Physikalische und technische Grundlagen der Windenergie

Eine systemintegrative Analyse von der atmosphärischen Entstehung bis zur anlagentechnischen Leistungswandlung.

I Physikalische Grundlagen

Solare Entstehung

Atmosphärische Kräfte

Vertikalprofile

II Mathematische Leistungsbestimmung

Die Hellmann-Formel

Die kubische Leistungsgleichung

III Anlagentechnik und Regelung

Aerodynamische Prinzipien

Rotorarchitekturen

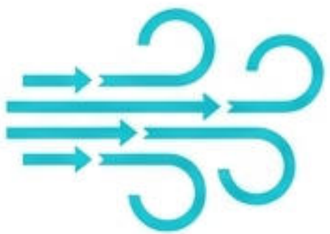
Pitch, Stall und Azimut

Gemini Notebook

Windenergie als sekundärer solarer Energieträger

Solare Strahlung trifft auf die Erdatmosphäre.

Ca. 2,5 % der solaren Strahlung werden für die Bewegung von Luftmassen aufgewendet.



Daraus resultiert eine überschlägige Gesamtleistung von $4{,}4 \cdot 10^{12}$ W an Windenergie weltweit.

Windkraftanlagen wandeln diese kinetische Energie über Rotoren in mechanische und schließlich über Generatoren in elektrische Energie um.

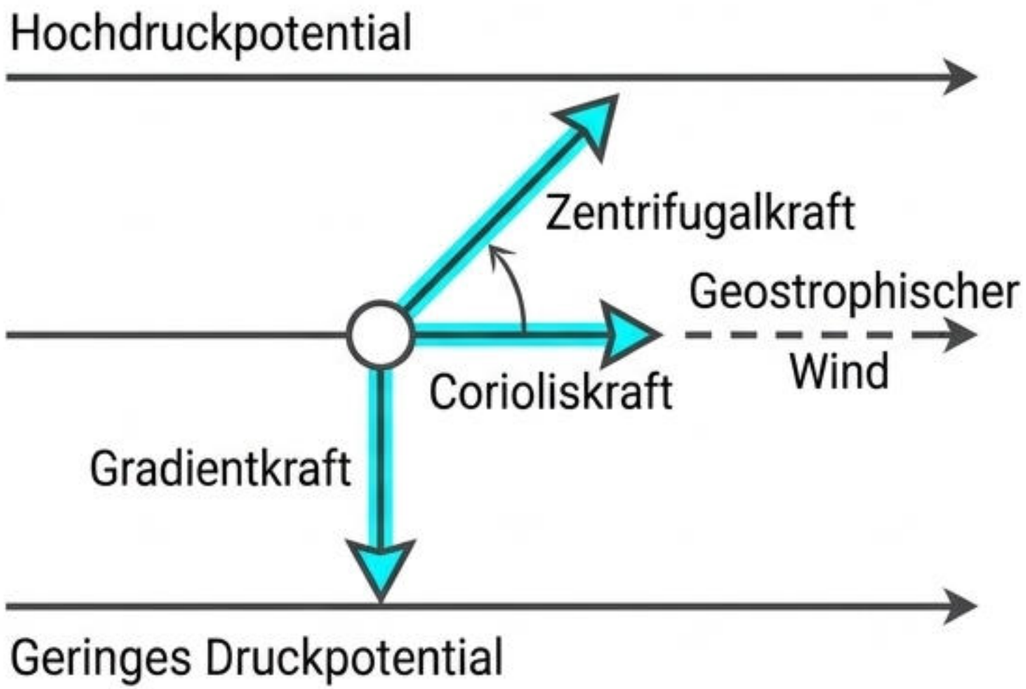
Gemini Notebook

Das Kräftespiel der Strömungen: Der geostrophische Wind

Auslöser: Gradientkraft – Luft strömt vom hohen zum geringen Druckpotential (Druckausgleich).

Ablenkung: Corioliskraft – Wirkt senkrecht zur Bewegungsrichtung aufgrund der Erdrotation.

Zusatzeffekt: Zentrifugalkraft – Wirkt radial nach außen bei gekrümmten Isobaren (führt zum Gradientwind).



