Wintersemester 2014/15

Universität Rostock

Traditio et Innovatio

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Windturbinen und alternative Energiequellen

Prof. Dr.-Ing. Hendrik Wurm
Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

Inhalt der Vorlesung Windturbinen und alternative Energiequellen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- **Einführung / industrieller Hintergrund (Vorlesung 1)**
- Energieinhalt im Wind und Aufbau von Windkraftanlagen (Vorlesung 2)
- Windentstehung und Messung der Windgeschwindigkeit (Vorlesung 3)
- Grundlagen der Aerodynamik (Vorlesung 4)
- Grundlagen für den Rotorentwurf (Vorlesung 5)

Inhalt der Vorlesung Windturbinen und alternative Energiequellen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Entwurf und aerodynamische Optimierung des Rotors (Vorlesung 5,6)
- Anpassung an veränderte Windverhältnisse und Verluste (Vorlesung 7)
- Grundlagen der Aeroelastik, Fluid-Struktur-Wechselwirkungen (Vorlesung 8)
- Einführung in die Akustik (Vorlesung 9)
- Schallquellen an Windkraftanlagen und Maßnahmen zur Lärmreduzierung (Vorlesung 10)

Inhalt der Vorlesung Windturbinen und alternative Energiequellen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- spezielle Herausforderungen an offshore-Windparks (Vorl. 11)
- Gezeitenturbinen (Vorlesung 12)
- Solarthermie und Photovoltaik (Vorlesung 13)
- Geothermie (Vorlesung 14)
- Zusammenfassung (Vorlesung 14)

Woher kommt zukünftig unsere Energie?

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Begriffe:

Rohstoffreserven: Rohstoffe, die mit gegenwärtigen technischen Möglichkeiten wirtschaftlich gewonnen werden können.

Rohstoffressourcen: Rohstoffvorkommen, die nicht sicher nachgewiesen sind oder wegen fehlender technischer Möglichkeiten nicht ausgebeutet werden können oder deren Abbau mit heutiger Technik nicht wirtschaftlich ist.

konventionelle Speicher
nicht-konventionelle Speicher: z.B. Ölsand, Ölschiefer, Gashydrate

Woher kommt zukünftig unsere Energie?

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Reserven, Ressourcen und Förderung nicht-erneuerbarer Energierohstoffe

in EJ

	Erdöl		Erdgas		Kohle	
	2001	**2008**	**2001**	**2008**	**2001**	**2008**
Förderung	147	163	80	121	91	151
Reserven konventionell	6.351	6.682	5.105	7.136	19.620	21.127
nicht-konventionell	2.761	2.183	60	184		
Ressourcen konventionell	3.525	3.785	6.879	9.095	116.108	435.409
nicht-konventionell	10.460	12.906	48.645	103.364		

aus: Energie in Deutschland, BMWi, 2010

dezimale Vielfache: Exa ... 10E18 ; Peta ... 10E15 ; Terra ... 10E12 ; Giga ... 10E9 ; Mega ... 10E6

Energie für

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Strom

Wärme

Verkehr

Vergleiche

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Primärenergieverbrauch?

Endenergieverbrauch?

Nutzenergieverbrauch?

Definitionen der Energieformen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Primärenergie: Energiemenge, die mit natürlich vorkommenden Energieformen oder –quellen zur Verfügung steht (Erdöl, Kohle, Wind)
- Sekundärenergie: mit Hilfe von Umwandlungsprozessen aus der Primärenergie gewonnene Energiemenge
- Endenergie: Die dem Endverbraucher zur Verfügung stehende Energiemenge
- Nutzenergie: Dem Endverbraucher effektive zur Verfügung stehende Energiemenge. Durch Umwandlungsprozesse beim Endverbraucher entstehen weitere Verluste.

