

Solarzentrum Mecklenburg- Vorpommern

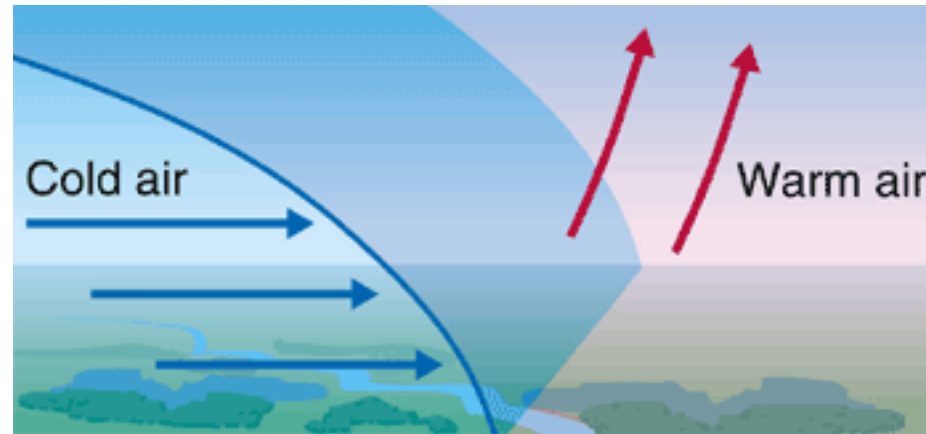
Steuerung von Kleinwindkraftanlagen

Dragomir Mitev
10.06.2013

INHALT

- ▶ Windenergie
- ▶ Arten von Windturbinen
- ▶ Bestimmung der maximalen Leistung von WKA
- ▶ Die Elemente einer Kleinwindkraftanlage
- ▶ Art und Weise der Anbindung
- ▶ Die Auswahl des richtigen Konzeptes
- ▶ Ankopplung
- ▶ Installierte Leistung von KWKA und Prognosen bis 2020
- ▶ Technische Spezifikation
- ▶ Mathematische Beschreibung

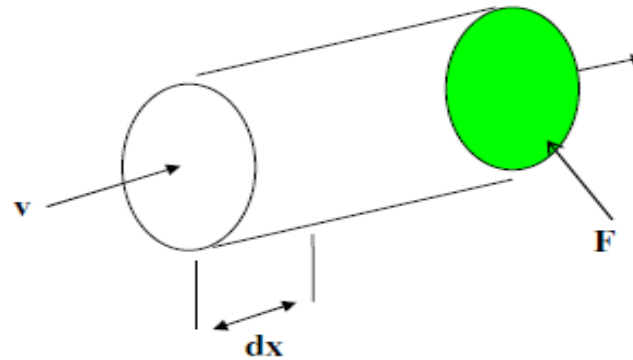
WINDENERGIE



- ▶ Wenn ganz viele Luftteilchen in eine Richtung strömen, dann nennen wir das Wind. In der Natur ist die Sonne für den Wind verantwortlich. Die Sonne erwärmt einen Teil der Luft. Die warme Luft dehnt sich aus, wird leichter und steigt auf. Aus kühleren Regionen mit mehr Luftteilchen strömt Luft nach. Es gibt Wind.

WINDENERGIE

WIND = bewegte Luft mit einer kinetischen Energie E



Kinetische Energie

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$$

Luftmassenstrom

$$\dot{m} = F \cdot \rho \cdot \frac{dx}{dt} = F \cdot \rho \cdot v$$

Windleistung

$$P_w = \dot{E} = \frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot v^2 = \frac{1}{2} \cdot F \cdot \rho \cdot v^3$$

ρ - Luftdichte

$$P_w = v^3$$

- ▶ Beim Bewegen der Luftmassen werden nicht nur die Kräfte F_p (Kräfte auf Grund der Druckdifferenz) benutzt, sondern auch die sogenannte Corioliskraft F_c .



$$F_p = F_c ,$$

w_0 ,

F_p - Druckkraft [N]

F_c - Corioliskraft [N]

KRITERIEN FÜR DIE BEWERTUNG DES WINDENERGIEPOTENZIALS

- ▶ Durchschnittliche jährliche Windgeschwindigkeit
- ▶ Die vorherrschende Windrichtung

Die Windenergie ist nicht konstant, sie ist mit folgenden Parametern gekennzeichnet

- ▶ Augenblickliche Geschwindigkeit in m/s
- ▶ Durchschnittliche Geschwindigkeit für eine bestimmte Zeit
- ▶ Häufigkeit des Windes. Dies sind die Gesamtzahl der Stunden (Monat, Jahr), in dem der Wind mit einer bestimmten Geschwindigkeit bläst.
- ▶ Vorherrschende Windrichtung (Tag, Nacht, Monat, Jahr).

ARTEN VON WINDTURBINEN

- ▶ Widerstandsläufer
- ▶ Auftriebsläufer
- ▶ Windturbinen, kombiniert

○ Widerstandsläufer

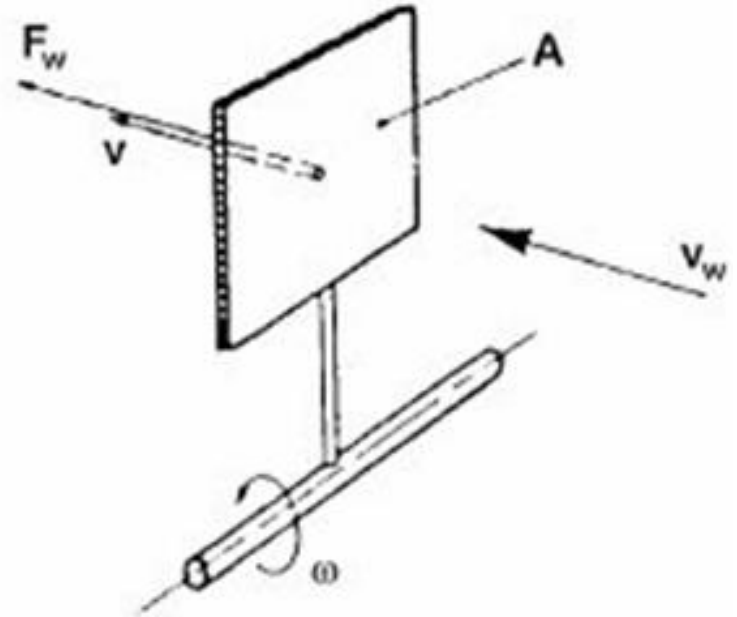
Die Widerstandskraft F_W ($\frac{kg \cdot m}{s^2}$; N) ist proportional zu dem Quadrat der Windgeschwindigkeit v (m/s), der Fläche A (m^2), dem Strömungswiderstandskoeffizient C_W des Körpers, sowie der Luftdichte ρ (kg/m^3).

$$F_W = C_W \cdot \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^2, (N)$$

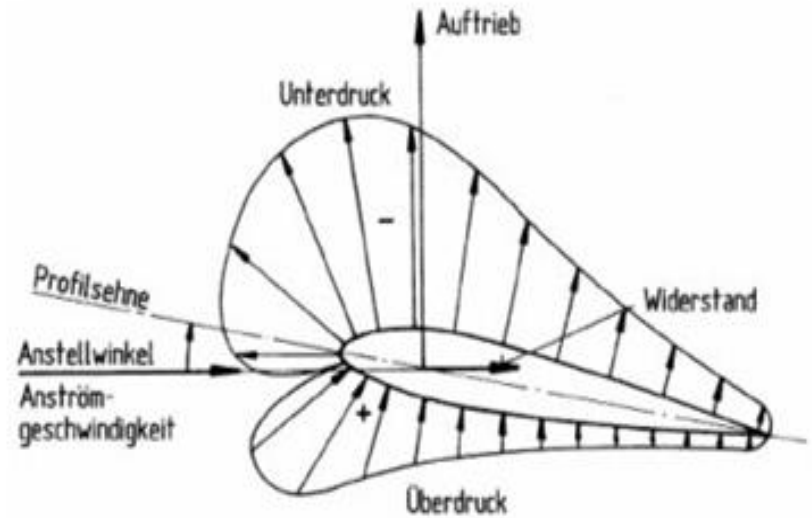
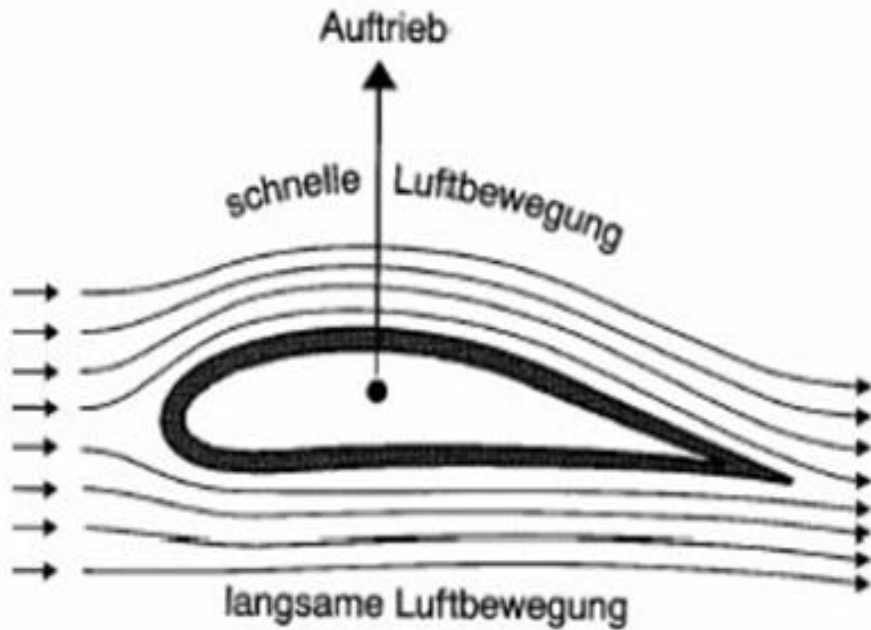
$$P = W \cdot u, wo$$

$$u = r_m \cdot \Omega$$

$$\Omega = \frac{2\pi r}{60}, (s^{-1})$$

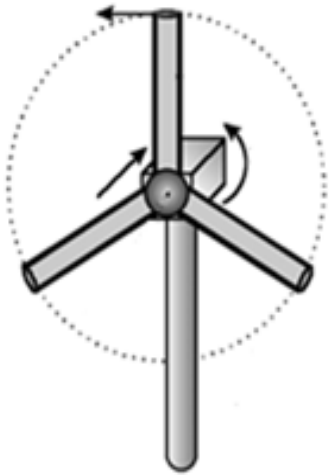


◦ Auftriebsläufer



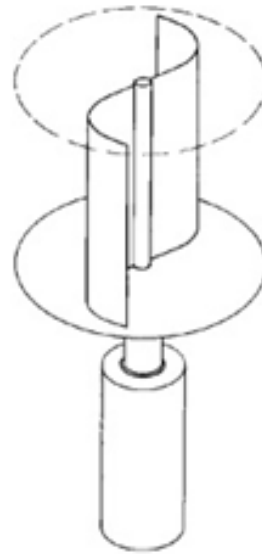
UNTERTEILUNG NACH STELLUNG DER DREHACHSE

- ▶ Windturbinen mit horizontaler Achse

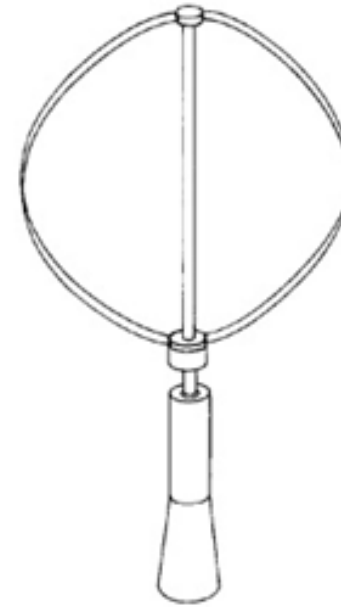


- ▶ Windturbinen mit vertikaler Achse

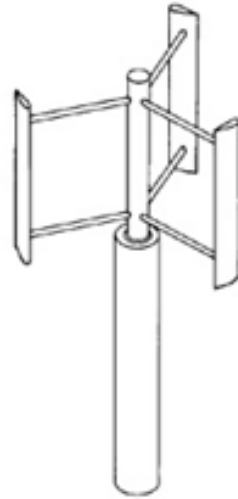
Savonius-Rotor



Darrieus-Rotor



H-Rotor



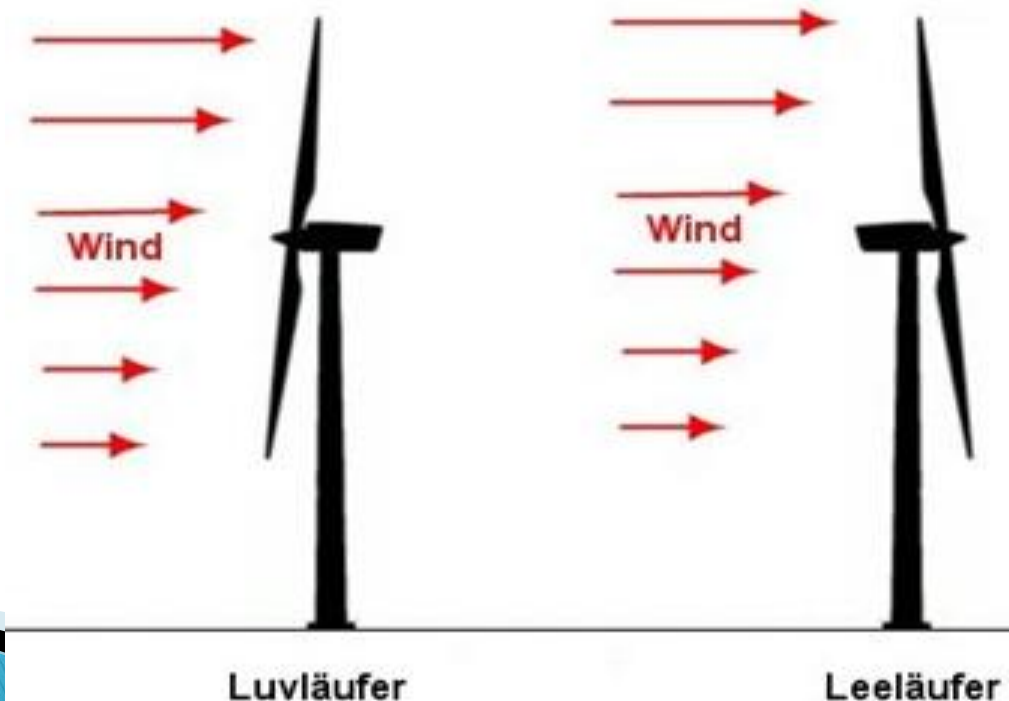
WINDTURBINEN MIT HORIZONTALER ACHSE



▶ Windenergieanlagen mit horizontaler Achse

Windenergieanlagen mit einer horizontalen Drehachse werden in der Stellung des Rotors zum Turm in Lee- und Luvläufer unterschieden:

- beim Leeläufer läuft der Rotor in Windrichtung hinter dem Turm.
- beim Luvläufer läuft der Rotor in Windrichtung vor dem Turm.



