 10 NEW CAPACITY

Anteil an der Gesamtstromproduktion





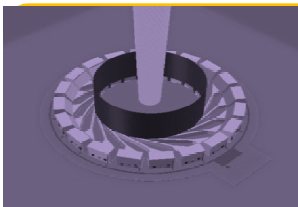
1. Geschichte der Windenergienutzung



2. Windleistung und Betzsches Gesetz

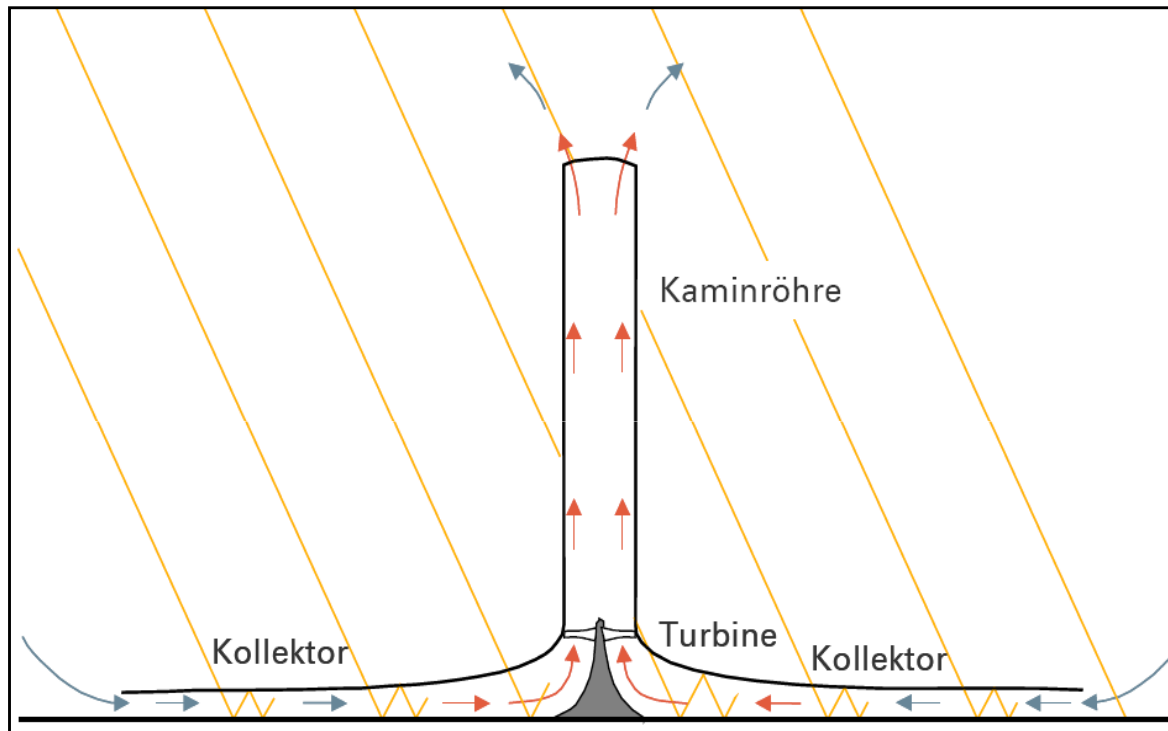


3. Windkraftkonverter



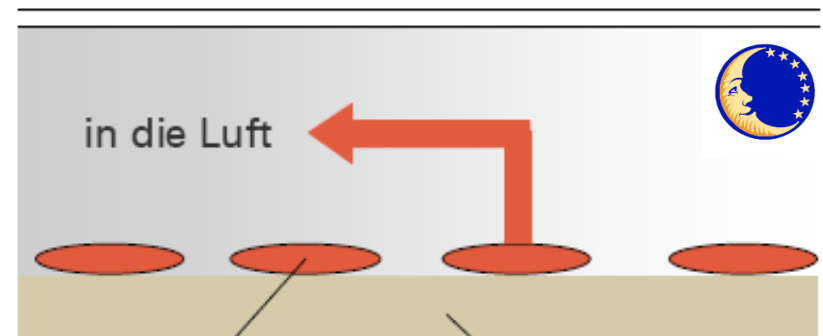
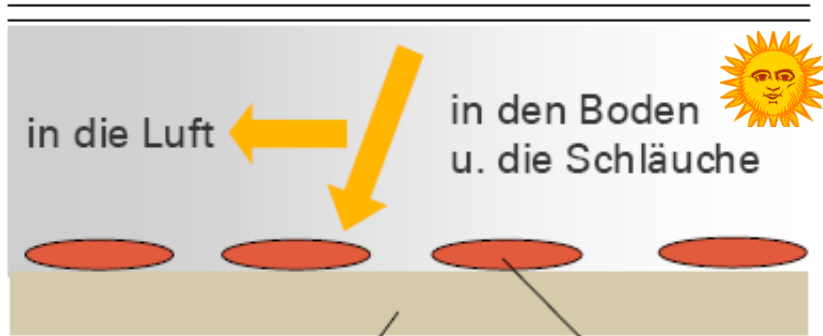
4. Zukunftspotenzial - Entwicklungstrends