Berechnung des Primärenergieverbrauchs

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Wirkungsgradmethode

- Berechnung des Primärenergieverbrauchs aus dem Endenergieverbrauch unter Zuhilfenahme von Wirkungsgraden

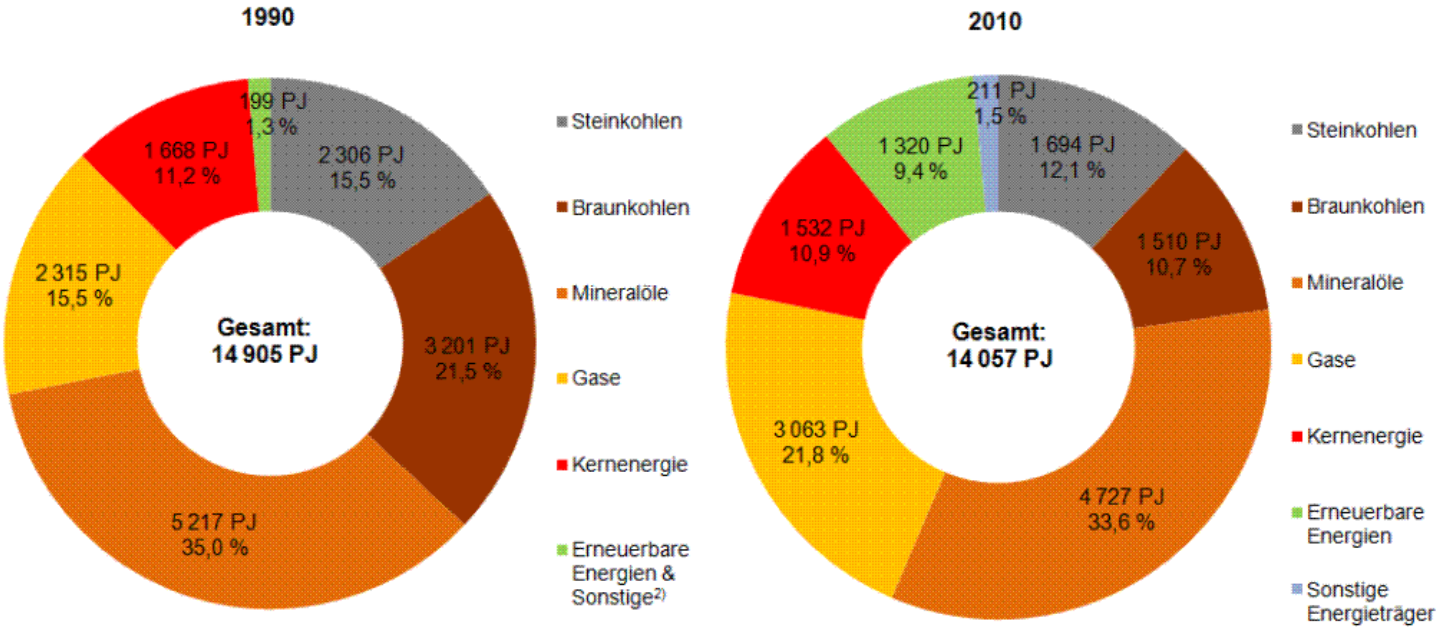
- Primärenergie verschiedener Energieträger wird unterschiedlich berechnet
  - fossilen Energieträgern wird als Energiewert das Produkt aus Masse und Heizwert zugeordnet
  - für Kernenergie wird ein Wirkungsgrad von 33% festgelegt (PEV = 3*EEV)
  - regenerative Energien wird ein Wirkungsgrad von 100% zugeordnet

- Unterrepräsentation der erneuerbaren Energie beim primärenergiebezogenen Vergleich

Primärenergieverbrauch D

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Entwicklung des Primärenergieverbrauchs in Deutschland nach Energieträgern[1)]



[1)] Berechnungen auf der Basis des Wirkungsgradansatzes.
[2)] bis 1999 Erneuerbare Energien mit sonstigen Energieträgern, ab 2000 getrennte Erfassung