DELA ROTOR



DELA ROTOR



WINDTURBINEN MIT VERTIKALER ACHSE

← Der Savonius-Rotor



Darrieus Rotor →

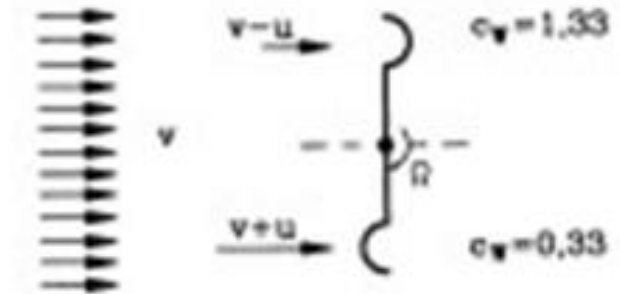


← H Rotor

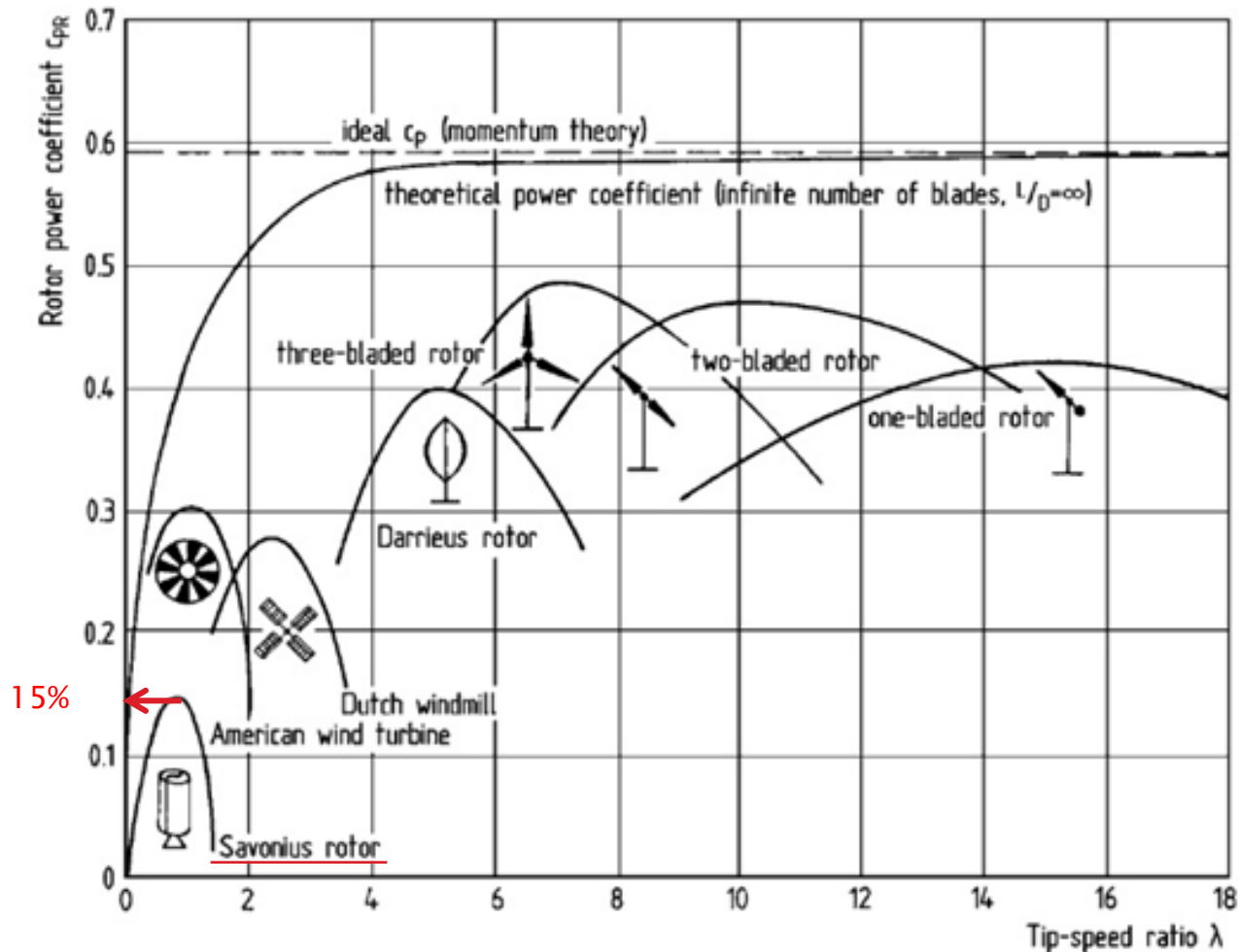
▶ Windenergieanlagen mit vertikaler Achse

Der Savonius-Rotor

- Der Savonius-Rotor ist wegen seines einfachen Aufbaus der bekannteste Rotor mit vertikaler Achse
- Er kann maximal 15 Prozent der kinetischen Energie des Windes entnehmen.
- Diese Anwendungen sind zum Beispiel kleine Pumpenanlagen, drehende Werbungen, Lüfter auf Lieferwagen oder Spielzeuge.



LEISTUNGSBEIWERT DER VERSCHIEDENEN ARTEN VON WKA



DIE ERREICHBARE LEISTUNG EINER WKA

$$P_T = C_p \cdot F \cdot \frac{\rho_B \cdot v^2}{2} = C_p \cdot F \cdot P_c ,$$

P_T – Leistung der Turbine, (W)

C_p – Leistungsbeiwert, (%)

F – auskehrende Fläche, (m^2)

P_c – Spezifische Leistung der Windströmung, (W/m^2)

$$P_c = \frac{\rho_B \cdot v^3}{2}, W/m^2 ,$$

ρ_B – Luftdichte kg/m^3

Aerodynamische Leistung

$$\blacktriangleright P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p \quad (\text{W/m}^2), \text{ wo}$$

ρ – Luftdichte (kg/m^3)

R – Radius des Turbines (m)

v – Windgeschwindigkeit (m/s)

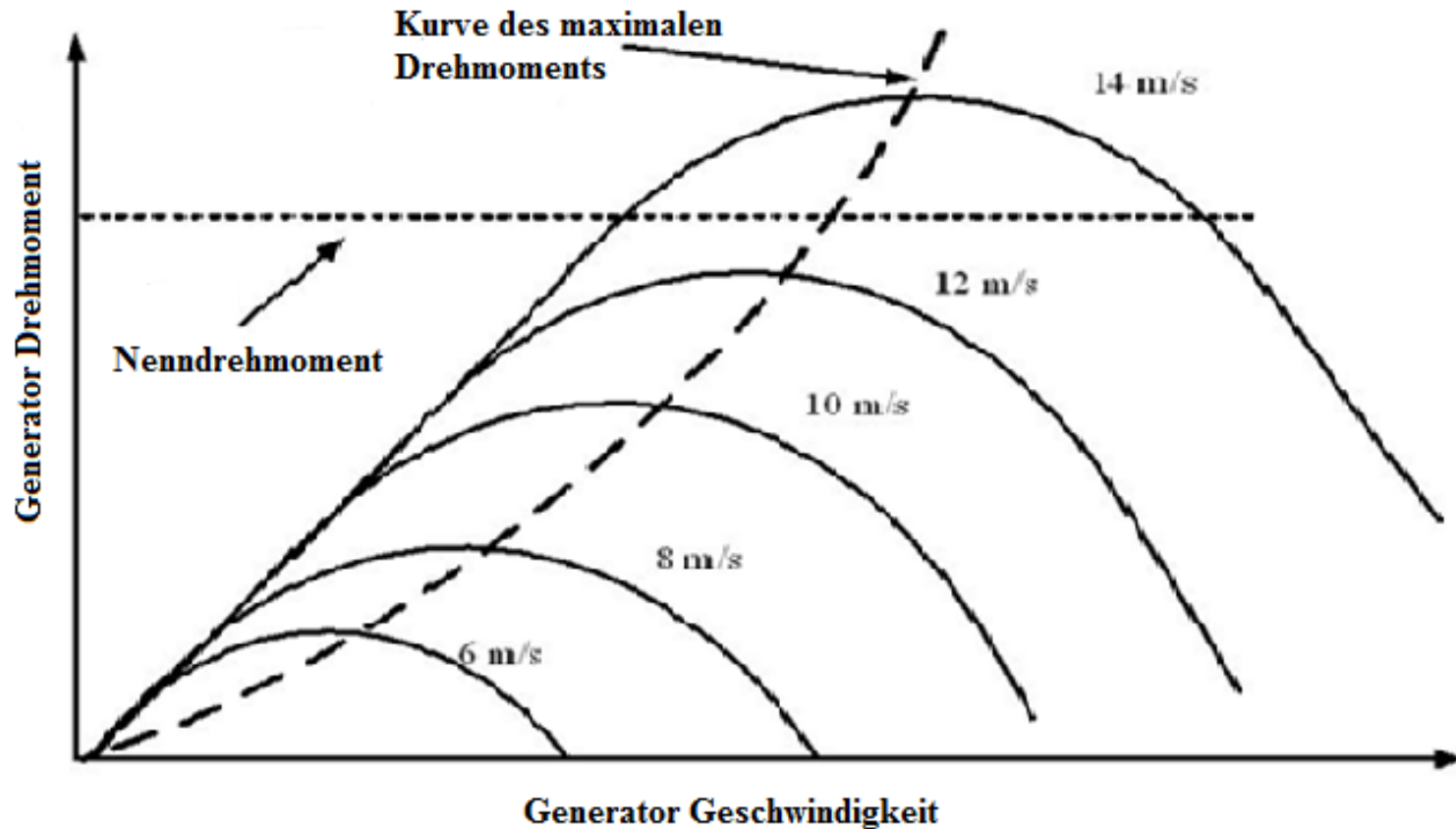
C_p – Leistungsbeiwert

(Funktion des Koeffizienten
der Auslegungsschnellaufzahl (λ))

$$\blacktriangleright \lambda = \frac{R \Omega}{v} \quad (\text{m/s}), \text{ wo}$$

Ω = Windgeschwindigkeit des Windturbines (s^{-1})

MAXIMUM POWER POINT



BESTIMMUNG DER MAXIMALEN LEISTUNG VON WKA



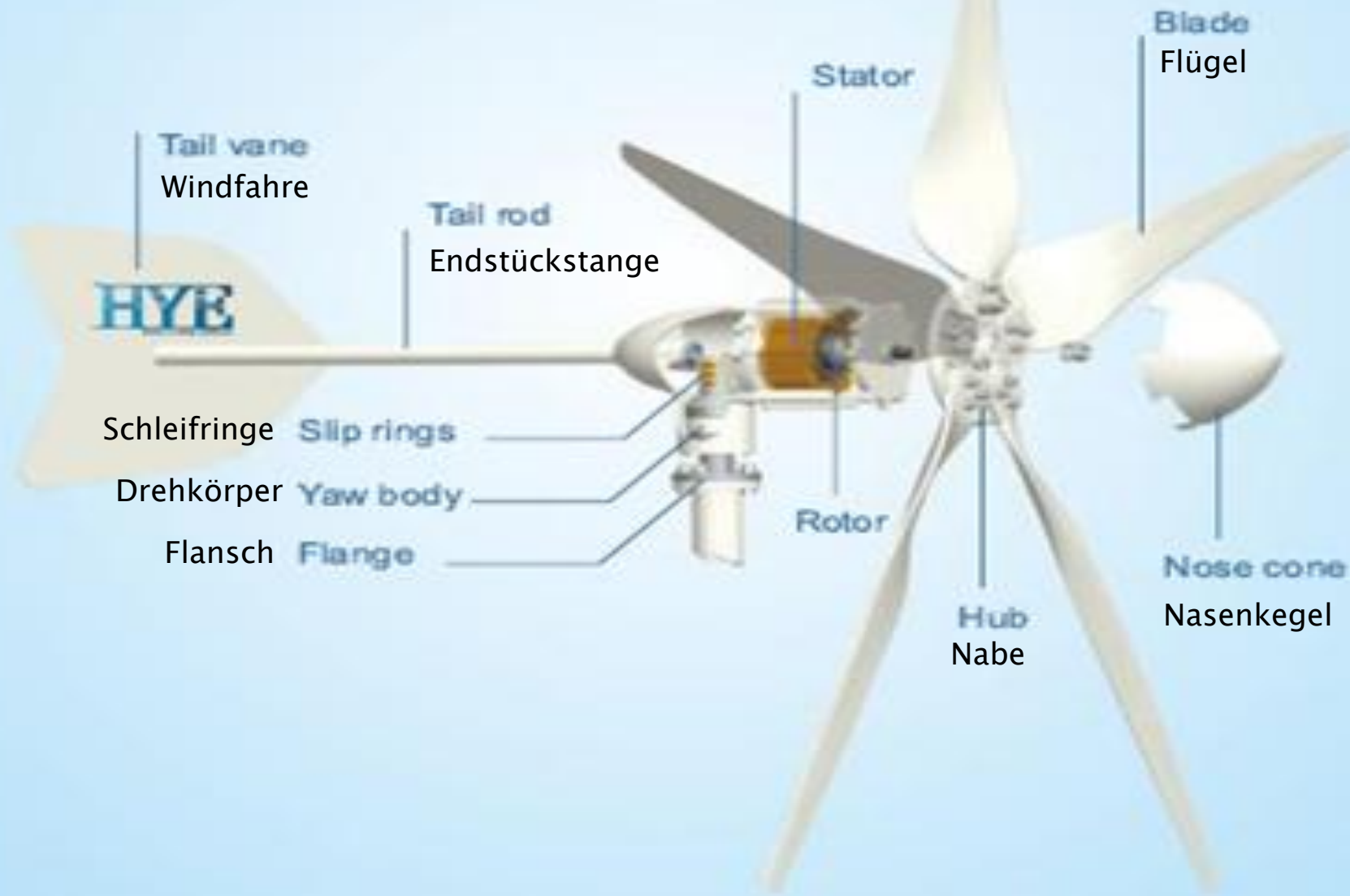
Legende

1. Windstille $v=0$ m/s
2. Windgeschwindigkeit unterhalb der Einschaltwindgeschwindigkeit
3. Einschaltwindgeschwindigkeit / Cut-in speed. $v \geq 3$ m/s
4. Nennwindgeschwindigkeit
5. Nennleistung – Vollastbereich $v > 12$ m/s (konstante Rotor- & Generatorzahl)
6. Abschaltwindgeschwindigkeit / Cut-out speed
7. Überlebenswindgeschwindigkeit