- Wind lässt sich auch selbst „herstellen“: Alles, was man braucht, ist ein **Temperaturgradient**. Wir nutzen dazu den **Treibhauseffekt** und landen bei folgender Bauform:



- Vorteile:
- Benötigt **kein Kühlwassersystem**
 - Profitiert auch von diffuser Solarstrahlung
 - Gewährleistet **24 Stunden-Betrieb** auf rein solarer Basis (Wasserspeicher)
- Nachteil:
- 200MW Leistung => Kaminhöhe 1000m, Kollektorfläche 36km²: **Teuer!**

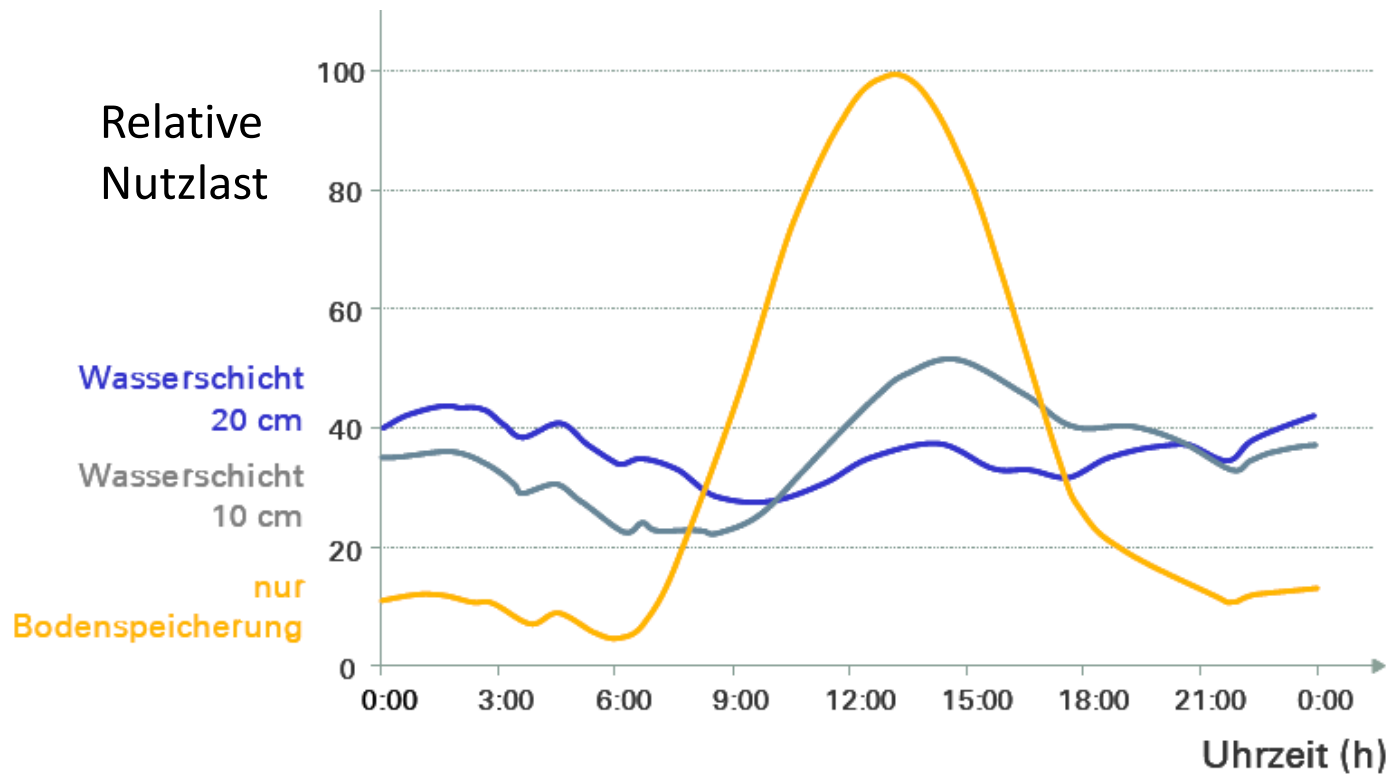