Gleichgewicht: Wenn Gradient- und Corioliskraft im Gleichgewicht sind, bewegt sich die Luftmasse parallel zu den Isobaren ohne weitere Beschleunigung.

Geostrophischer Wind

Gemini Notebook

Globale Zirkulation vs. Lokale Windsysteme

Makro-Ebene (Freie Atmosphäre)

Globale Zirkulationssysteme, bedingt durch Erdrotation, Kontinente, Meere und den Temperaturunterschied zwischen **Äquator (Tiefdruck)** und **Polen (Hochdruck)**.

Energetisch für heutige Anlagen kaum nutzbar.

Mikro-Ebene (Erdnahe Grenzschicht)



Antitriptische Winde in Bodennähe. Stark beeinflusst durch **Oberflächenrauigkeit**.

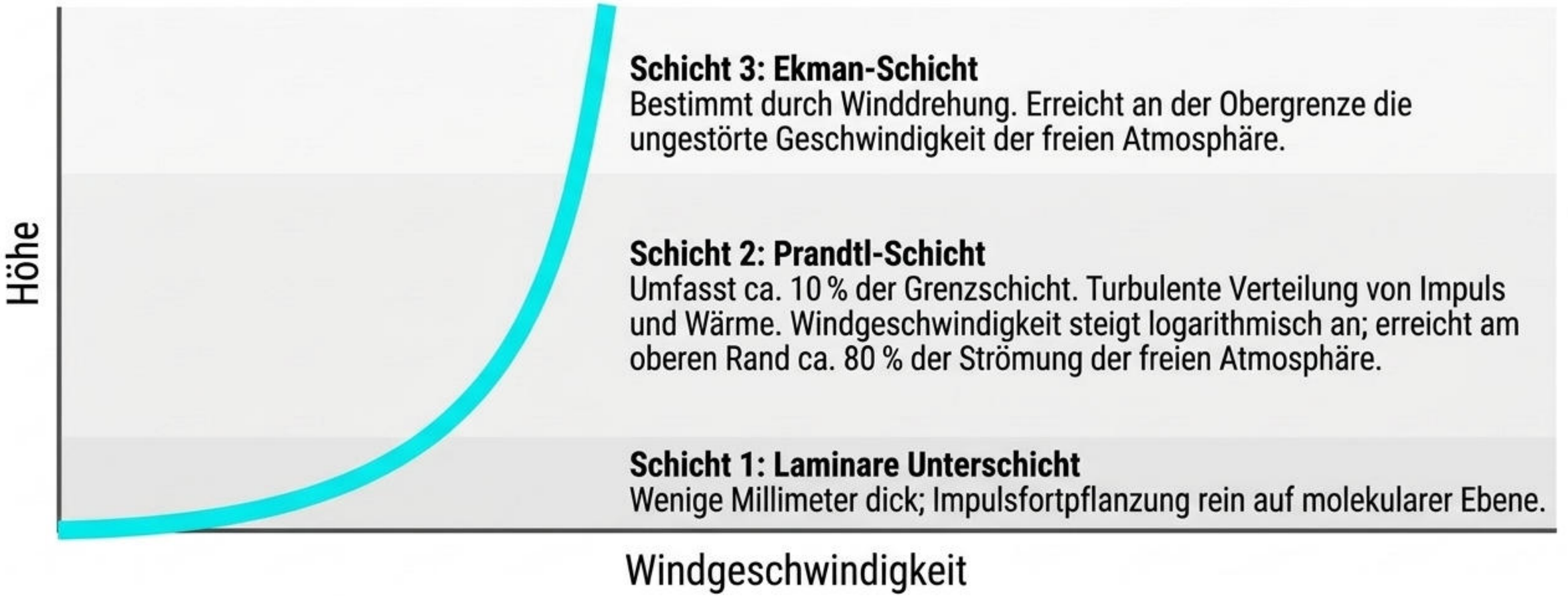
Lokale Zirkulationen: Thermische Auf- und Abwinde, **Land- und Seewind**, **Berg- und Talwind**.

Dynamik: Ausgleichsströmungen durch aufsteigende warme und absteigende kalte Luftmassen; Richtungswechsel im **Tag- und Nachtrhythmus**.