FÜR DIE AUFSTELLUNG EINER WKA BEDARF ES DER VORHERGEHENDEN KLÄRUNG FOLGENDER PUNKTE:

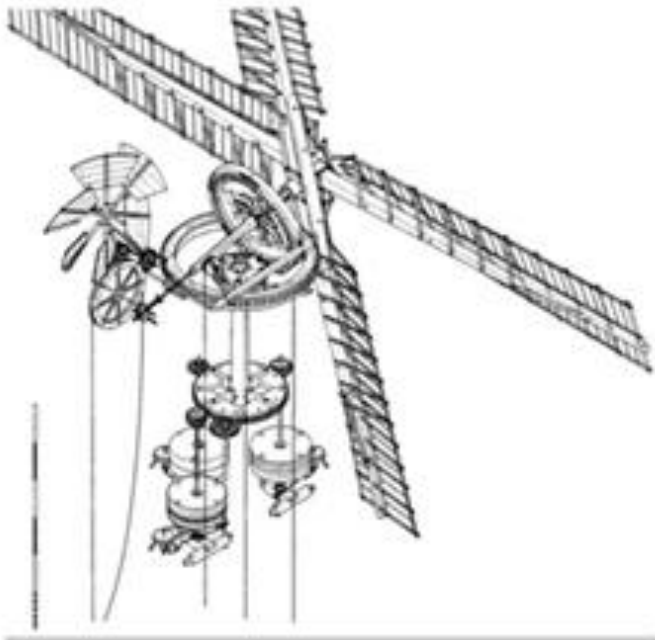
- ▶ 1. Standortbedingungen
- ▶ 2. Windverhältnisse – Windenergie – Ertrag
- ▶ 3. Genehmigung
- ▶ 4. Stromnutzung
- ▶ 5. Anlagentyp und –größe

DIE ELEMENTE EINER KLEINWINDKRAFTANLAGE



WINDNACHFÜHRUNG

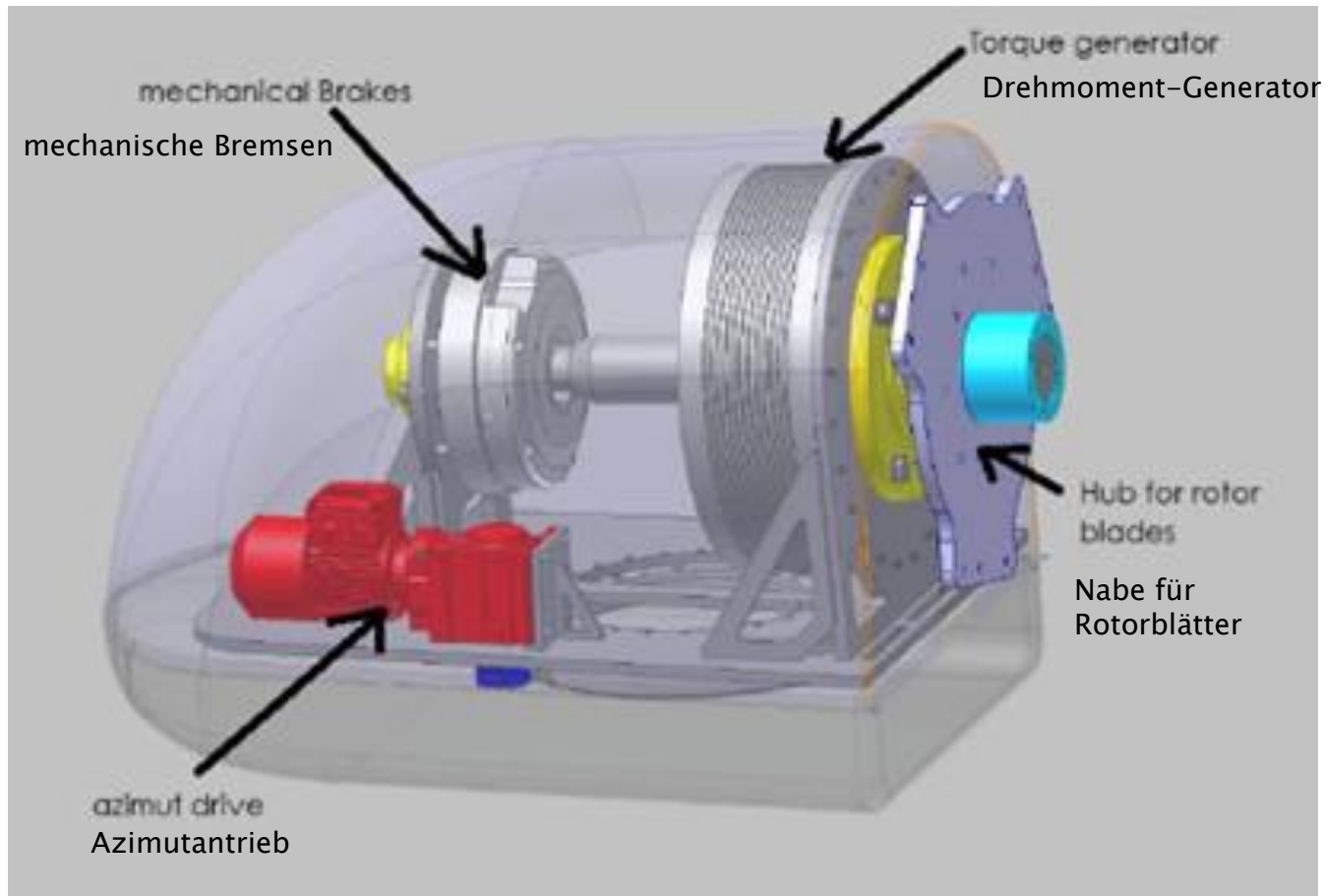
- Passive Systeme –
Windfahne,
Flügelrosetten



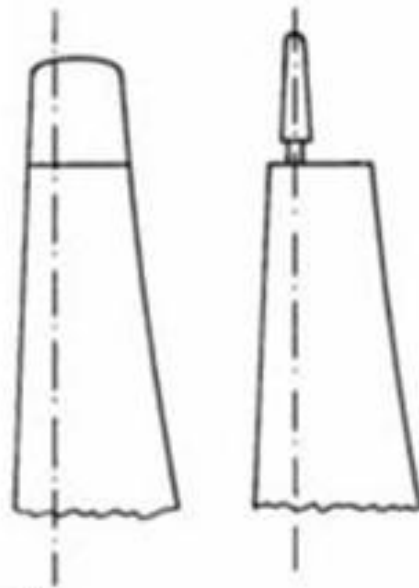
- Aktive Systeme



AUFBAU DER ANLAGE

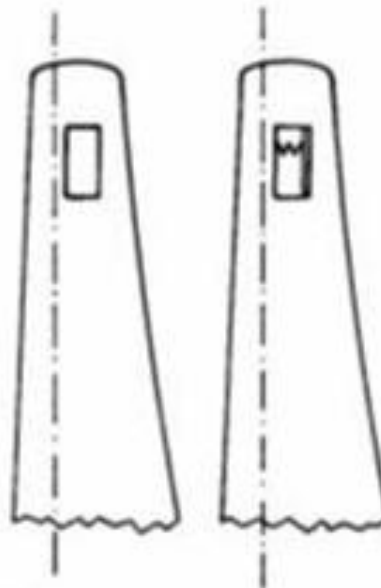


BAUFORMEN VON BREMSKLAPPEN



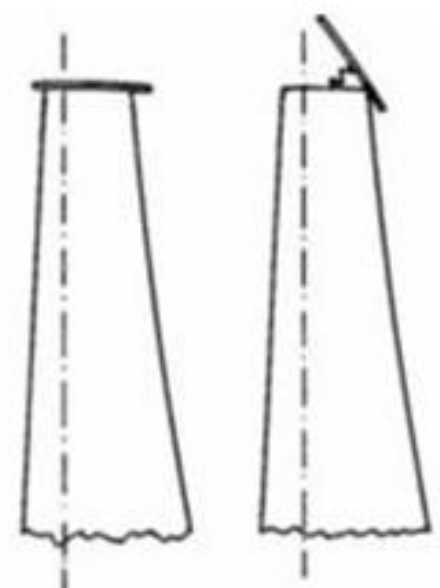
a)

Verdrehbare Blattspitze



b)

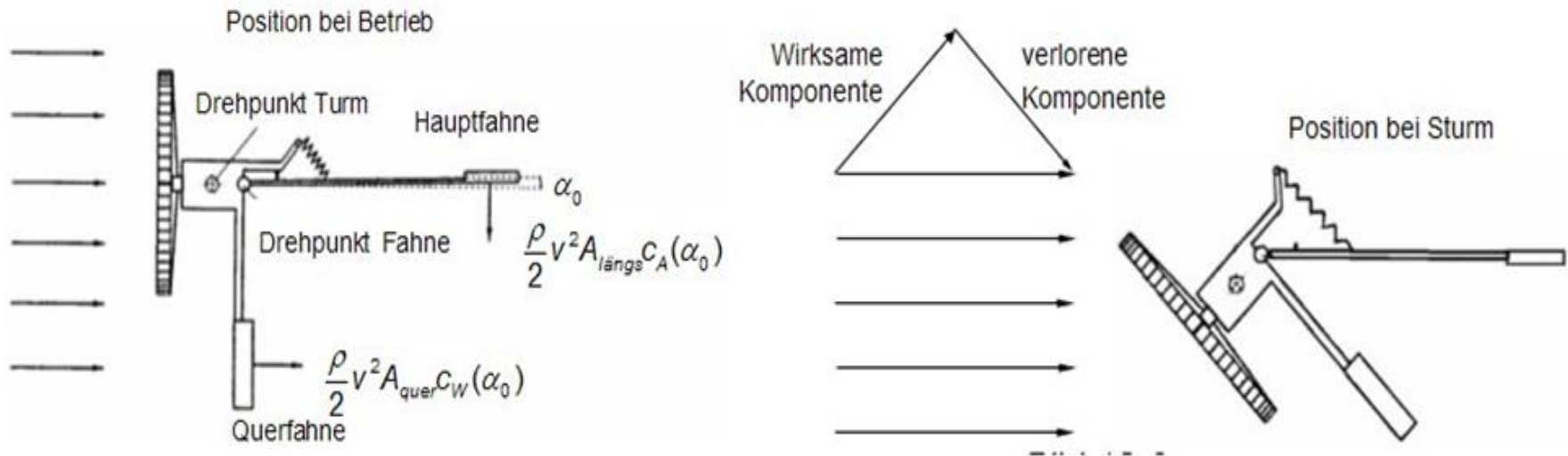
Klappe im Flügel



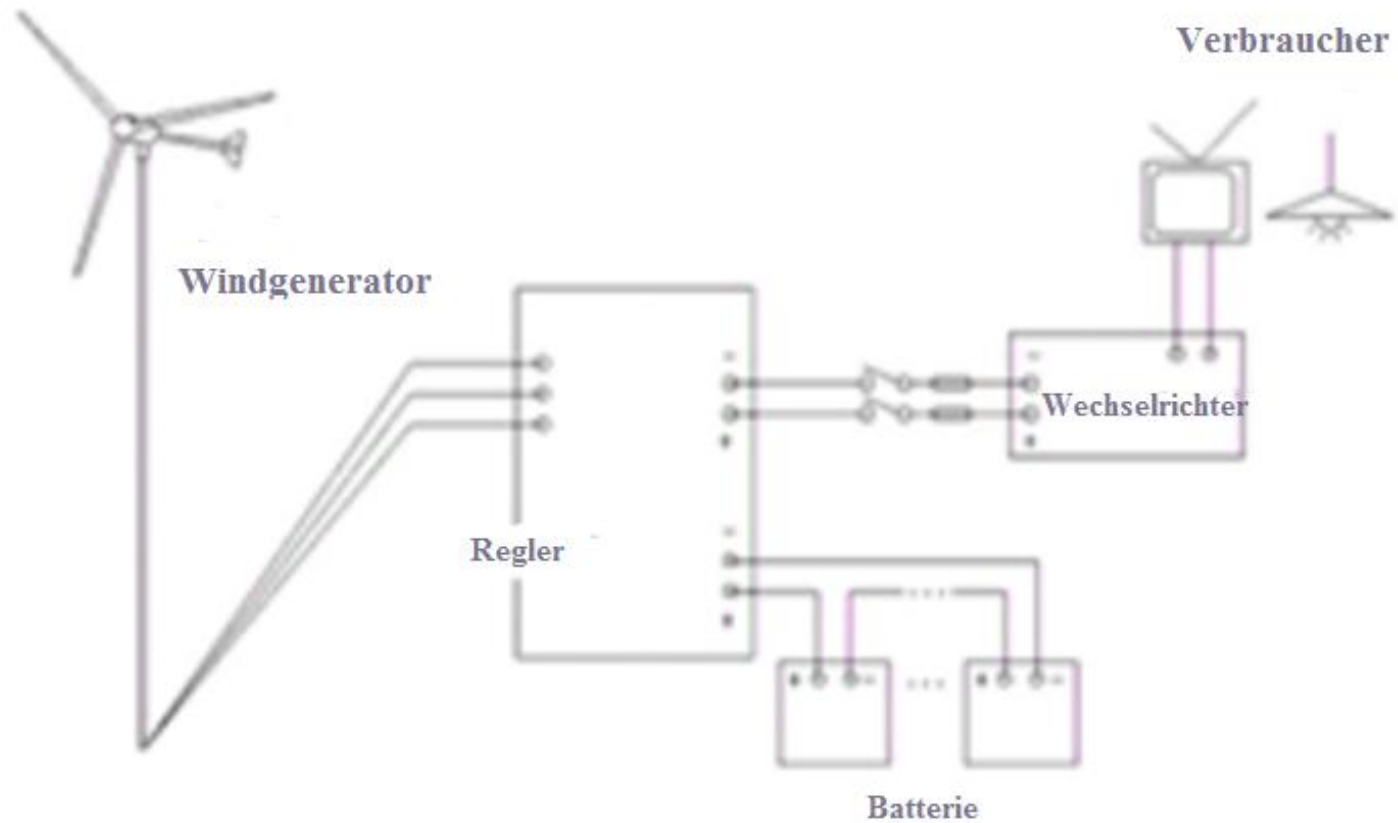
c)