Glasdach



Boden

Wasserschläuche

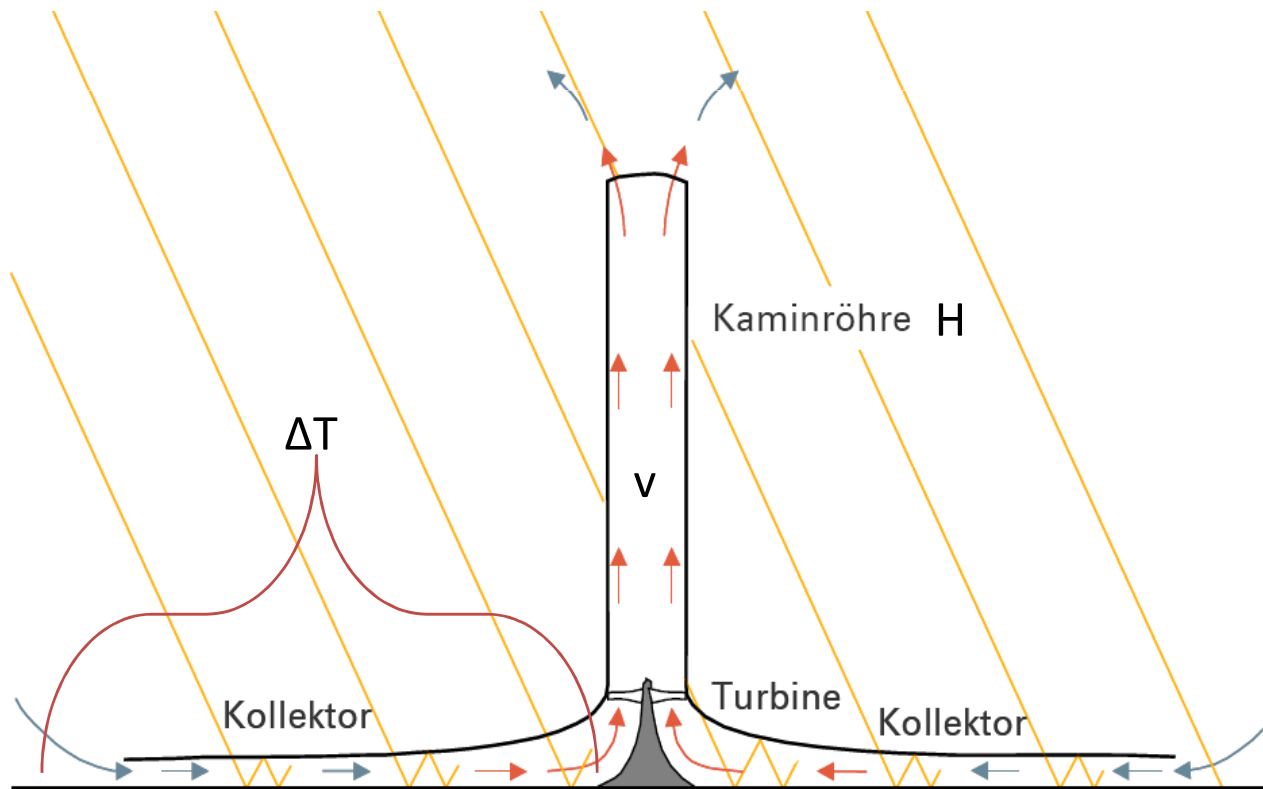
Boden



- Ausgangsleistung: $P = \dot{Q}_{solar} \cdot \eta_{Kraftwerk} = \dot{Q}_{solar} \cdot \eta_{Koll} \cdot \eta_{Kamin} \cdot \eta_{Turbine}$; $\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T$

Der Kamin wandelt den vom Kollektor gelieferten Wärmestrom in kinetische Energie (**Konvektionsströmung**) und potenzielle Energie um (**Druckabfall an der Turbine**)