Gemini Notebook

Das vertikale Windprofil der planetarischen Grenzschicht

Gesamtdicke der Grenzschicht variiert zwischen 500 m und 2000 m.



Schicht 3: Ekman-Schicht
Bestimmt durch Winddrehung. Erreicht an der Obergrenze die ungestörte Geschwindigkeit der freien Atmosphäre.

Schicht 2: Prandtl-Schicht
Umfasst ca. 10 % der Grenzschicht. Turbulente Verteilung von Impuls und Wärme. Windgeschwindigkeit steigt logarithmisch an; erreicht am oberen Rand ca. 80 % der Strömung der freien Atmosphäre.

Schicht 1: Laminare Unterschicht
Wenige Millimeter dick; Impulsfortpflanzung rein auf molekularer Ebene.

Gemini Notebook

Die Hellmann-Formel: Höhenabhängige Geschwindigkeitsberechnung

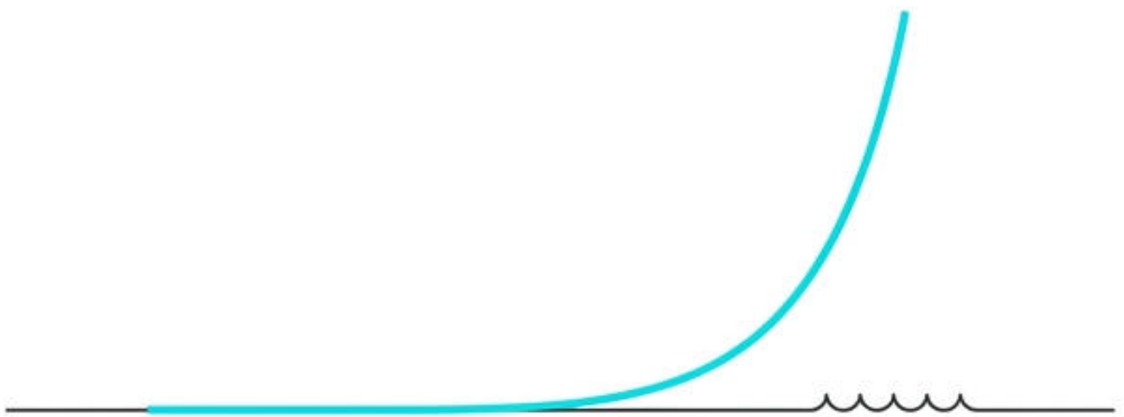
$$v_{Wind,h} = v_{Wind,ref} \cdot \left(\frac{h}{h_{ref}}\right)^{\alpha}$$

$v_{Wind,h}$ = Berechnete Geschwindigkeit auf Nabenhöhe

$v_{Wind,ref}$ = Referenzgeschwindigkeit (meist in 10 m Höhe gemessen)

h = Zielhöhe / h_{ref} = Referenzhöhe

α = Rauigkeitsexponent



Freie See

Geringe Rauigkeit (auf freier See):
Schneller Geschwindigkeitsanstieg mit der Höhe.
Niedrigere Türme reichen aus.



Bebauung/Bewuchs

Hohe Rauigkeit:
Erfordert deutlich höhere Türme.

Gemini Notebook

Herleitung der Windleistung: Vom Partikel zur Anlage

Schritt 1: Kinetische Energie (Energie der bewegten Luftmassen)

$$E = 0{,}5 \cdot m \cdot v^2$$

↓

Schritt 2: Massenstrom (Luft, die durch eine Fläche fließt)

$$\dot{m} = S \cdot rho \cdot v$$

(Überstrichene Fläche S × Luftdichte rho × Geschwindigkeit v)