Aufklappbare Endscheibe

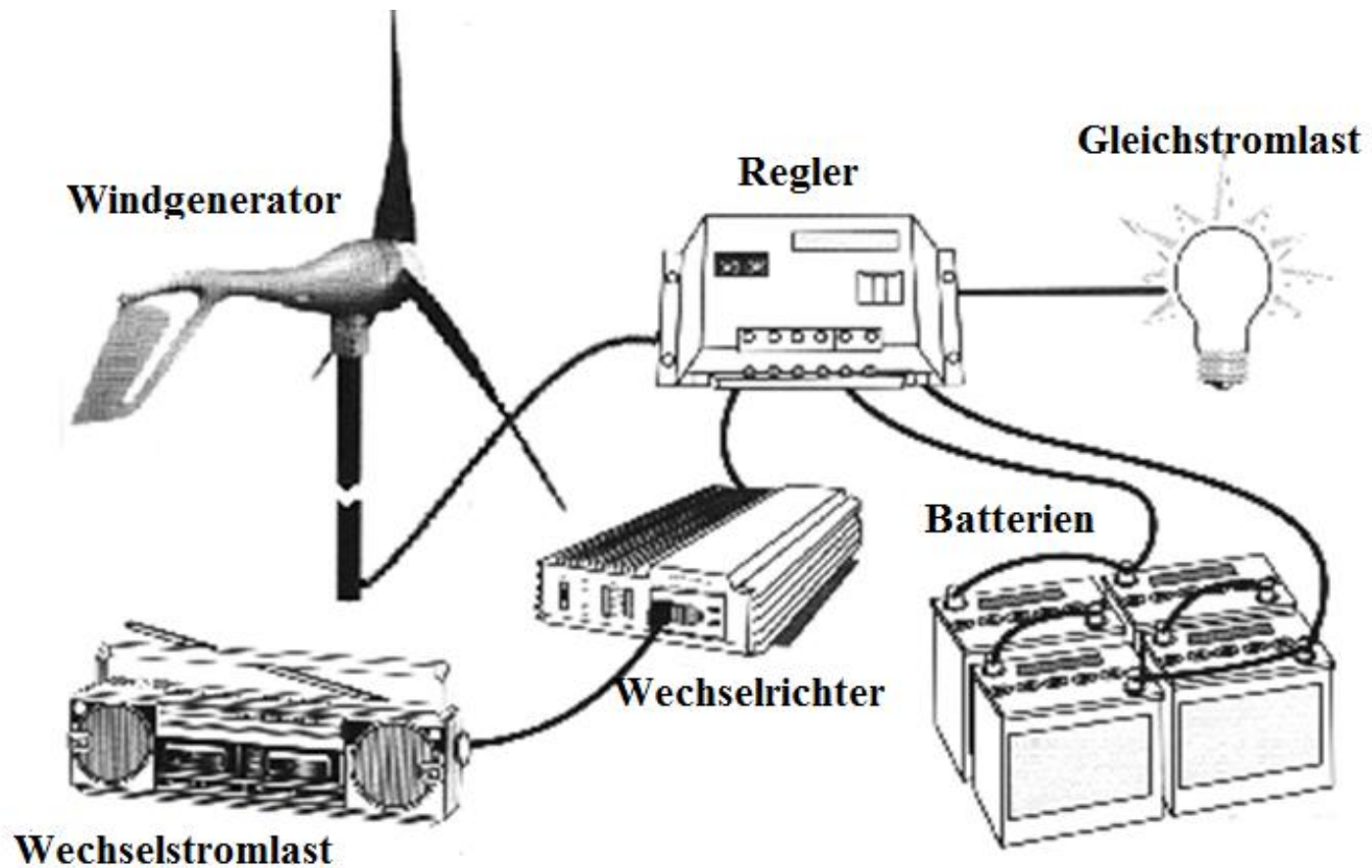
ANDERE LEISTUNGSREGELUNG FÜR KLEINWINDENERGIEANLAGEN



ART UND WEISE DER ANBINDUNG

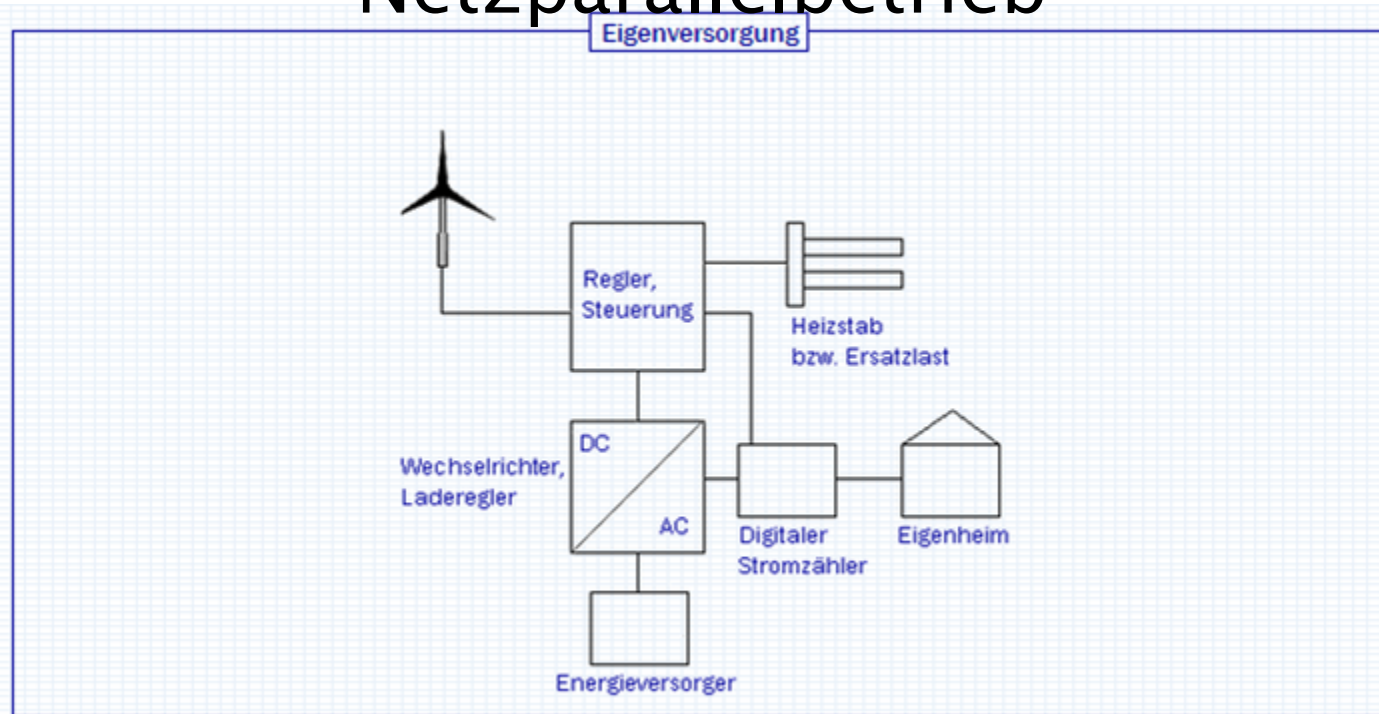


ART UND WEISE DER ANBINDUNG



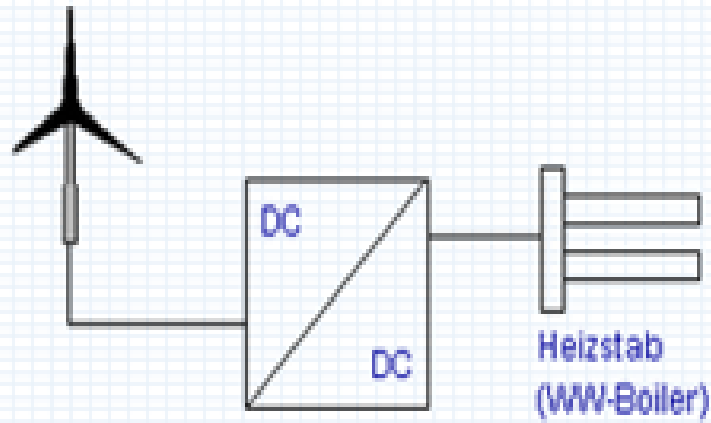
DIE AUSWAHL DES RICHTIGEN KONZEPTES

Netzparallelbetrieb

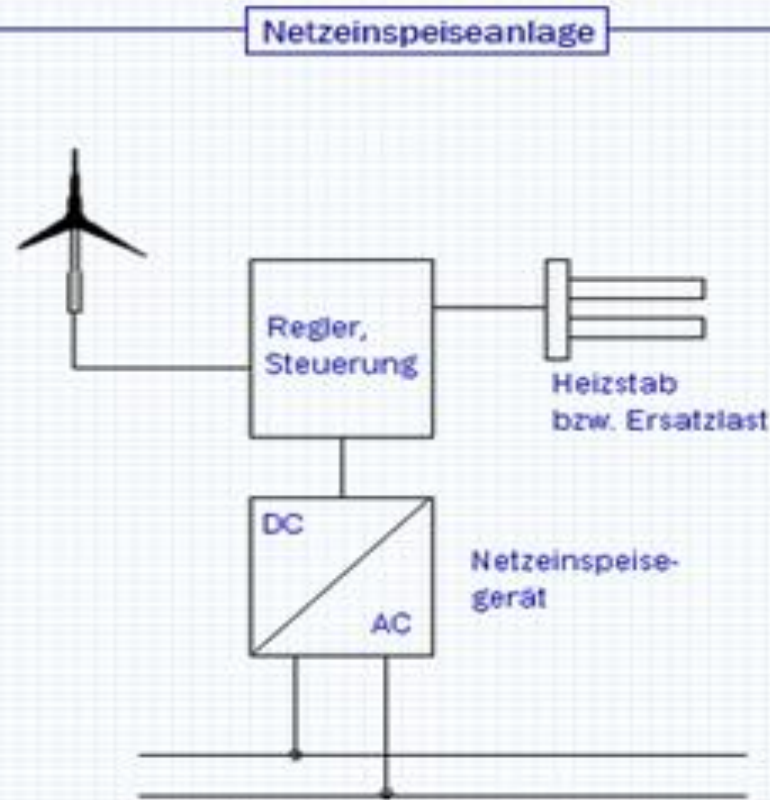


Bivalente Heizung

Heizwindmühle

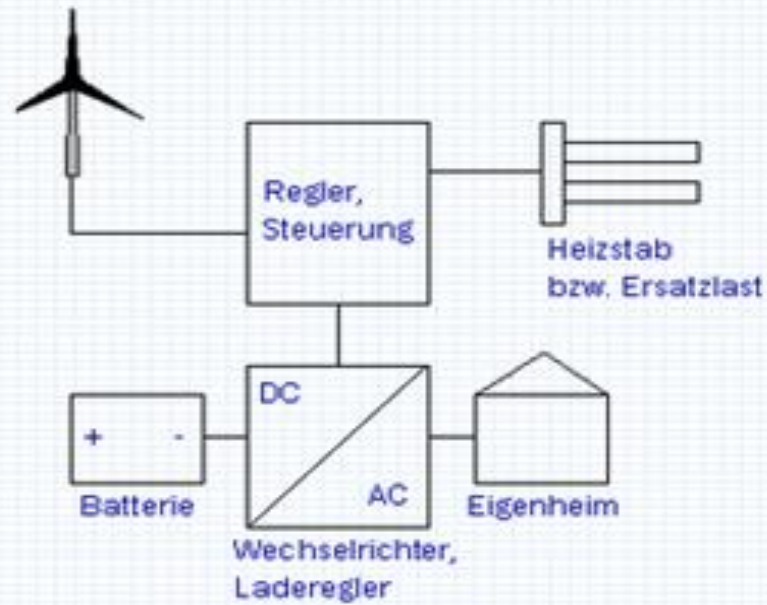


Netzeinspeisung



Inselbetrieb

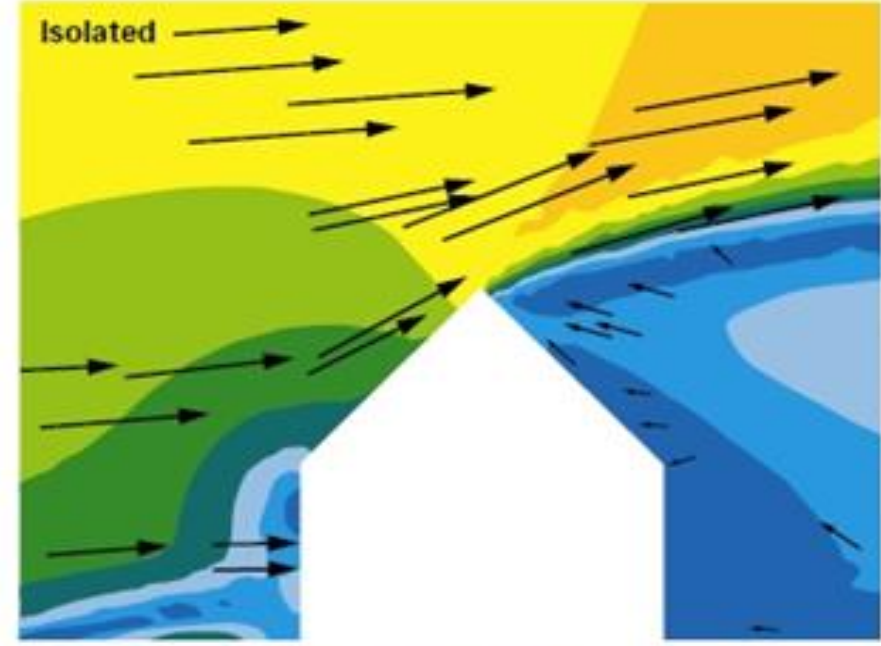
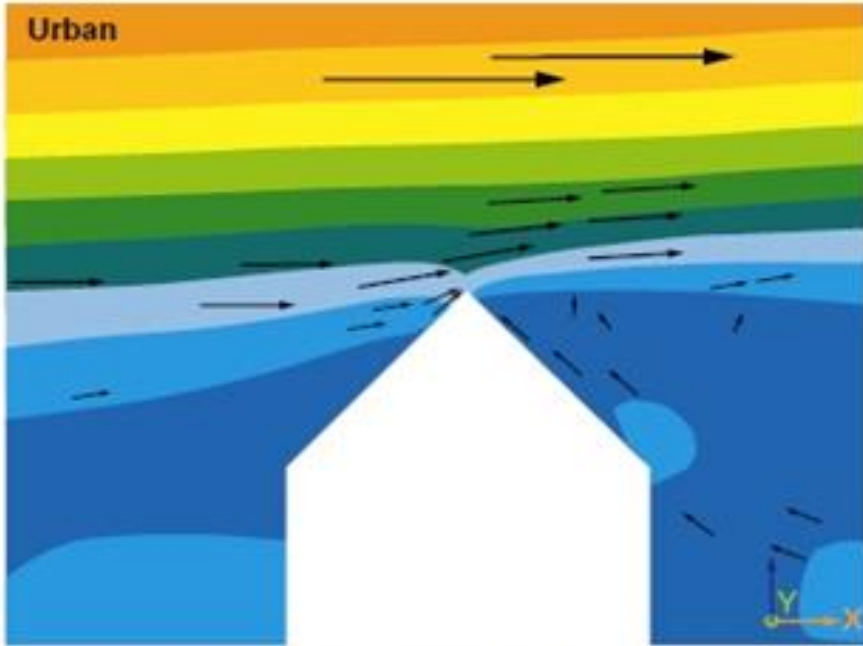
Inselbetrieb



EINSATZMÖGLICHKEITEN VON KLEINWINDGENERATOREN

1. Landwirtschaft, Gartenbau, Obstbau-, Forstwirtschaft
2. Einkaufszentren
3. Autohäuser und Tankstellen
4. Industrie – Gebäude und/oder Freifläche
5. Öffentliche Gebäude, Plätze, Grünflächen
6. Einfamilien-, Mehrfamilien-, Wochenendhäuser

Auf dem Dach eines Einfamilienhauses



GRÖßENVERHÄLTNISSSE VON KLEINWINDKRAFTANLAGEN

20 m
15 m