=> **Dichtedifferenz**: Luftsäule im Turm <-> Umgebungsluft $\Delta p_{ges} = g \cdot \int_0^{H_t} (\rho_a - \rho_t) \cdot dH$



- Gesamtleistung $P_{ges} = \Delta p_{ges} \cdot v_{Turm} \cdot A_{Turm}$. Anders dargestellt: $P_{ges} = \frac{1}{2} \dot{m} \cdot v_{Turm,max}^2$

- Strömungsgeschwindigkeit im Turm: $v_{Turm,max} = \sqrt{2 \cdot g \cdot H_{Turm} \cdot \frac{\Delta T}{T_0}}$ (Freier Fall + ΔT)

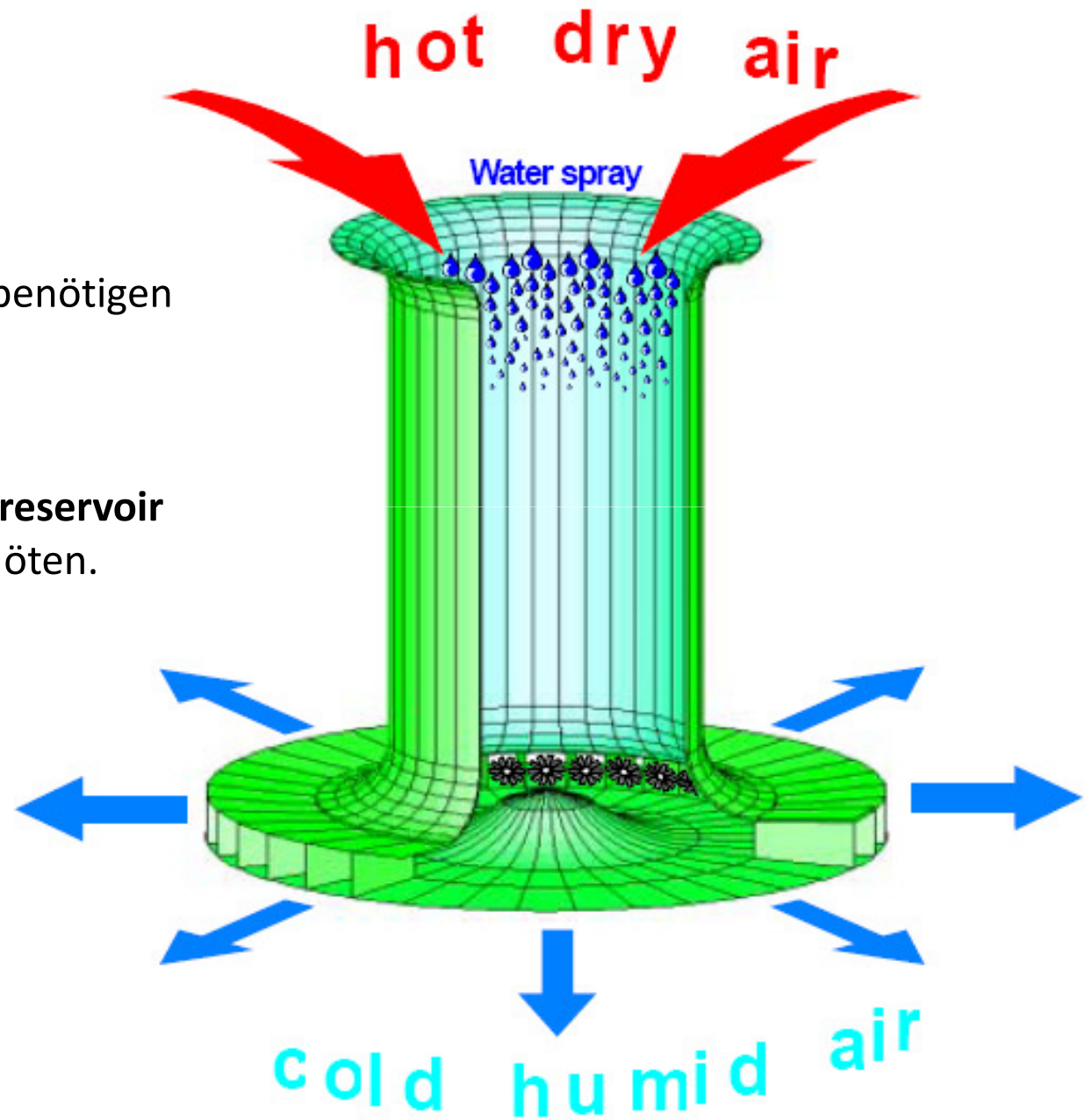
=> **Wirkungsgrad:** $\eta_{Turm} = \frac{P_{ges}}{\dot{Q}} = \frac{g \cdot H}{c_p \cdot T_0}$ (Hängt nur von Turmhöhe ab)