↓

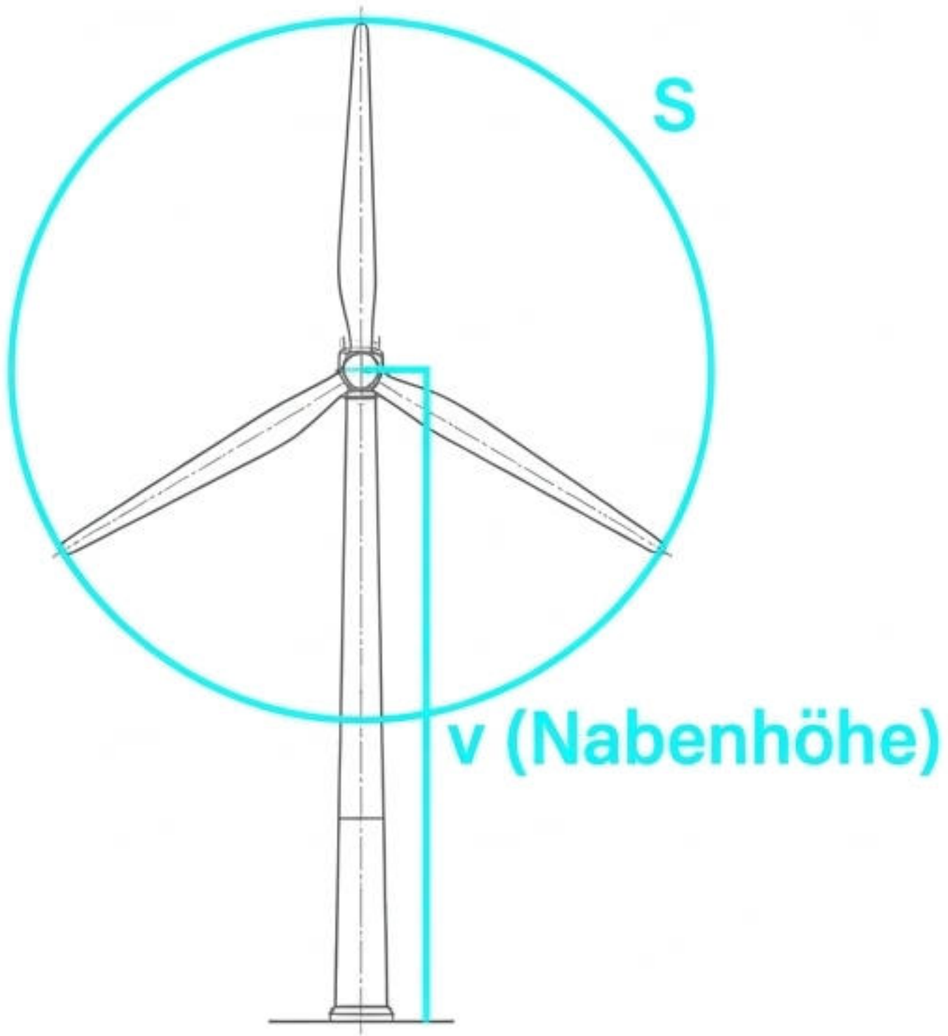
Schritt 3: Synthese zur Leistung (Einsetzen des Massenstroms)

$$P = 0{,}5 \cdot S \cdot rho \cdot v^3$$

Die verfügbare Windleistung ist das Produkt aus der halben durchströmten Fläche, der Luftdichte und der Geschwindigkeit in der dritten Potenz.

Gemini Notebook

Die Dominanz der Geschwindigkeit (v^3) in der Anlagenarchitektur



Die physikalische Realität: Die Luftdichte (rho) ist umweltbedingt fixiert und nicht beeinflussbar.