10 m
5 m



Copyright
www.klein-windkraftanlagen.com
Alle Rechte vorbehalten

Nennleistung: 1,5 kW
Nabenhöhe: 7 m
Rotor-Durchmesser: 2,86 m

Nennleistung: 6,0 kW
Nabenhöhe: 13 m
Rotor-Durchmesser: 6,0 m

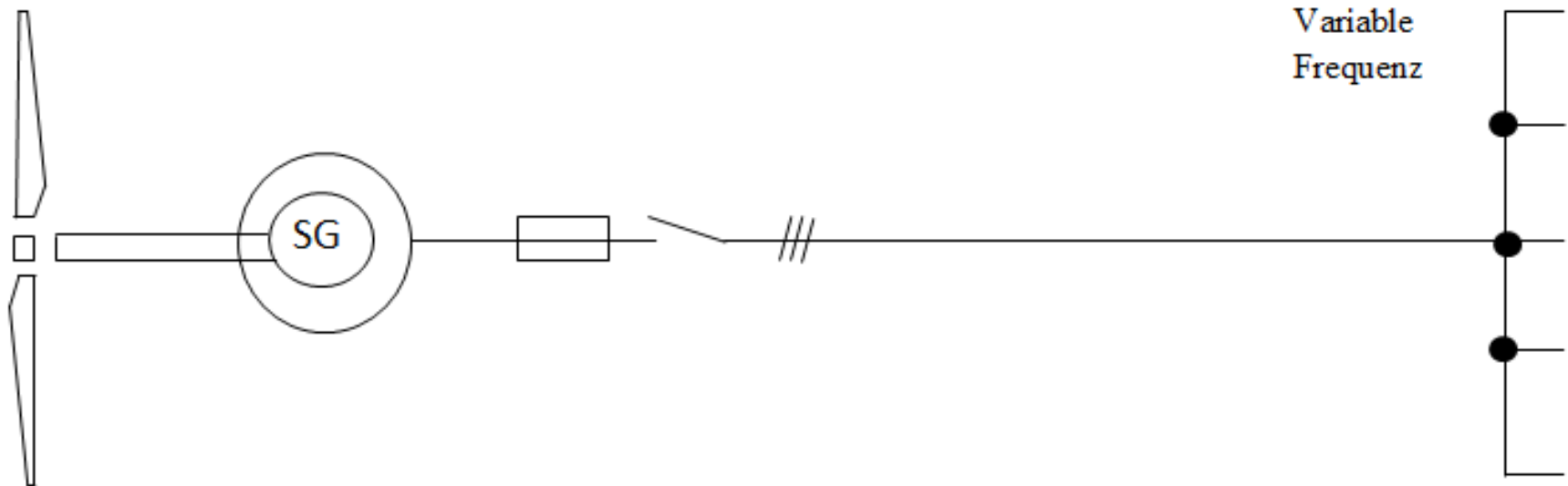
Nennleistung: 9,8 kW
Nabenhöhe: 18 m
Rotor-Durchmesser: 7,13 m

TYPISCHE EINSATZBEREICHE VON KLEINWINDENERGIEANLAGEN

Nennleistung	Nutzungsart	Spannung	Typische Anwendungszwecke
bis 1,5 kW	Inselsystem mit Batterie	12, 24, 48 Volt DC	Camping, Gartenanlagen, Segelschiffe, Notrufsäulen, abgelegene Mess-Stationen
	Netzgekoppelt	230 Volt AC	
1,5 bis 5 kW	Gebäudeintegriert	230 Volt AC	Wohngebiete
	Freie Aufstellung	230 Volt AC	
5 bis 30 kW	Gewerbegebiete, Landwirtschaft	400 Volt AC	Außerhalb Wohngebieten, landwirtschaftlicher Bereich, Nebenanlage von Gewerbebetrieb
30 bis 100 kW	Gewerbegebiete, Landwirtschaft	20 Kilovolt AC	wie oben, höhere Anforderungen für Genehmigung und Anschluss an Mittelspannung-Netz