Quelle: für 1990: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Energiebilanzen der Bundesrepublik Deutschland 1990-2009, Stand 02/2011; für 2010: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Tabelle Primärenergieverbrauch 2010, Stand 02/2011

Strom-Mix in D in 2010

Braun- und Steinkohle	43%
Erdgas	14%
AKW	22% -- soll auf 0% sinken
Windkraft	6,2% -- soll auf 33% steigen
Biomasse	5,6%
Wasserkraft	3,2%
Photovoltaik	2,0%
sonstige	4,0%

Quelle: Wikipedia

Energieerzeugung in D

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- konventionelle Kraftwerke 78 % Öl 33 %; Kohle 23% und Gas 22 %
- Atomkraftwerke 12 %
- Wind/Wasser/Solarkraftwerke 11 %

installierte Kraftwerksleistung in D, 2010

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- 93,3 GW
- davon 27,2 GW installierte Windkraftanlagenleistung

Kraftwerk Rostock

Nennleistung: 553 MW + 150 MW FW-Auskopplung
Durchschnittliche Verfügbarkeit eines Steinkohlekraftwerkes in D: 91,2% -- Jahresleistung: 4,4 TWh

Erneuerbare Energien in D, 2008

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Wasserkraft: 75,0 PJ = 7,2 %
- Windkraft: 144,7 PJ = 14,0 %
- Photovoltaik: 14,4 PJ = 1,4 %
- Biomasse: 537,9 PJ = 51,9 %
- Müll (biogener Anteil): 62,4 PJ = 6,0 %
- Solarthermie: 14,9 PJ = 1,4 %
- Geothermie: 9,2 PJ = 0,9 %
- Biokraftstoffe: 178,4 PJ = 17,2 %

Installierte Leistung Windkraft, 2012

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Deutschland: 31.307 MW
- EU 27: (2010: 74.767 MW)
- China: 75.564 MW (2010: 42.287 MW)
- USA: 60.007 MW (2010: 40.180 MW)
- Indien: 18.421 MW (2010: 13.065 MW)
- weltweit: 282.482 MW (2010: 194.390 MW, 2000: 18.455 MW)

Quelle: u.a. Bundesamt für Naturschutz, Internet-Quellen

Anteil WKA an der Bruttostromerzeugung in D

- 31,3 GW installierte Leistung (ca. 25.000 WKA)

