



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Jenny Niebsch

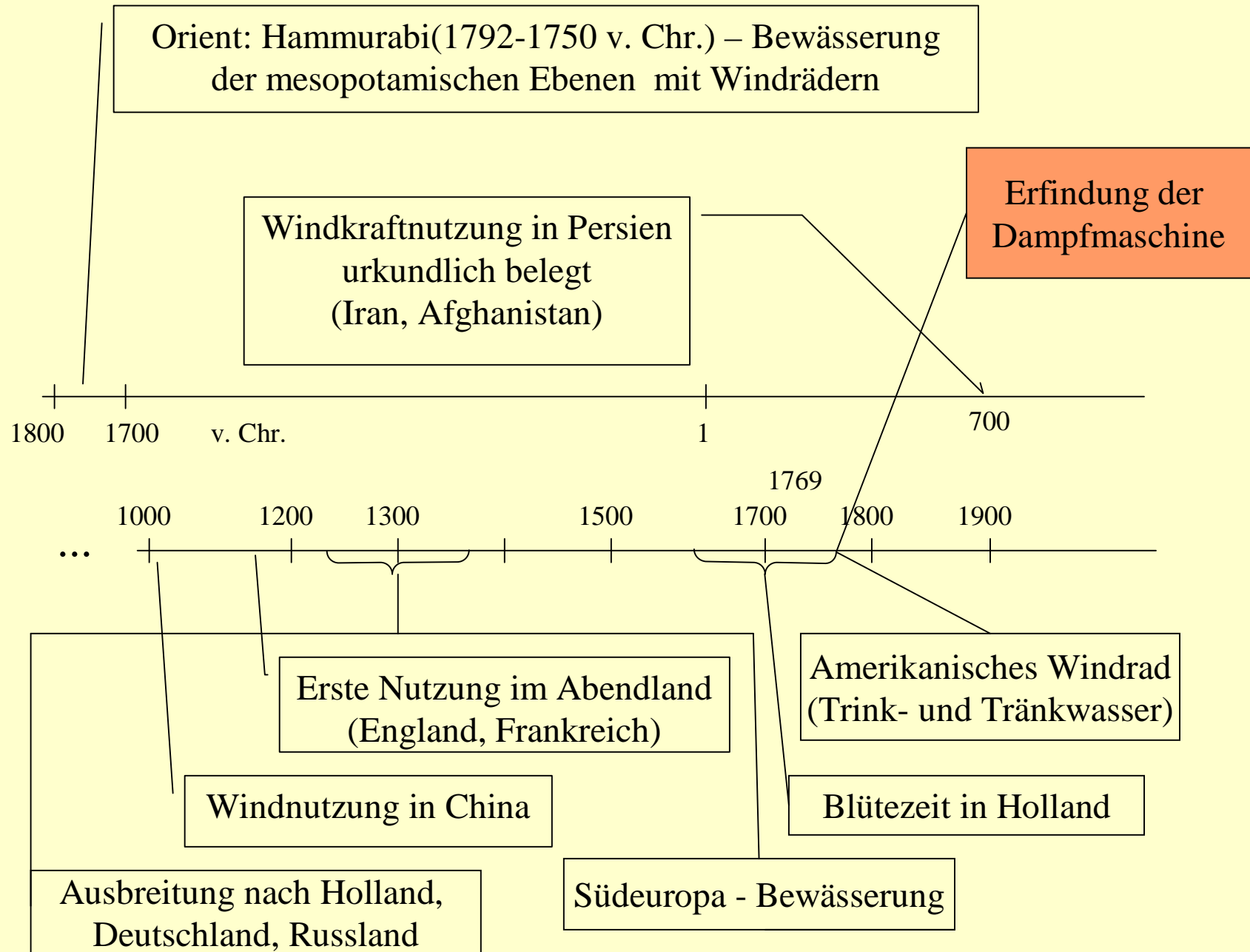
Uttendorf 2005

Bewässerung mit
Windkraft auf Kreta

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Gliederung

1. Geschichte
2. Physikalische Grundlagen
3. Konstruktion von Windenergieanlagen
4. Statistik und Energiepolitik



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Geschichte

- 12. – 19. Jh.:
 - ∨ Wasser- und Windkraft einzige relevante Quellen für mechanische Energie im Abendland;
 - ∨ spielten entscheidende Rolle für erste Wachstumsphase in Europa
- 1769 Erfindung der Dampfmaschine (James Watt)
- Noch 1895:
 - ∨ 45 % der Energie durch Wasser- und Windkraft;
 - ∨ 55% aus Dampf- und Verbrennungs-maschinen