- Typisches Kraftwerk: $H=1000\text{m}$; $\Delta T = 35\text{K}$, $v = 15 \text{ m/s}$; => $\eta_{Koll} \cdot \eta_{Kamin} \cdot \eta_{Turbine} = 1\%$

Turmhöhe:	194,6 m
Turmradius:	5,08 m
mittlerer Kollektorradius:	122,0 m
mittlere Dachhöhe:	1,85 m
Anzahl Turbinenblätter:	4
Turbinenblattprofil:	FX W-151-A
Schnelllaufzahl:	10
Betriebsarten:	Inselbetrieb oder Netzbetrieb
typischer Temperaturanstieg im Kollektor:	$\Delta T = 20 \text{ K}$
Nennleistung:	50 kW
Kunststoffmembran-Kollektor-Fläche:	40'000 m ²
Glasdach-Kollektor-Fläche:	6'000 m ²

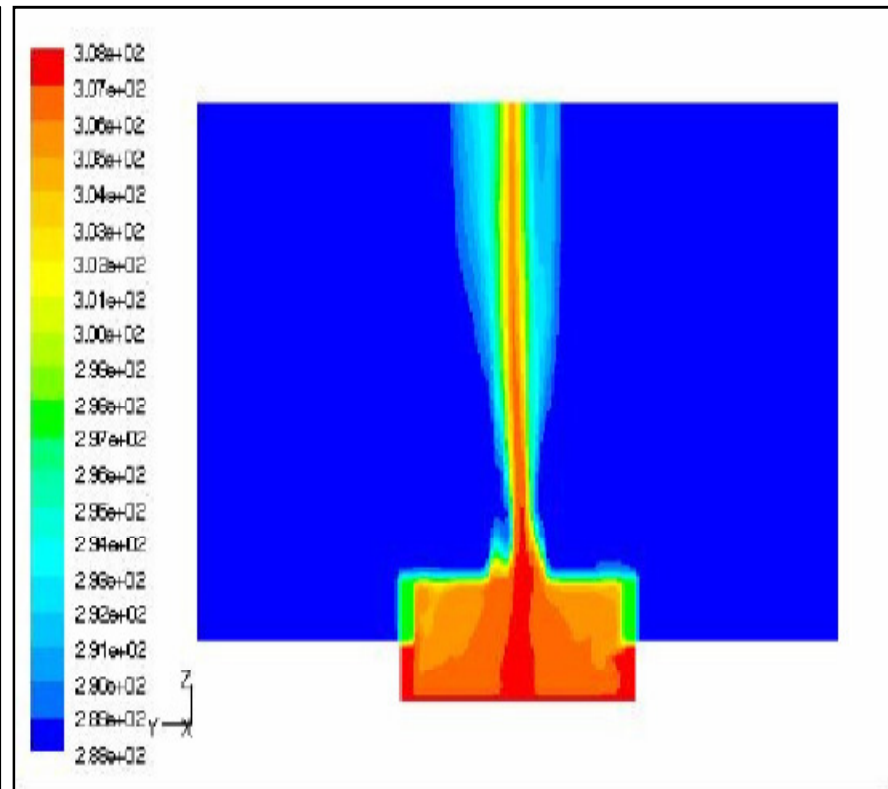
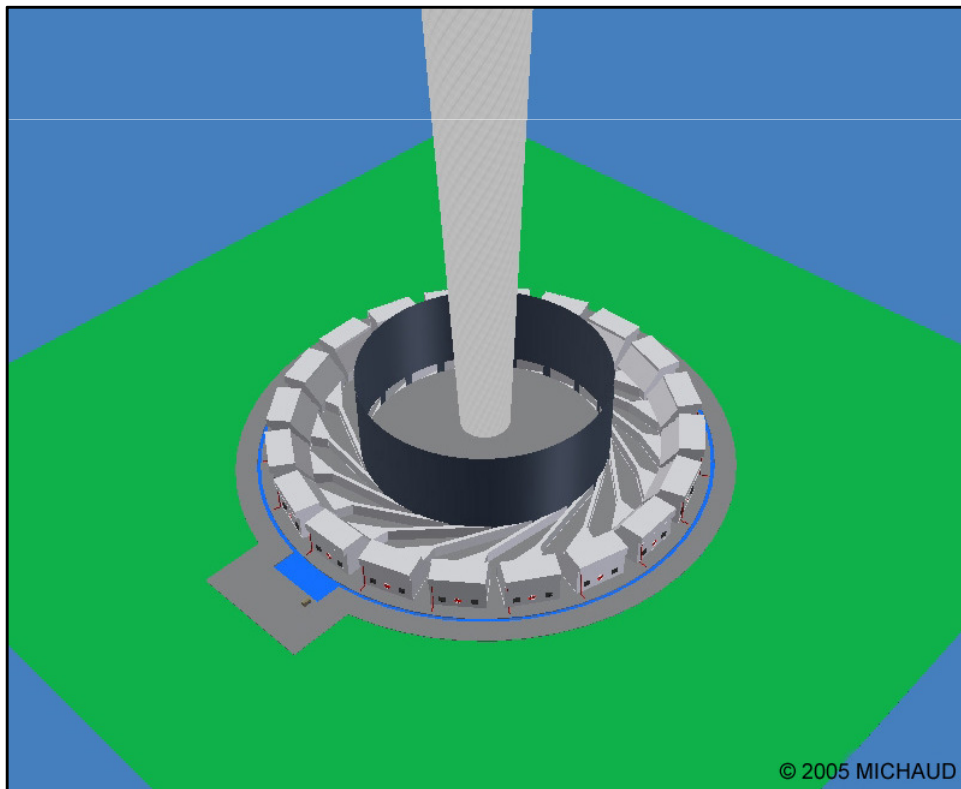