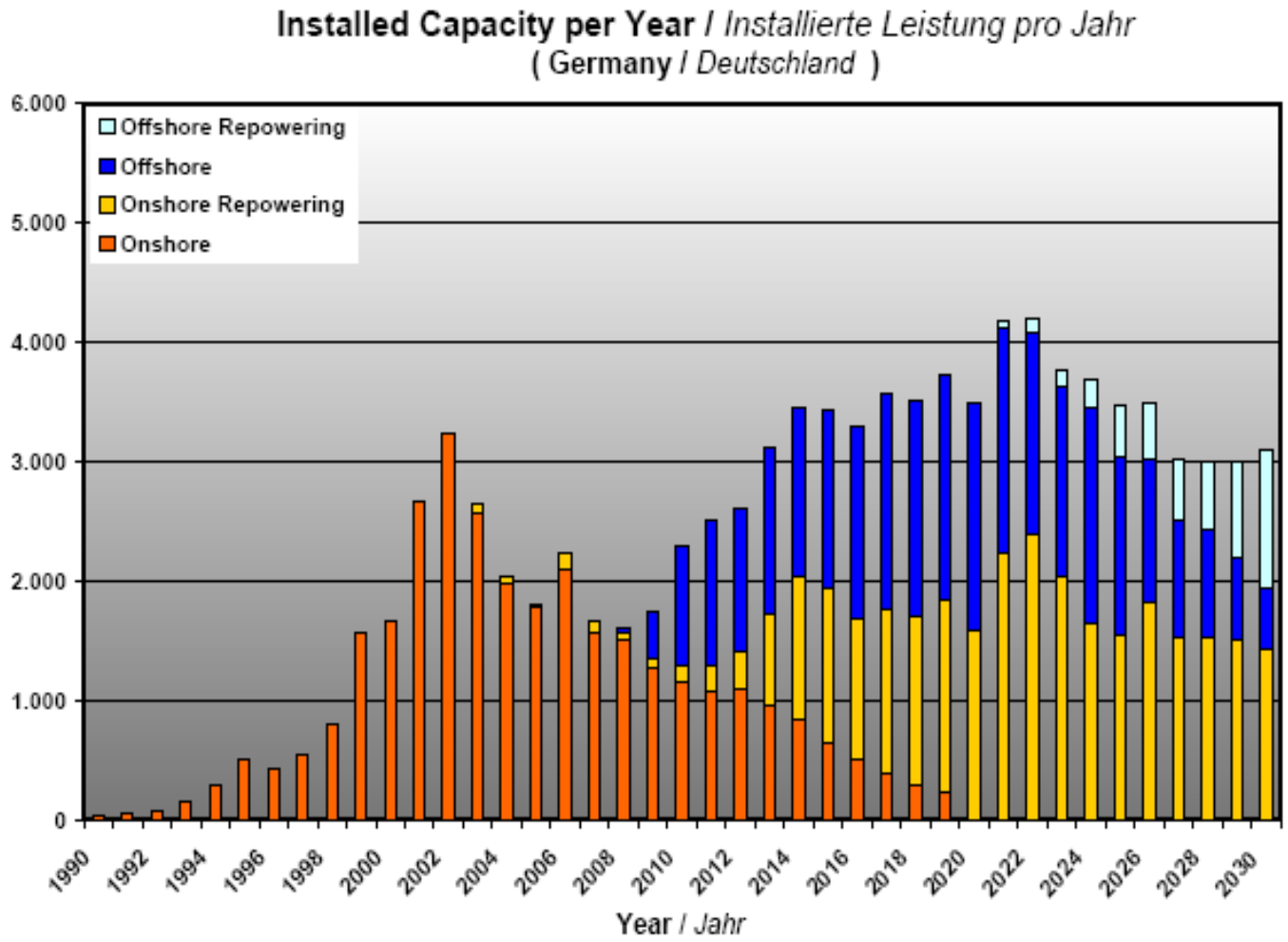
- Bruttostromerzeugung in 2012: 628,7 TWh
- eingespeister Windstrom in 2012: 50,7 TWh
- Anteil der erneuerbaren Energieträger in 2012: 23,5%

Ziele in D

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- 2012: 31. 944 MW (31,9 GW), davon 3.300 MW offshore
- 2017: 44.118 MW, davon 11.500 MW offshore
- 2030: 33 % des Strombedarfs durch Windkraft (25.000 MW offshore) entspricht ca. 210 TWh/a (ca. 48 „Rostock Kraftwerke“)

- Ziele in den USA: (heute 60 GW, meist onshore)
  bis 2020: 10 GW offshore, bis 2030: 54 GW



entnommen aus Wikipedia

erste Schritte off-shore in D

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Ende 2009 Testfeld alpha ventus (45 km vor Borkum, 12 WKA der 5 MW-Klasse)
- 2010: „Baltic 1“ in der Ostsee mit 21 WKA es folgt „Bard offshore I“ in der Nordsee mit 80 WKA

Baltic I

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- 21 Siemens SWT-2,3-90/2300 kW
- 16 km von der Küste, 16 m -19 m Wassertiefe
- Gesamtleistung: 48,3 MW
- jährl. Ertrag: 185 GWh/a

Bard offshore I

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- 80 Bard 5.0
- 90 km vor Borkum, ca. 40 m Wassertiefe
- Gesamtleistung: 400 MW
- jährl. Ertrag: 1.600 GWh/a