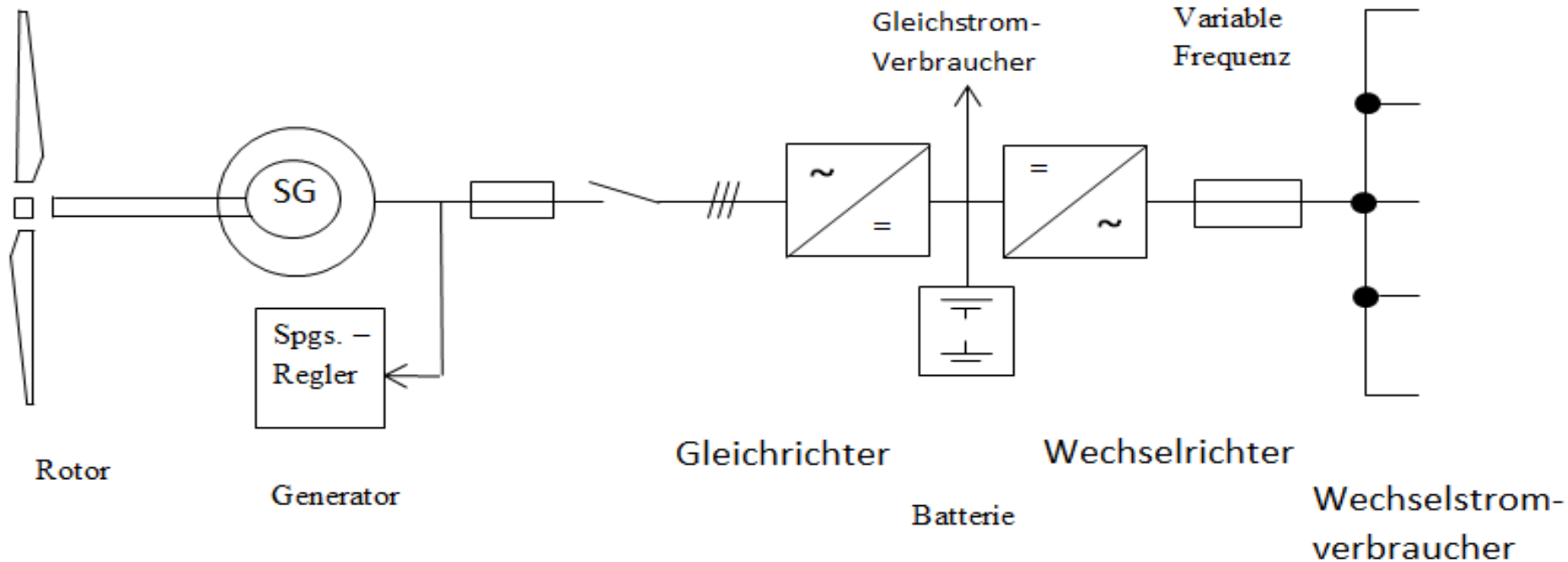
ANKOPPLUNG

Anlage ohne Regeleingriffe



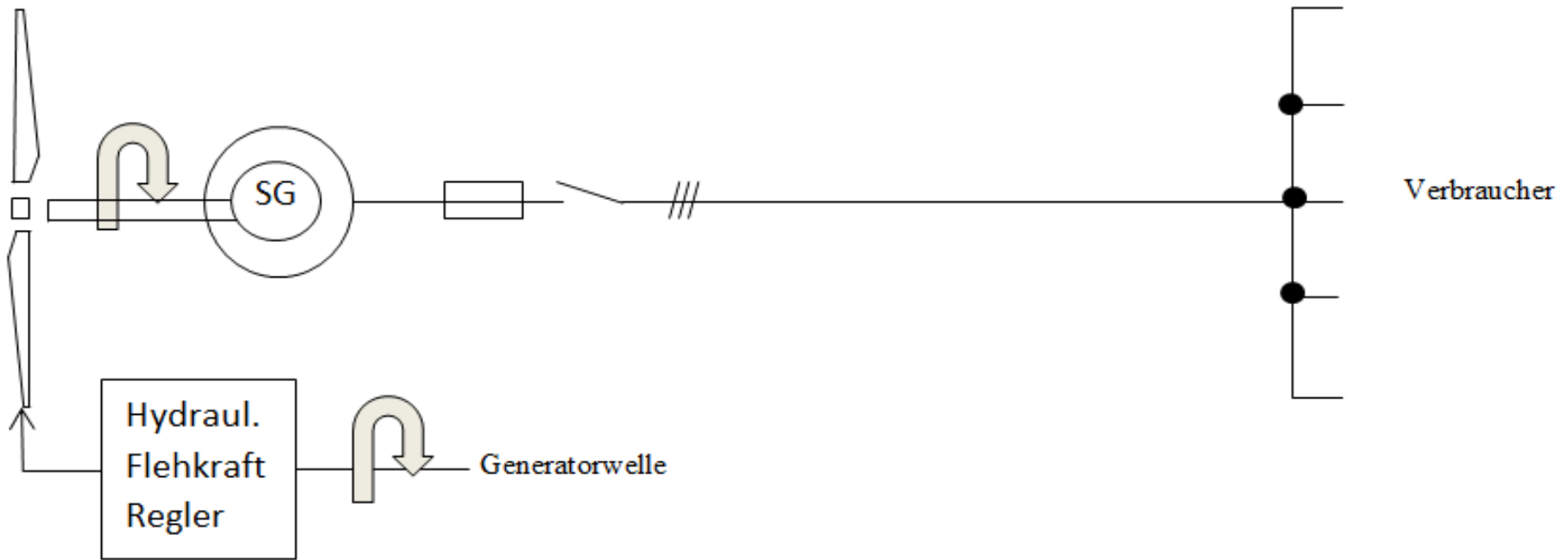
ANKOPPLUNG

Anlage mit variabler Drehzahl und konstanter Ausgangsfrequenz



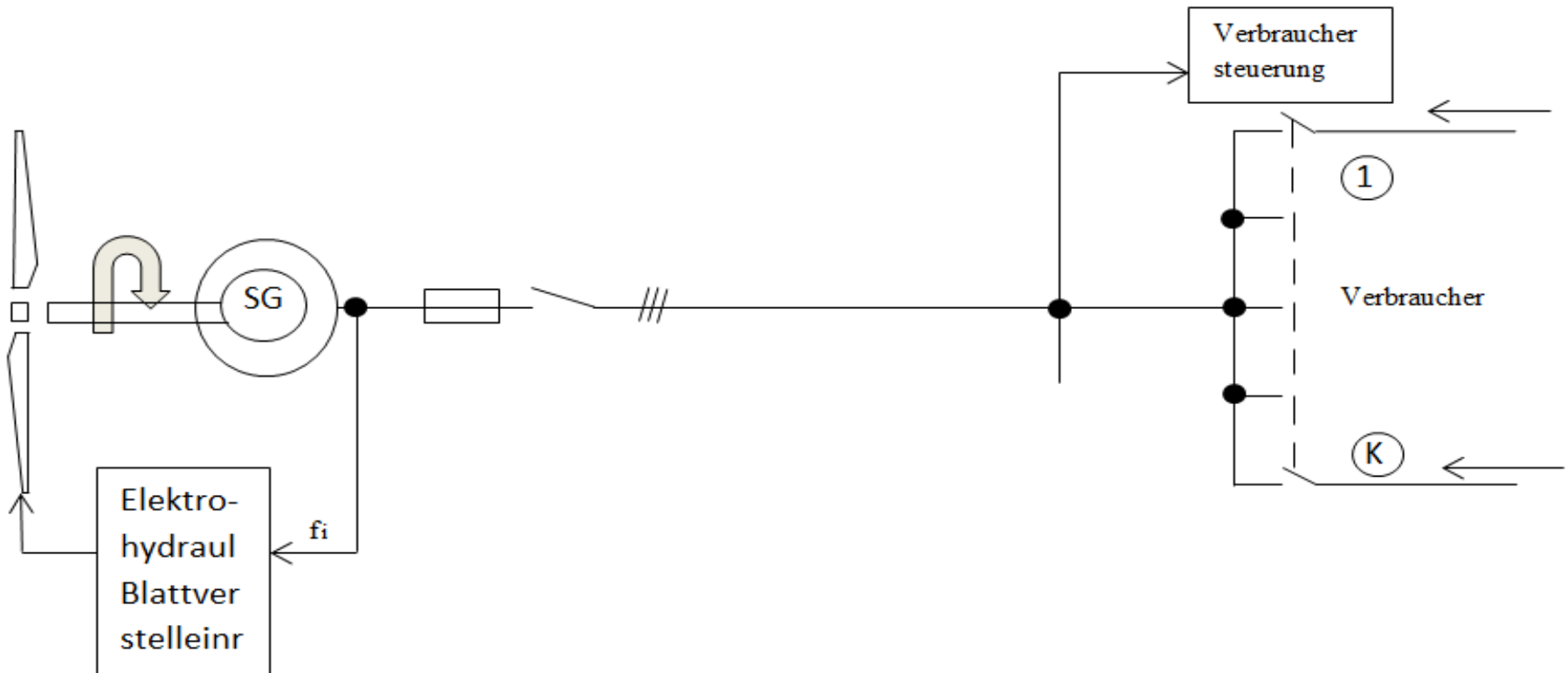
ANKOPPLUNG

Anlage mit Fliehkraftregler

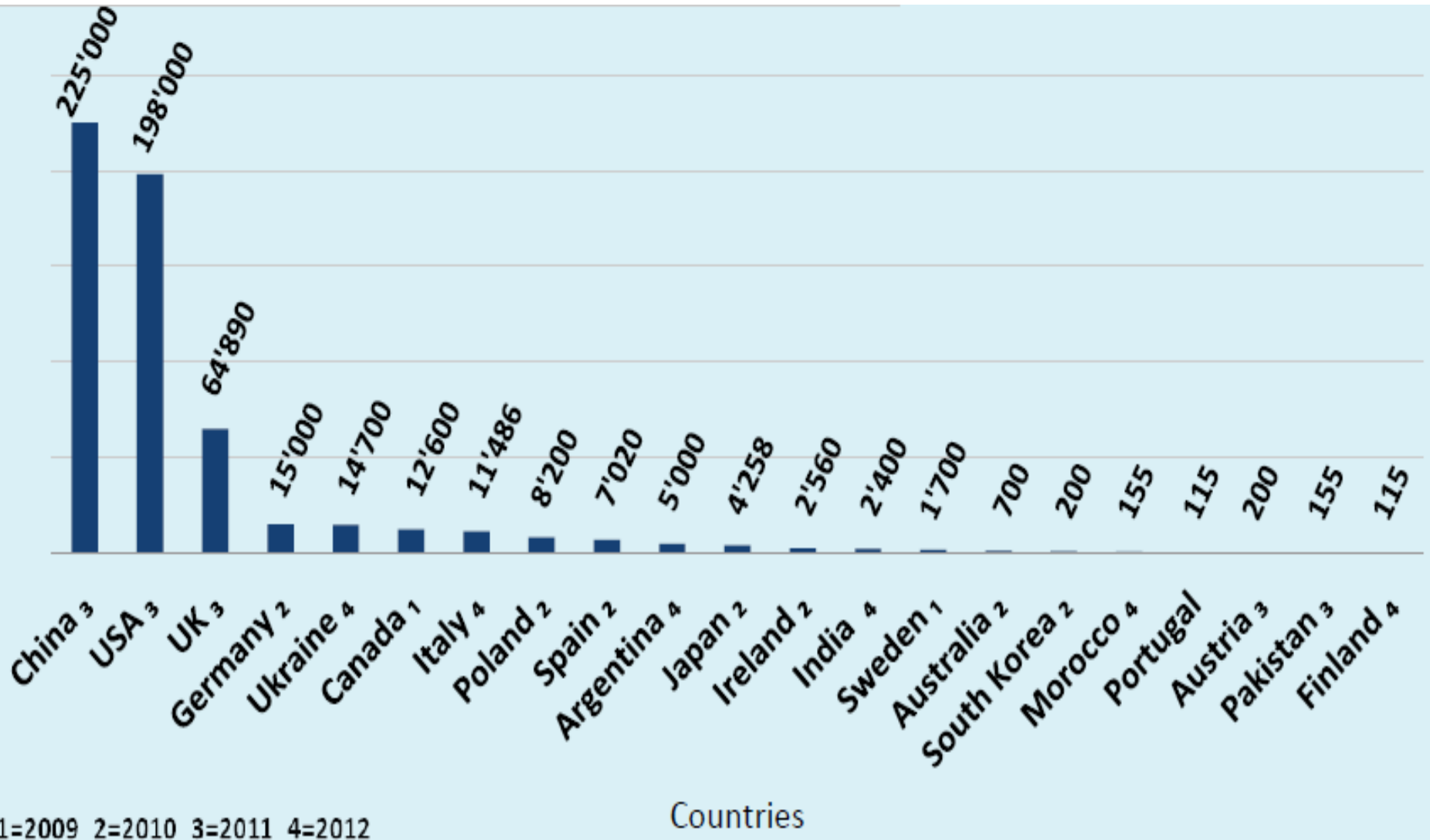


ANKOPPLUNG

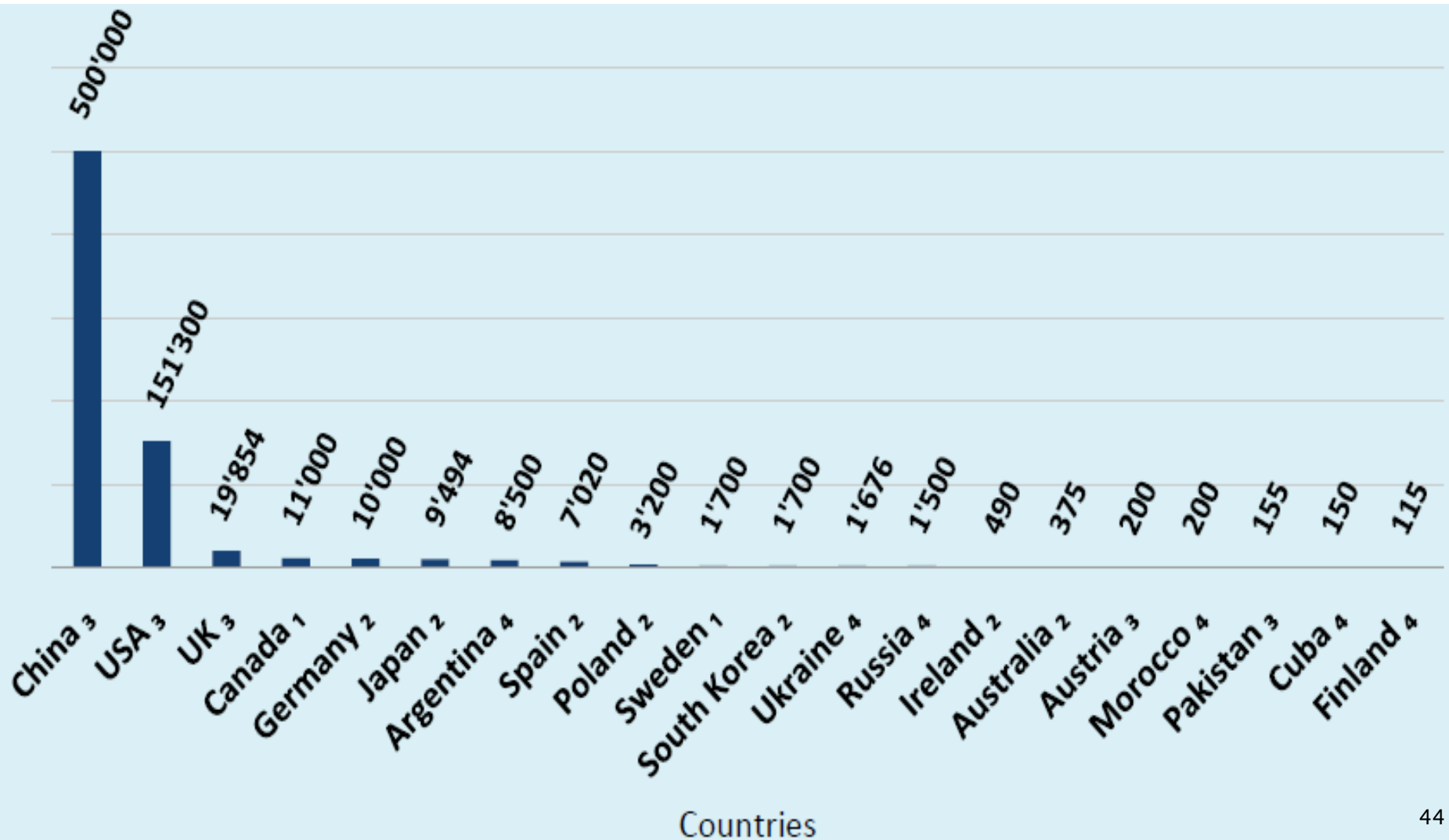
Anlage mit elektrohydraulischer Drehzahlregelung