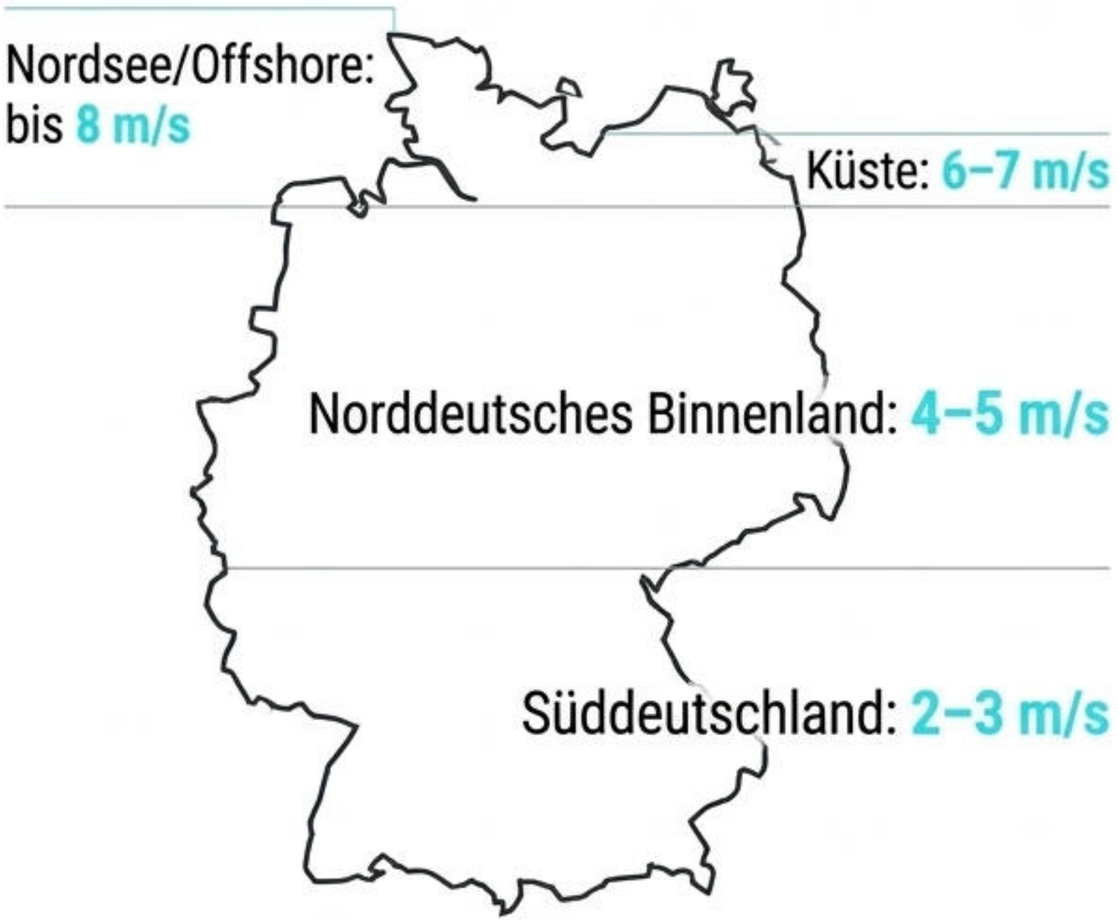
Hebel 1: Rotorfläche (S)
Lineare Leistungssteigerung. Eine Verdopplung der überstriichenen Fläche (längere Blätter) verdoppelt die Leistung.

Hebel 2: Windgeschwindigkeit (v^3)
Kubische Leistungssteigerung. Eine Verdopplung der Windgeschwindigkeit verachtfacht (!) die Leistung.

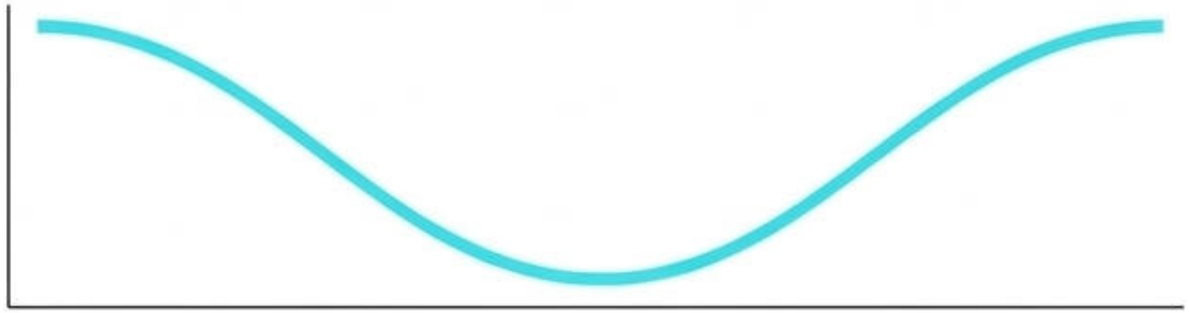
Ingenieurstechnische Konsequenz:
Der enorme Hebel von v^3 zwingt die Konstruktion in die Höhe (höhere Türme entkommen der Bodenrauigkeit, vgl. Hellmann-Formel) und in küstennahe/offshore Standorte.