Industrieller Hintergrund
Installationen

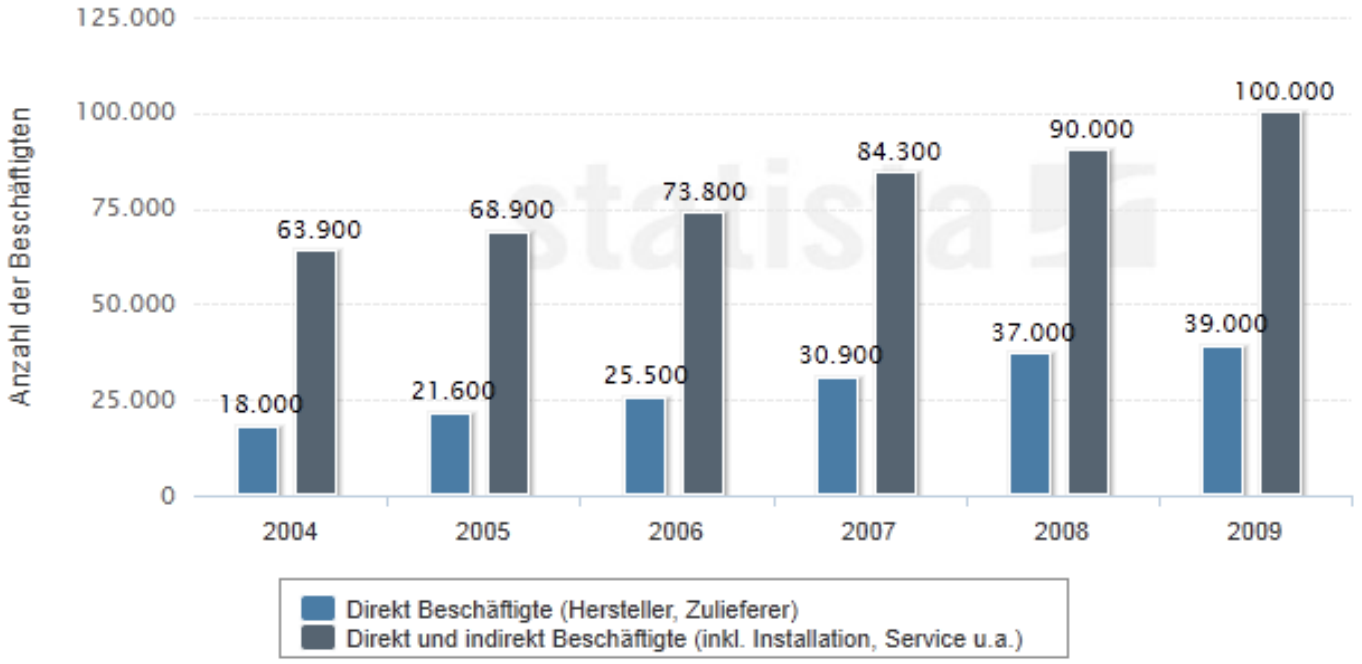
Universität Rostock Traditio et Innovatio

Enercon	50,3 %
Vestas	24,1 %
Repower	10,9 %
Nordex	4,8 %
Siemens	3,5 %
Fuhrländer	2,7 %
Gamesa	2,6 %
sonstige	1,1 %

- ca. 100.000 Beschäftigte

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Anzahl der Beschäftigten in der deutschen Windindustrie von 2004 bis 2009



i Deutschland; Bundesverband Windenergie e.V., Deutsches Windenergie-Institut (Dewi)

Quelle: Frankfurter Allgemeine Zeitung

© Statista 2011

Deutsche Windkraftindustrie
Verbände

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Bundesverband WindEnergie e.V. (BWE)
- Deutsches Windenergie-Institut gGmbH (DEWI)
- Bundesverband Erneuerbare Energie e.V. (BEE)
- Wirtschaftsverband Windkraftwerke e.V. (WVW)
- Fördergesellschaft Windenergie e.V. (FGW)

- International: The European Wind Energy Association (EWEA) in Brüssel
- Global Wind Energy Council (GWEC)