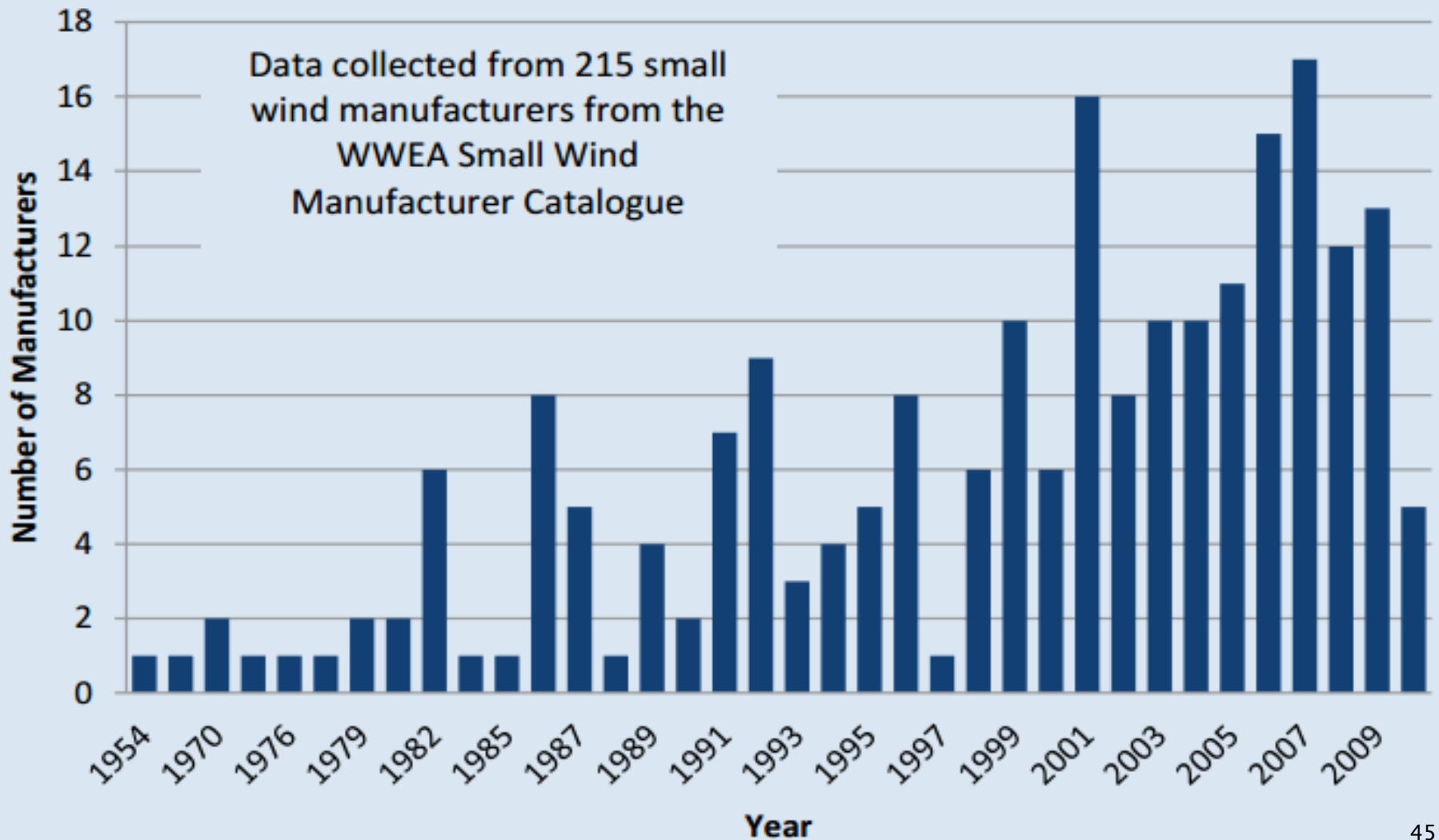
ZUBAU VON KWKA



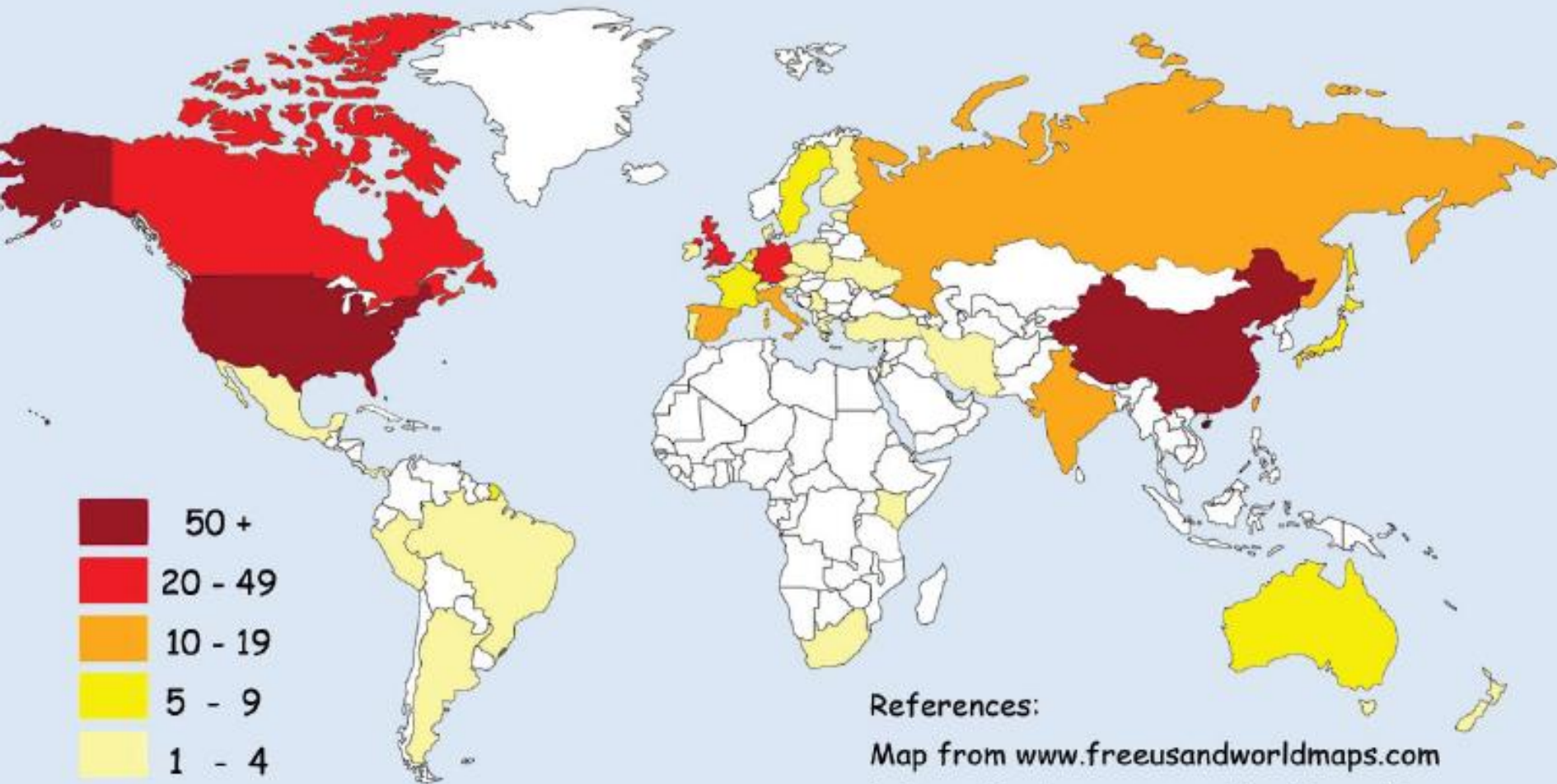
GESAMTZAHL INSTALLIERTER KLEINWINDKRAFTANLAGEN



WELTWEIT PRODUZIERTE KWKA



ÜBERSICHT ÜBER HERSTELLER VON KLEINWINDENERGIEANLAGEN



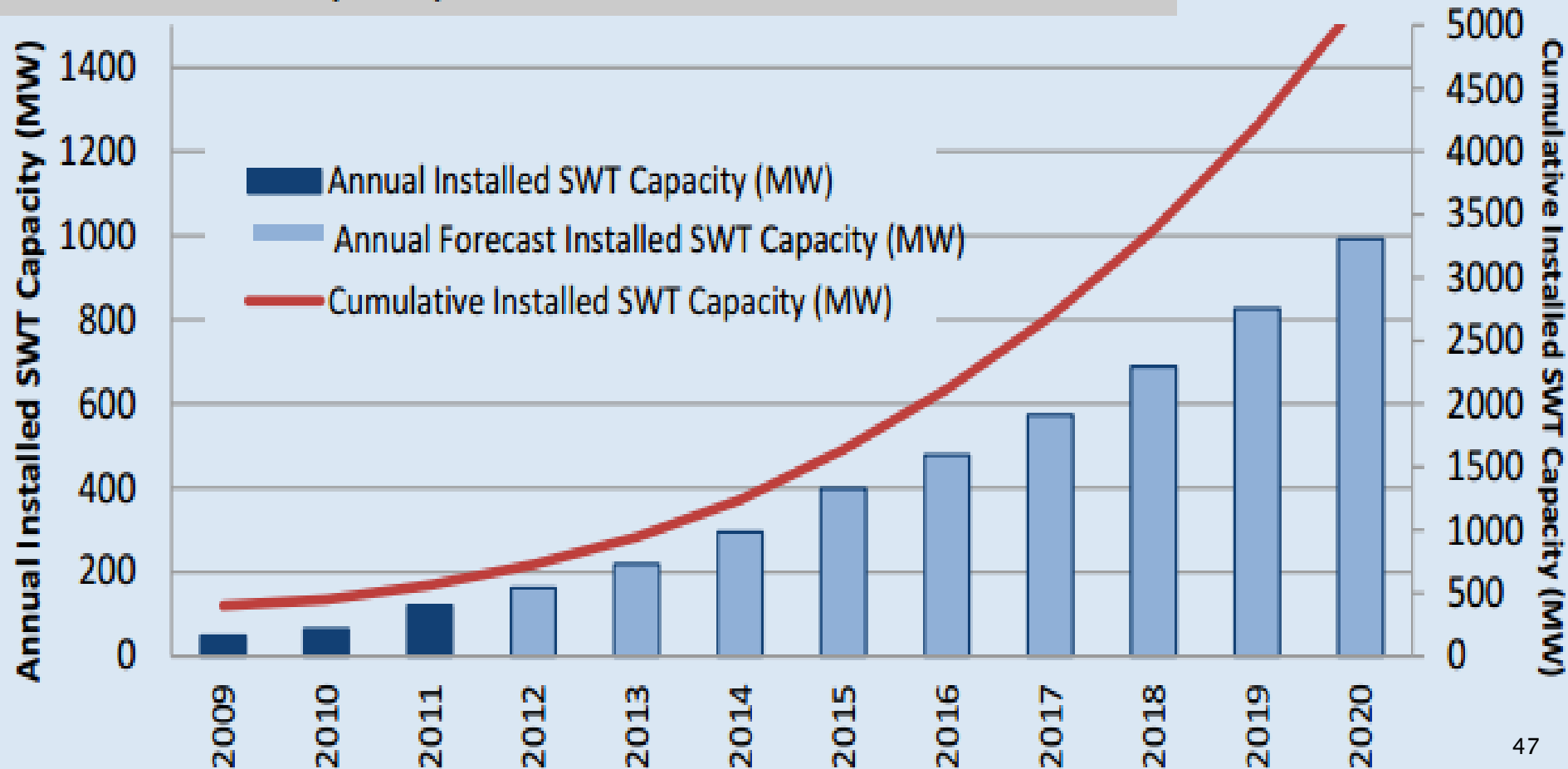
References:

Map from www.freeusandworldmaps.com

Data and colour composed by the author

PROGNOSE FÜR DIE INSTALATION VON KLEINWINDKRAFTANLAGEN (SWT) BIS 2020

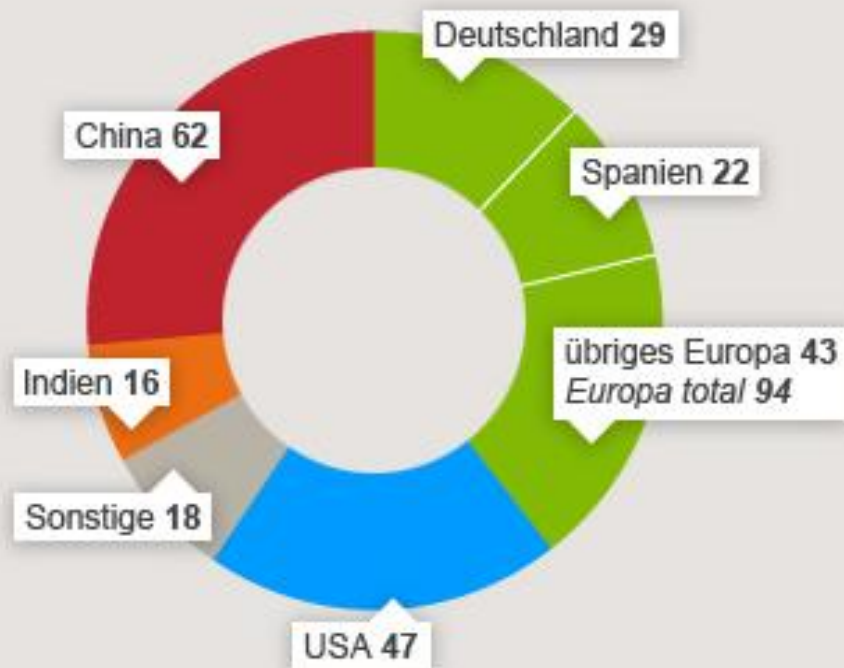
SWT Installed Capacity World Market Forecast 2009 - 2020



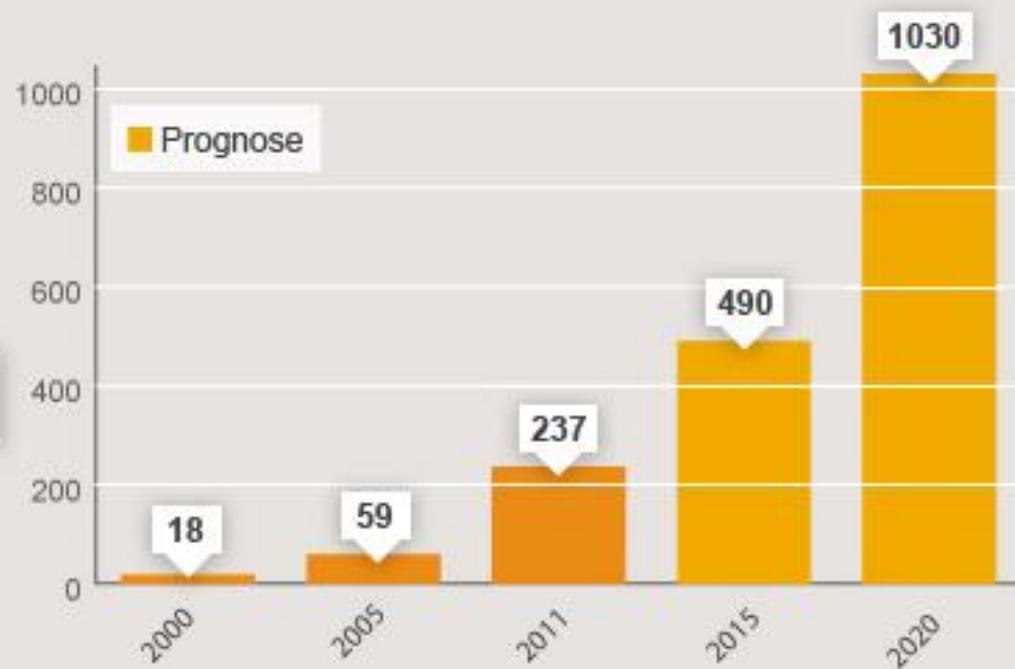
PROGNOSE FÜR DIE INSTALATION VON WINDKRAFTANLAGEN BIS 2020

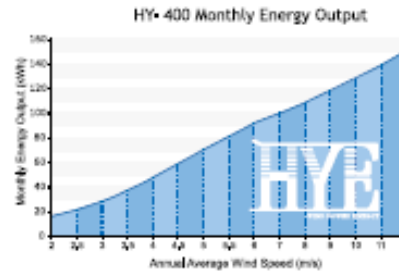
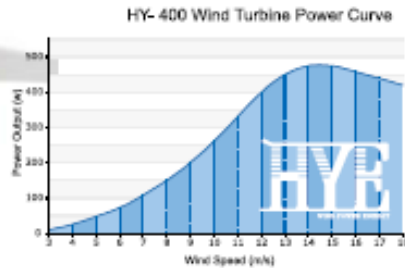
Weltweit gibt es immer mehr Windstrom

237 Gigawatt installierte Leistung bis 2011



Installierte Leistung weltweit in Gigawatt

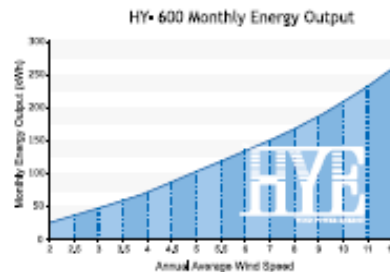
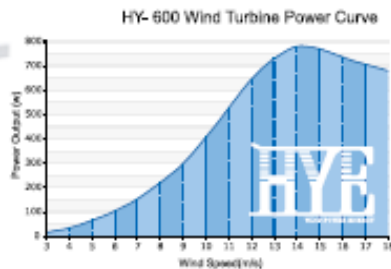




Technical Specifications:

Model	HY-400
Rated Output	400W
Peak Output	500W
Rated Voltage(V)	DC12/24
Start-up Speed	2m/s or 4.5mph
Cut-in Speed	2.5m/s or 5.6mph
Rated Rotor Speed (RPM)	750
Rated Wind speed(m/s)	12m/s or 26.8 mph
System average Cp.	≥0.36
Rated Charging Current (A)	33.3/16.7
Noise Level	<20dB (5m behind turbine @ 5m/s gusting)
KWH/month (monthly avg.V=5.5m/s)	82
Working Temp. range °C	from -40°C to 60°C
Survival Max. Wind	50m/s or 110mph
Over-speed Control	Electromagnetic & blade aerodynamic braking
Number of Blades	5
Rotor Diameter(m)	1.55
Swept Area (m ²)	1.89
Blade Material	Reinforced nylon glass-fiber
Generator Type	Brushless 3-phase with permanent Neodymium Magnet
Generator Material	Aluminum alloy body & precision stainless steel rotor
Net Weight	22KG
Tower Connection	flange connelion or bolt-on clamp
Controller Type	MPPT or PWM
Applications	Stand alone, solar & wind hybrid system etc.
Product Life (years)	15
Warranty (years)	3
Years on Market	7
Certificate	ISO9001:2008, CE, RoHS, ETL