Gemini Notebook

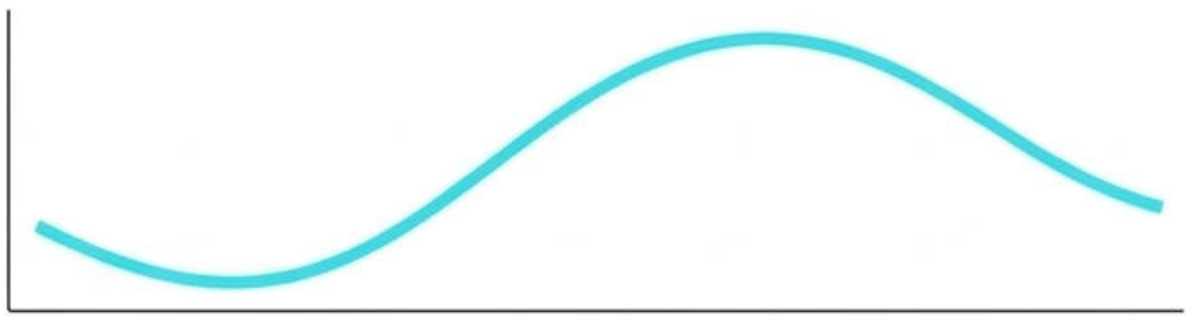
Geografisches und zeitliches Windpotenzial in Deutschland



Räumliches Gefälle (Werte in 100m Höhe)



Zeitliche Varianz (Jahresverlauf): Maximum im Spätherbst/Winter (Nov/Dez), Minimum im Sommer.

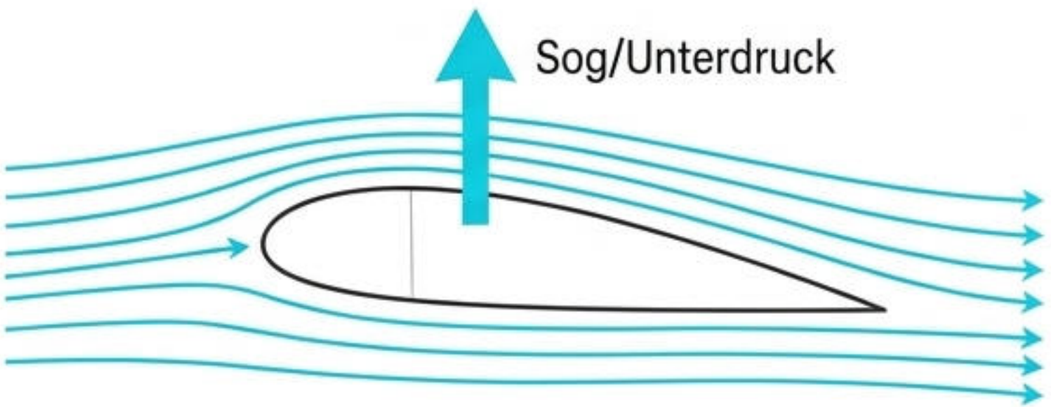


Tagesprofil: Minimum nachts bis 6:00 Uhr. Maximum nachmittags (14:00–16:00 Uhr) bedingt durch tageszeitabhängige thermische Schichtung.

Gemini Notebook

Aerodynamische Wirkprinzipien der Energiewandlung

Auftriebsprinzip (Lift)



Strömung um ein asymmetrisches Profil erzeugt Unterdruck (Sog).