Windenergienutzung, technische Lösungen

Windenergienutzung, technische Lösungen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Windturbinen in „freier“ Anströmung
- Konzentratoren

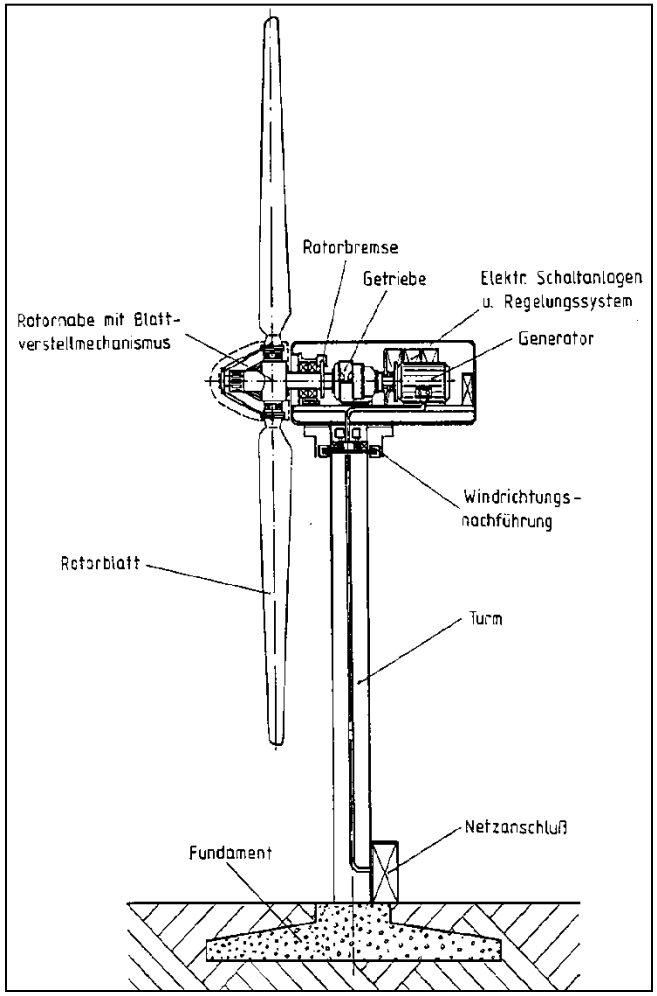
Windkraftanlagen, prinzipielle Ausführungsvarianten

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Horizontalachsen-Windkraftanlage Typ Bonus,