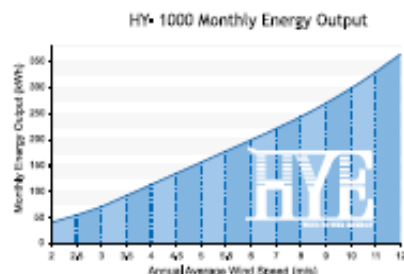
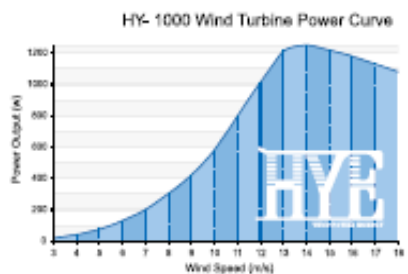
HY-400 TECHNISCHE SPEZIFIKATION



Technical Specifications:

Model	HY-600
Rated Output	600W
Peak Output	750W
Rated Voltage(V)	DC24/48
Start-up Speed	2m/s or 4.5mph
Cut-in Speed	2.5m/s or 5.6mph
Rated Rotor Speed (RPM)	750
Rated Wind speed(m/s)	12m/s or 26.8 mph
System average Cp.	≥0.36
Rated Charging Current (A)	25/12.5
Noise Level	<20dB (5m behind turbine @ 5m/s gusting)
KWH/month (monthly avg.V=5.5m/s)	91
Working Temp. range °C	from -40°C to 60°C
Survival Max. Wind	50m/s or 110mph
Over-speed Control	Electromagnetic & blade aerodynamic braking
Number of Blades	5
Rotor Diameter(m)	1.75
Swept Area (m ²)	2.4
Blade Material	Reinforced nylon glass-fiber
Generator Type	Brushless 3-phase PMA with high performance Neodymium Magnet
Generator Material	Aluminum alloy body & precision stainless steel rotor
Net Weight	25KG
Tower Connection	flange connection or bolt-on clamp
Controller Type	MPPT or PWM
Applications	Stand alone, solar & wind hybrid system etc.
Product Life (years)	15
Warranty (years)	3
Years on Market	6
Certificate	ISO9001:2008, CE, RoHS, ETL

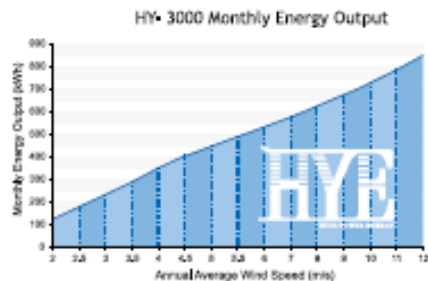
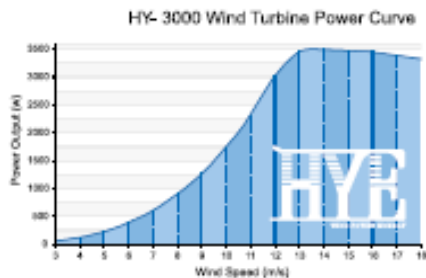
HY-600 TECHNISCHE SPEZIFIKATION



Technical Specifications:

Model	HY-1000
Rated Output	1000W
Peak Output	1200W
Rated Voltage(V)	DC24/48
Start-up Speed	2.5m/s or 5.6mph
Cut-in Speed	3m/s or 6.7mph
Rated Rotor Speed (RPM)	750
Rated Wind speed(m/s)	12m/s or 26.8 mph
System average Cp.	≥0.36
Rated Charging Current (A)	41.7/20.8
Noise Level	<20dB (5m behind turbine @ 5m/s gusting)
KWH/month (monthly avg.V=5.5m/s)	175
Working Temp. range °C	from -40°C to 60°C
Survival Max. Wind	50m/s or 110mph
Over-speed Control	Electromagnetic & blade aerodynamic braking
Number of Blades	5
Rotor Diameter(m)	1.96
Swept Area (m ²)	3
Blade Material	Reinforced nylon glass-fiber
Generator Type	Brushless 3-phase PMA with high performance Neodymium Magnet
Generator Material	Aluminum alloy body & precision stainless steel rotor
Net Weight	28KG
Tower Connection	flange connection or bolt-on clamp
Controller Type	MPPT or PWM
Applications	Stand alone, solar & wind hybrid system etc.
Product Life (years)	15
Warranty (years)	3
Years on Market	4
Certificate	ISO9001:2008, CE, RoHS, ETL

HY-1000 TECHNISCHE SPEZIFIKATION



Technical Specifications:

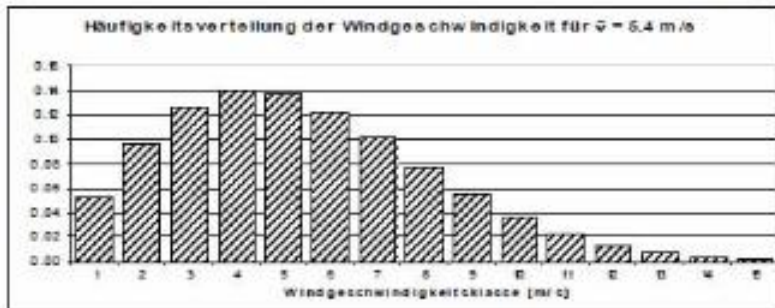
Model	HY-3000
Rated Output	3000W
Peak Output	3500W
Rated Voltage(V)	Grid-off DC48/110 or Grid-on AC110/220
Start-up Speed	2.5m/s or 5.6mph
Cut-in Speed	3m/s or 6.7mph
Rated Rotor Speed (RPM)	700
Rated Wind speed(m/s)	12m/s or 26.8 mph
System average Cp.	≥0.36
Rated Charging Current (A)	DC62.5/27.3 or AC27.2/13.6
Noise Level	<30dB (5m behind turbine @ 5m/s gusting)
KWH/month (monthly avg.V=5.5m/s)	495
Working Temp. range °C	from -40°C to 60°C
Survival Max. Wind	60m/s or 110mph
Over-speed Control	Electromagnetic & blade aerodynamic braking
Number of Blades	5
Rotor Diameter(m)	3.05
Swept Area (m ²)	7.3
Blade Material	Reinforced nylon glass-fiber
Generator Type	Brushless 3-phase PMA with high performance Neodymium Magnet
Generator Material	Aluminum alloy body & precision stainless steel rotor
Net Weight	70KG
Tower Connection	Flange connection or reducing joint
Controller Type	MPPT or PWM
Applications	Stand alone, solar & wind hybrid system, grid-tie system etc.
Product Life (years)	15
Warranty (years)	3
Years on Market	4
Certificate	ISO9001:2008, CE, RoHS, ETL

HY-3000 TECHNISCHE SPEZIFIKATION

Ertrag bei 0,23 €/kWh = 1.962,56 €
 Klassenbreite $\Delta v = 1$
 mittlere Windgeschw. $\bar{v} = 5,4$
 Einschaltzeit pro Jahr = 1
 Jahresstunden $T = 8760$

Klasse	Häufigkeit hr	Windstunden nach Rayleigh	Klassenleistung der Anlage [W]	Klassen-Ertrag realistisch [kWh/ms]
0	1	0,05244	459	0
1	2	0,09673	847	0
2	3	0,12682	1111	124,372
3	4	0,14003	1227	267,344
4	5	0,13736	1203	492,156
5	6	0,12257	1074	817,408
6	7	0,10075	883	1261,7
7	8	0,07688	673	1843,632
8	9	0,05471	479	3227,255
9	10	0,03644	319	3494,816
10	11	0,02277	199	3494,816
11	12	0,01337	117	3494,816
12	13	0,00739	65	3494,816
13	14	0,00384	34	3494,816
14	15	0,00189	17	3494,816

Dela Rotor



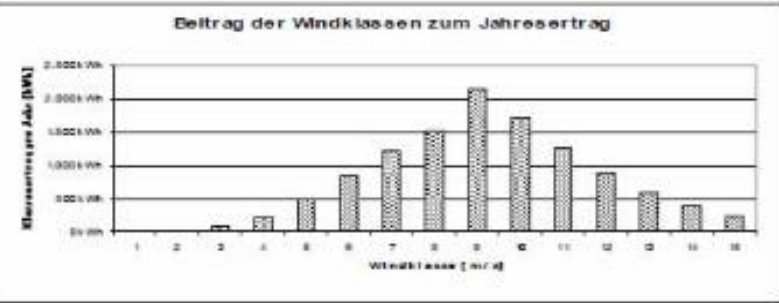
Ertrag bei 0,23 €/kWh = 2.670,45 €
 Klassenbreite $\Delta v = 1$
 mittlere Windgeschw. $\bar{v} = 6,4$
 Einschaltzeit pro Jahr = 1
 Jahresstunden $T = 8760$

Klasse	Häufigkeit h_k	Windstunden nach Rayleigh	Klassenleistung der Anlage [W]	Klassen-Ertrag realistisch [kWh/ms]
0	1	0,03762	330	0
1	2	0,07104	622	0
2	3	0,09681	848	124,372
3	4	0,11287	989	267,344
4	5	0,11873	1040	492,156
5	6	0,11538	1011	817,408
6	7	0,10491	919	1.217
7	8	0,08993	788	1.643,632
8	9	0,07303	640	2.147
9	10	0,05637	494	3.494,816
10	11	0,04145	363	3.494,816
11	12	0,02909	255	3.494,816
12	13	0,01951	171	3.494,816
13	14	0,01252	110	3.494,816
14	15	0,00769	67	3.494,816

Dela Rotor



[Zurück](#)



MATHEMATISCHE BESCHREIBUNG

Relative Häufigkeit

$$h(v) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{v}{v_m^2} \right) e^{-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_m^2} \right)^2}$$

Energieertrag

$$E_i = \tau h_i P_i, kWh$$

P_i – mögliche Leistung
mit der
Windgeschwindigkeit, W

p_L – Luftdichte, kg/m^3

C_p – Leistungsbeiwert, %

A_p – Propelerfläche, m^2

Die Leistung der WKA

Jahresenergieertrag

$$P_i = \frac{p_L}{2} v_i^3 A_p c_p, W$$

$$E_a = \tau \sum_{i=1}^n h_i P_i, kWh$$

τ – betrachterer Zeitraum
z. B. ein Jahr – 8760h

v – Windgeschwindigkeit (m/s)

v_m – Mittlere Wind –
geschwindigkeit (m/s)

BEURTEILUNG DER WIRTSCHAFTLICHKEIT

► Ausgangsdaten

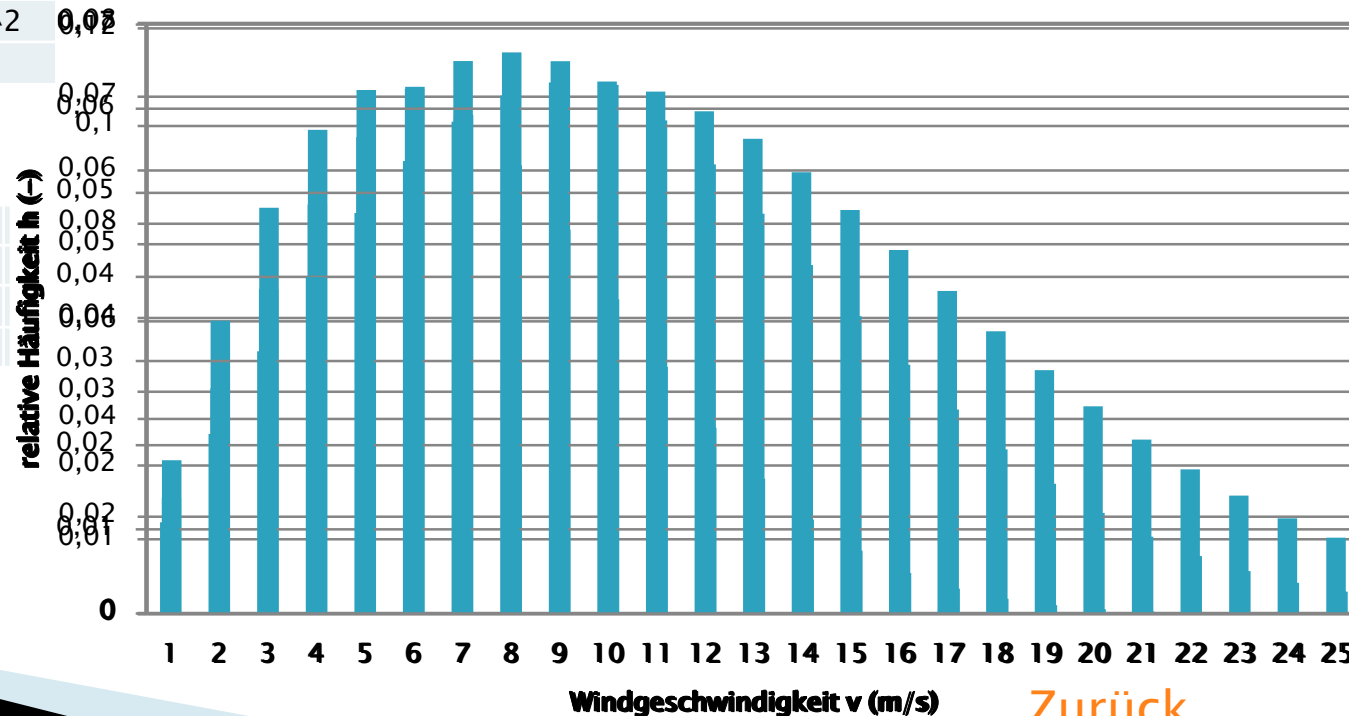
Mittlere Wingschwindigkeit V_m ; (m/s)

Daten der WKA	
Typ der WKA	
Leistungsbeiwert	%
Rotorfläche	m
Einschaltwindgeschwindigkeit	m/s
Ausschaltwindgeschwindigkeit	m/s
Nennwindgeschwindigkeit	m/s
Nennleistung	W
Propelerfläche (A_p)	m^2
Preis	€

$$V_m = 170 \text{ m/s}$$

Histogramm der rel.Häufigkeiten und math. Häufigkeitsverteilung

Preis		
HY600	HY1000	HY3000
€/kWh	€/kWh	€/kWh
0,1025743	0,09577625	0,076989404



○ Berechnung

[Zurück](#)

Literatur



**VIELEN DANK FÜR
IHRE
AUFMERKSAMKEIT**