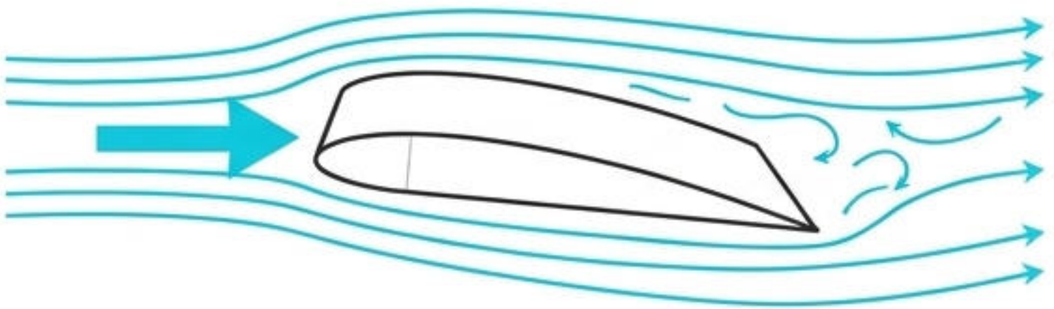
Schnelllaufende Systeme.

Hohe Umfangs- und Anströmgeschwindigkeit.

Wenige Rotorblätter (meist 3), schmale Profilbreite.

Standard in der modernen industriellen Stromerzeugung.

Widerstandsprinzip (Staudruck/Drag)



Wind drückt direkt auf eine Fläche.

Langsamlaufende Systeme.

Viele Flügel, große Profilbreite.

Geringerer aerodynamischer Wirkungsgrad.

Gemini Notebook

Anlagenarchitekturen im Vergleich: Horizontal vs. Vertikal

Typ 1: Horizontale (HAWT) (z.B. Enercon, Nordex)

- Nabenhöhen: 85m bis >140m.
- Leistung: 2,3 MW bis >3 MW.
- Eigenschaften: Stand der Technik, hocheffizient, benötigt Windnachführung (Azimut).

Typ 2: Vertikale Drehachse (VAWT - Darrieus-Rotor)

- Eigenschaften: Auftriebsprinzip, windrichtungsunabhängig.
- Nachteile: Aufwendige Blattform, nicht selbstanlaufend (benötigt Motor), Blätter nicht verstellbar (keine Pitch-Regelung möglich).

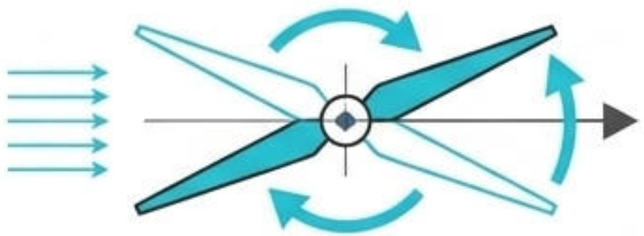
Typ 3: Vertikale Drehachse (VAWT - H-Rotor)

- Eigenschaften: 3 senkrechte Blätter, windrichtungsunabhängig, integrierter Ringgenerator, kein Getriebe nötig. Entwickelt für extreme Witterung. Nennleistungen eher im Kleinwindbereich (5–40 kW).

Gemini Notebook

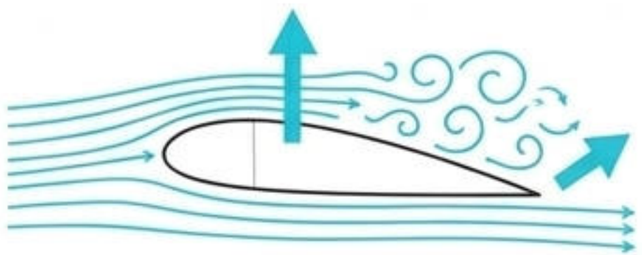
Leistungs- und Sicherheitsregelung im Grenzbereich

Problem: Bei starken Böen überschreitet die Leistung (v^3) die mechanischen oder elektrischen Toleranzen. Die Anlage muss abregeln.



Pitch-Regelung

Aktive, stufenlose Verstellung des Anstellwinkels der Rotorblätter um die Längsachse zur Reduktion des aerodynamischen Auftriebs.



Stall-Regelung

Passiver oder aktiver Strömungsabriss. Bei kritischen Geschwindigkeiten löst sich die laminare Strömung am Profil ab; der Auftrieb bricht gezielt zusammen.