Rotordurchmesser 37 m,
Nennleistung 450 kW

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag



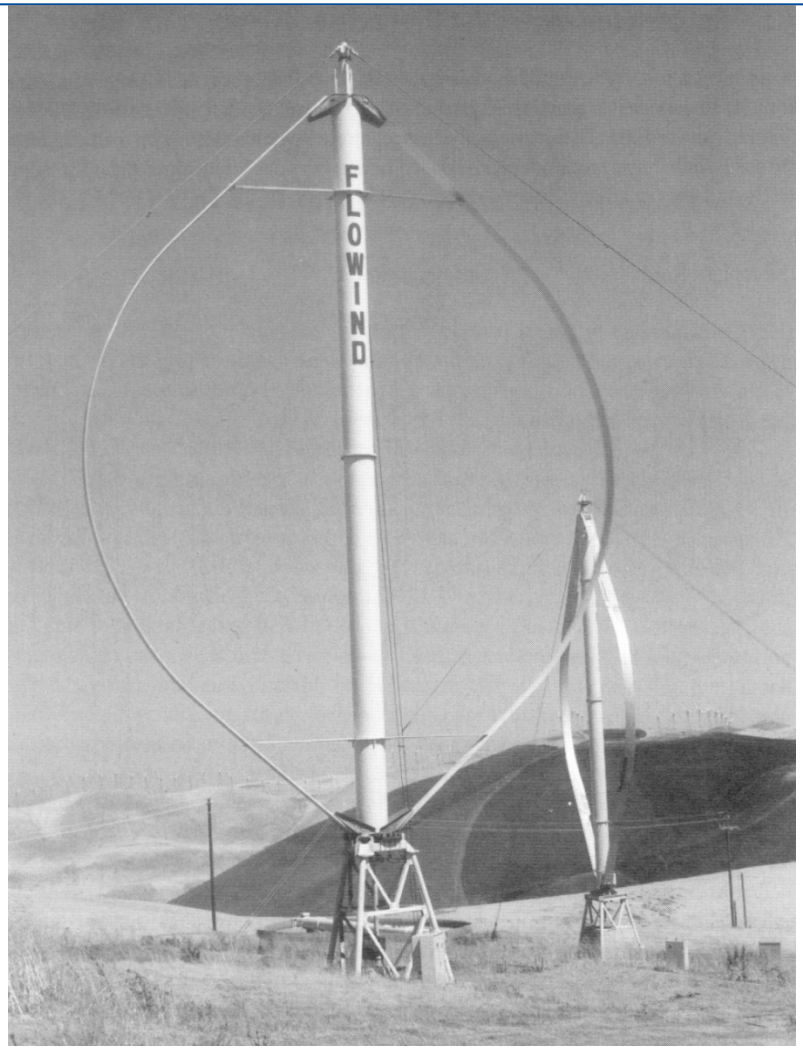
Windkraftanlagen, prinzipielle Ausführungsvarianten