- Vorteil: Fallwindkraftwerke benötigen **keinen Kollektor**.
- Nachteil: Es sind ein **Wasserreservoir** sowie Wasserpumpen von Nöten.

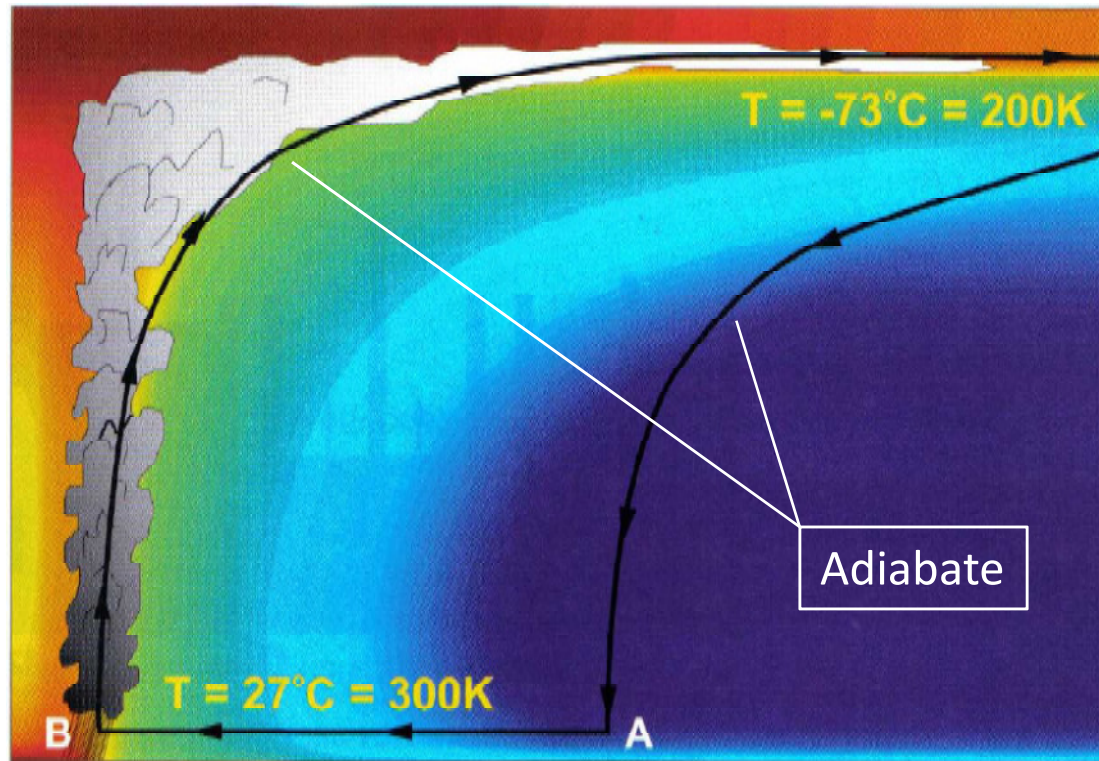


Atmospheric Vortex Engine (nach Louis Michaud)