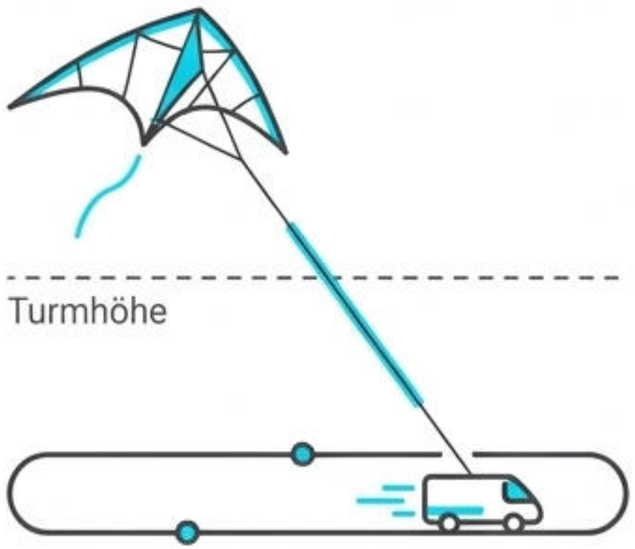
Azimut-Regelung

Die gesamte Rotorachse (Gondel) wird aktiv aus der Hauptwindrichtung gedreht, um die überstrichene Fläche (S) zu minimieren.

Gemini Notebook

Innovation: Überwindung physischer Systemgrenzen

Grenze 1: Höhenlimit (Airborne Wind Energy)



Kite-Systeme (z.B. X-Wind, EnerKite): Arbeiten in **200 bis 500 m Höhe** (nutzen stärkere, konstantere Winde der freien Atmosphäre).

Konzept: Automatisch gesteuerter Drachen (**400 m²**) fliegt Achten; zieht ein Schienenfahrzeug auf einem geschlossenen Bahnsystem. Ca. **1 MW** Leistung pro Power-Unit.

Grenze 2: Fluktuation (Integrierte Speicher)

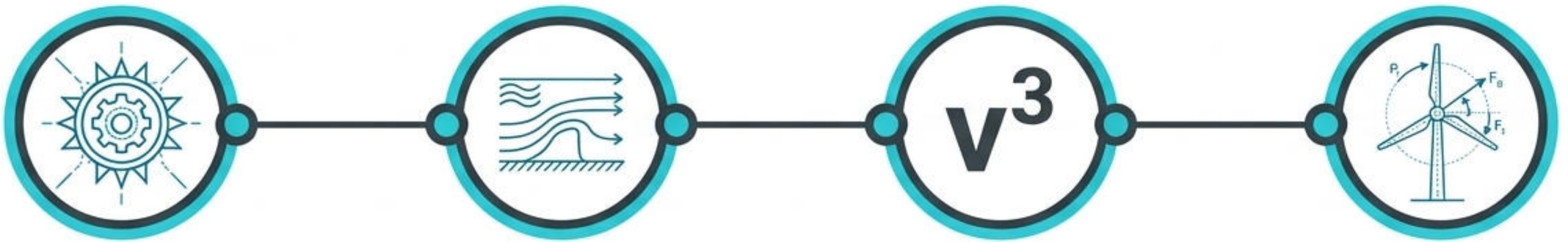


Wind-Speicher-Hybride (z.B. GE 2.75-120): WEA mit direkt integriertem Akkumulator.

Specs: **2,75 MWel** Nennleistung, gekoppelt mit **20 bis 70 kWh** Zwischenspeicherkapazität. Glättet kurzfristige Netzschwankungen
Netzschwankungen ab Werk.

Gemini Notebook

Synthese: Von der solaren Einstrahlung zur Systemleistung



Ursprung

2,5 % der Solarstrahlung erzeugen Druckausgleiche (Geostrophischer Wind).

Strömungsdynamik

Oberflächenrauigkeit formt das vertikale Windprofil (Hellmann-Formel) in ur der planetarischen Grenzschicht.

Das Gesetz (v^3)

Kinetische Energie übersetzt sich kubisch ($P \sim v^3$) in mechanisches Potenzial.

Anlagentechnik

Ingenieure maximieren die Energieernte (Turmhöhe, Rotorfläche) und kontrol- lieren resultierende Kräfte (Pitch, Stall). Die Anlage ist der mechanische Spiegel der Atmosphäre.

Gemini Notebook