Universität Rostock Traditio et Innovatio

Darrieus-Windkraftanlagen der amerikanischen Firma Flowind,

Rotordurchmesser 19 m, Leistung 170 kW

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

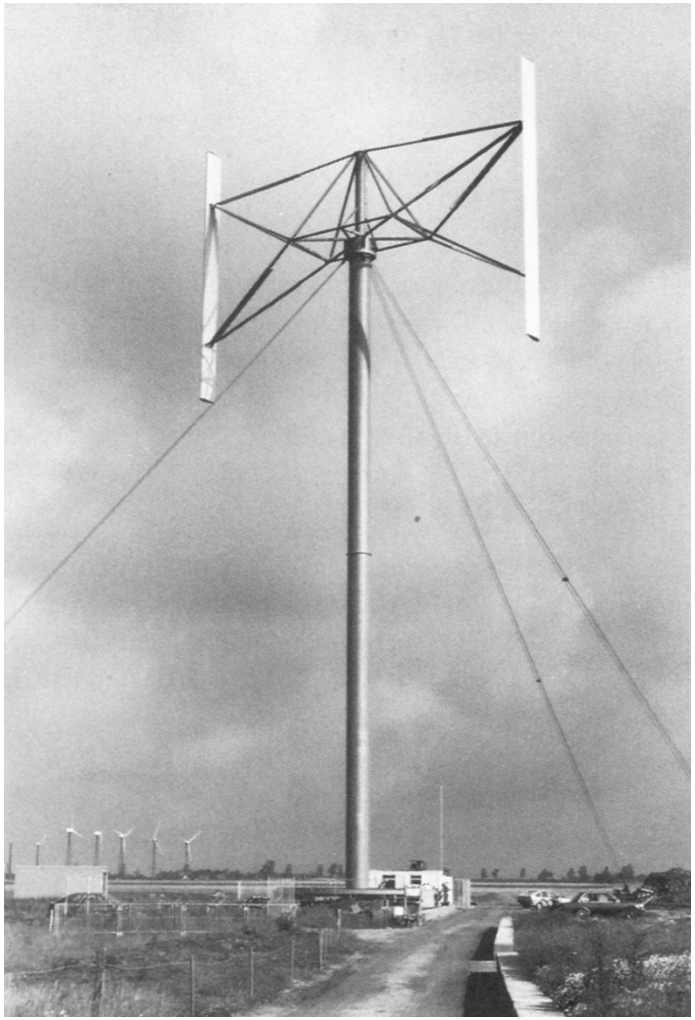


Windkraftanlagen, prinzipielle Ausführungsvarianten

Universität Rostock Traditio et Innovatio

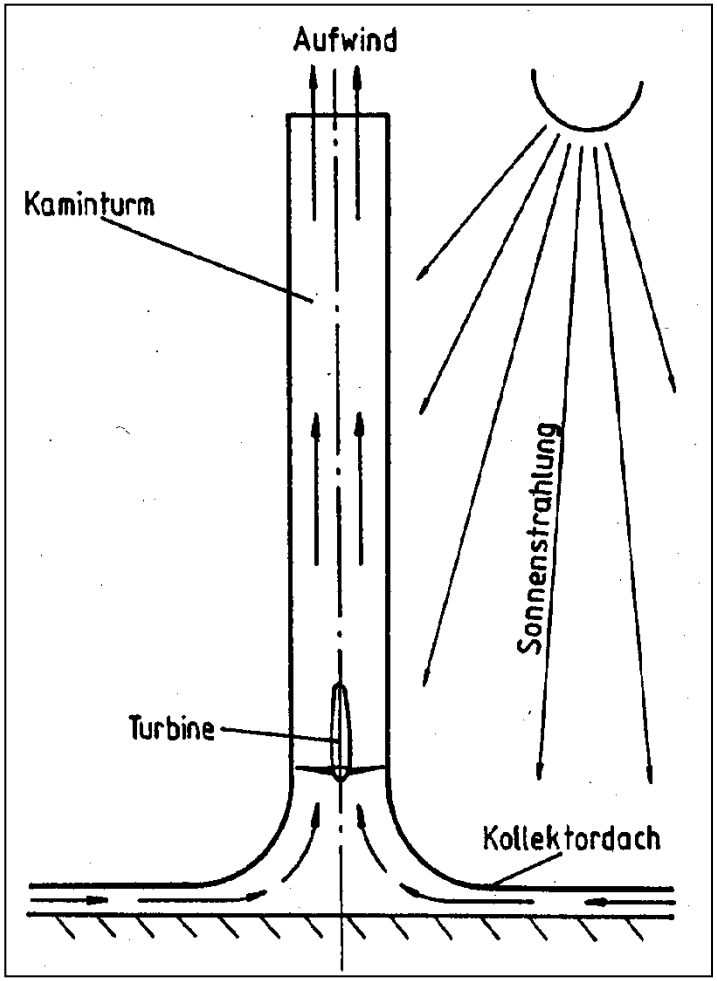
H-Rotor-Anlage,
Rotordurchmesser 35 m,
Nennleistung 300 kW

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag



Windkraftanlagen, prinzipielle Ausführungsvarianten

Universität Rostock Traditio et Innovatio



Aufwindkraftwerk, schematisch

Quelle: Windkraftanlagen, Erich Hau, Springer-Verlag

Windkraftanlagen im Rahmen der Vorlesung

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- im Wesentlichen: Windturbinen in „freier“ Anströmung

Windkraftanlagen, wesentliche Forschungsgebiete (aus „Maschinenbausicht“)

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Fragen rund um offshore- Anwendungen
- Erhöhung der Umfangsgeschwindigkeit
  - Lärm
  - Blattspitzenverluste
  - Mechanik und Werkstoffe
- Erhöhung der Flächenlast
- Erhöhung der Betriebsfestigkeit
- etc.

Forschung am Lehrstuhl für Strömungsmaschinen

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Akustik – Reduzierung der Geräuschemission
- Fluid-Struktur-Wechselwirkungen

studentische Vorträge im Rahmen der Vorlesung

Universität Rostock Traditio et Innovatio

- Beeinflussung des Blattspitzenwirbels
- laminar/turbulenter Umschlag
- Geräuschquellen an WKA
- Antrieb von Arbeitsmaschinen mit WKA

- ökonomischer Vergleich verschiedener regenerativer Energiequellen