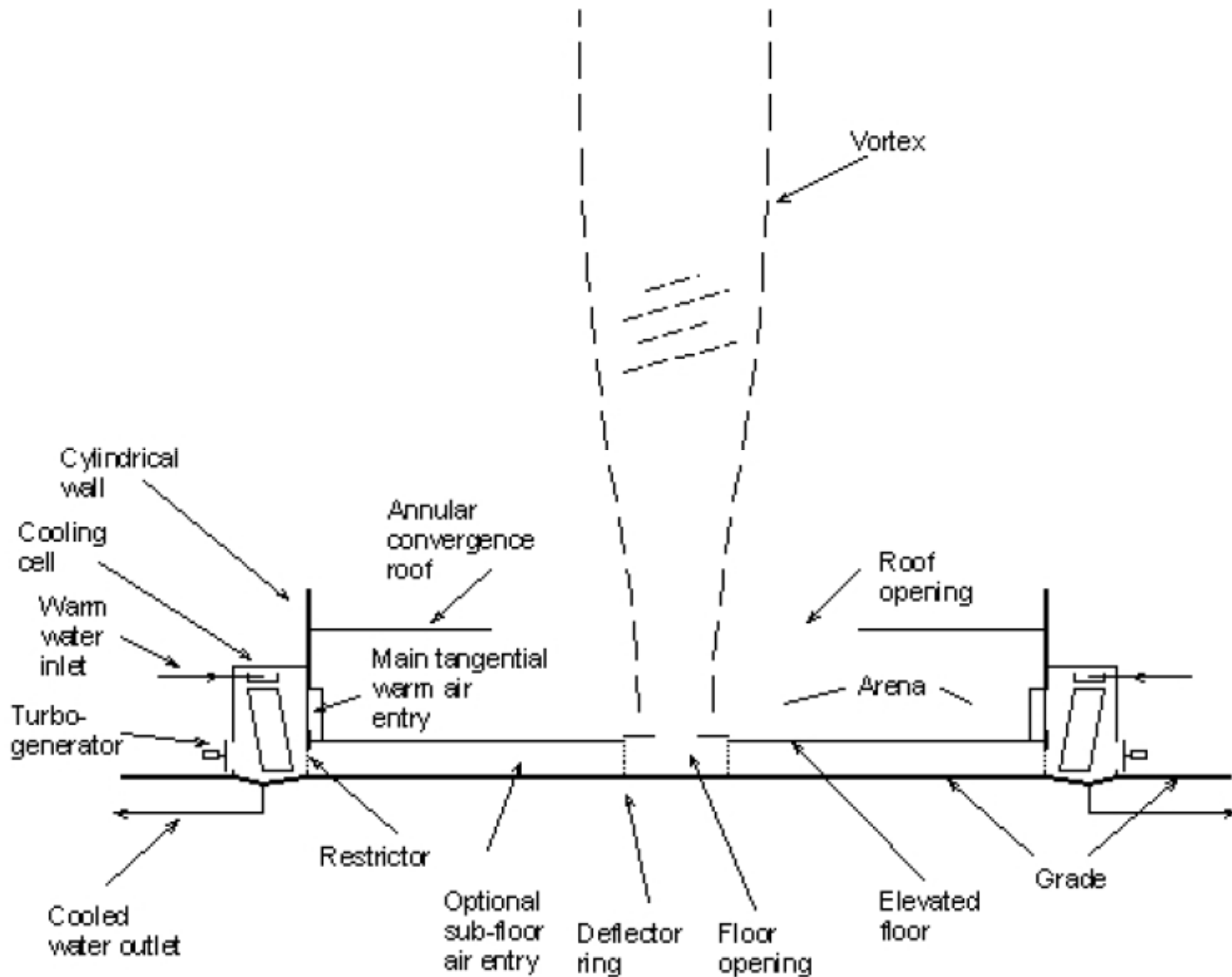
- Konzept: Stromerzeugung mithilfe eines **künstlichen Tornados** („Windstrudelkraftwerk“)
- Vermag **Abwärme eines konventionellen Kraftwerks** zu nutzen => Wirkungsgraderhöhung

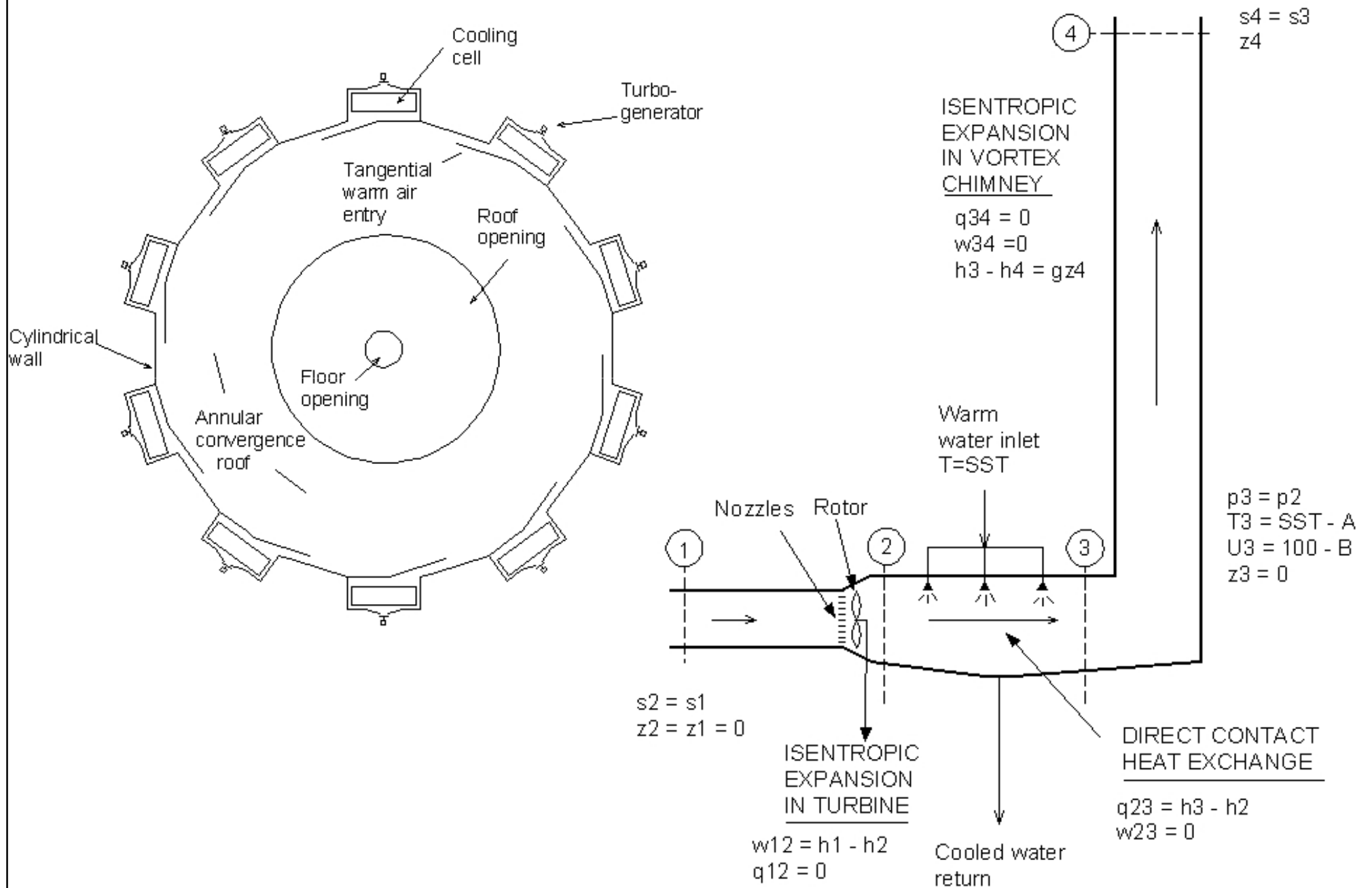


Warum funktioniert? Antwort: **Hurrikane sind ein Carnot-Zyklus!**



Verwandschaft zum Aufwindkraftwerk: Der Wirbel simuliert einen besonders hohen Kaminturm, der bis an die Stratosphäre reicht (50-500MW, $\eta \leq 30\%$).





Airborne Windturbine