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Geschichte

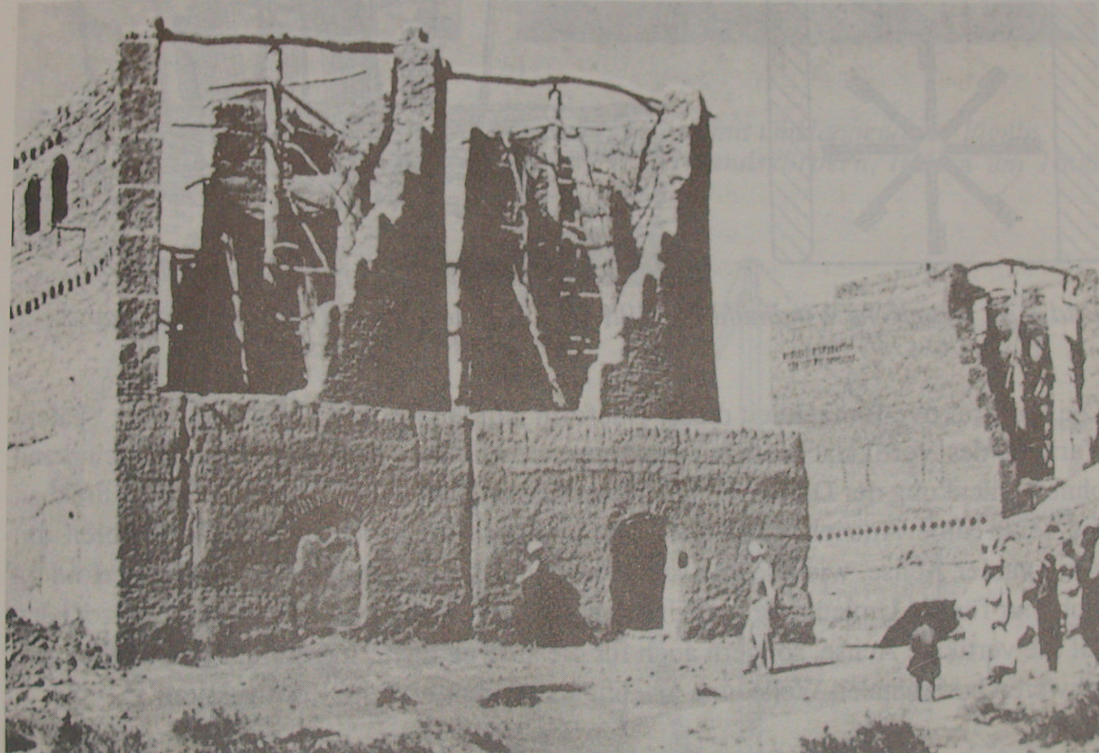


Bild 2.1: Windmühle mit vertikaler Achse aus Afghanistan; Zustand 1977 (aus [2])

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Technische Geschichte

Persien und China

- vertikale Drehachse
- Widerstandsläufer

Vorteil:

- Antrieb ohne Um-
lenkung und Getriebe

China:

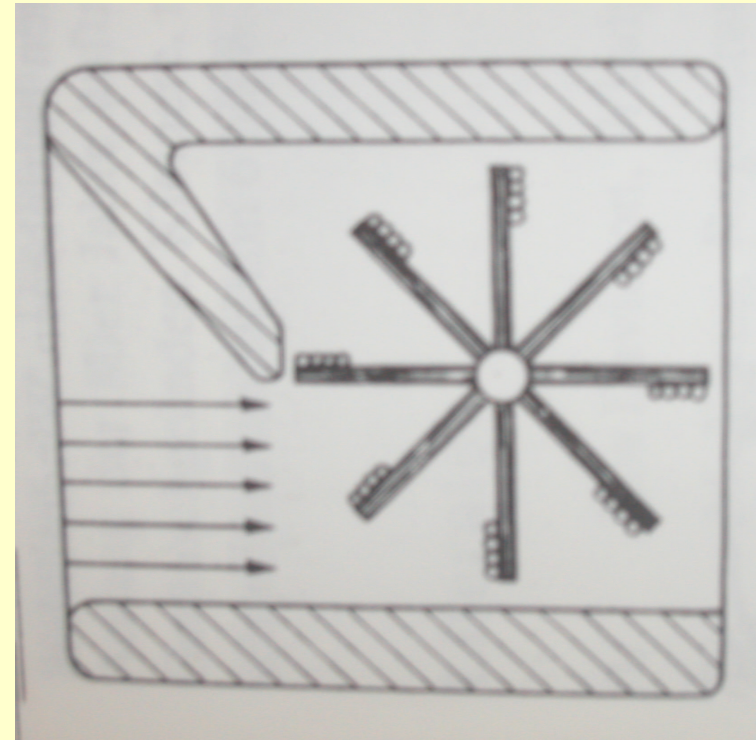
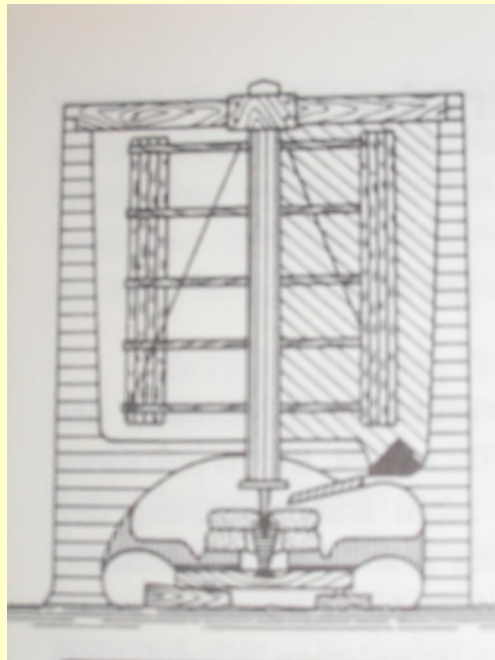
- Wegklappen der Matten
auf „Rückweg“



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Technische Geschichte

Persische Windmühle



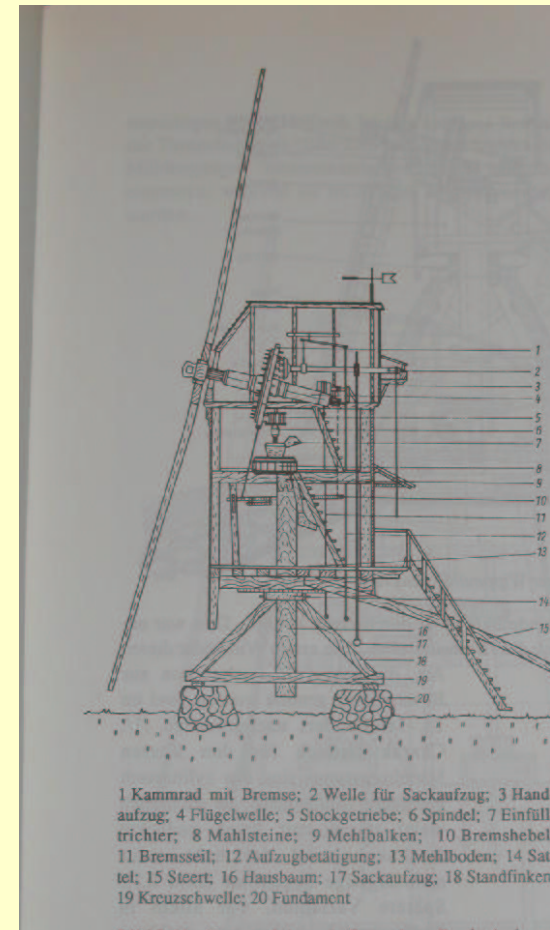
Abschattung einer Rotorhälfte

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Technische Geschichte

Abendland

- Horizontale Achsen
- Antriebsprinzip: Auftrieb von umströmten Flügelprofilen
- Theoretische Beschreibung erst Anfang des 20. Jh.
- Bockwindmühle: Mühlenhaus drehbar gelagert, kann in Wind gedreht werden



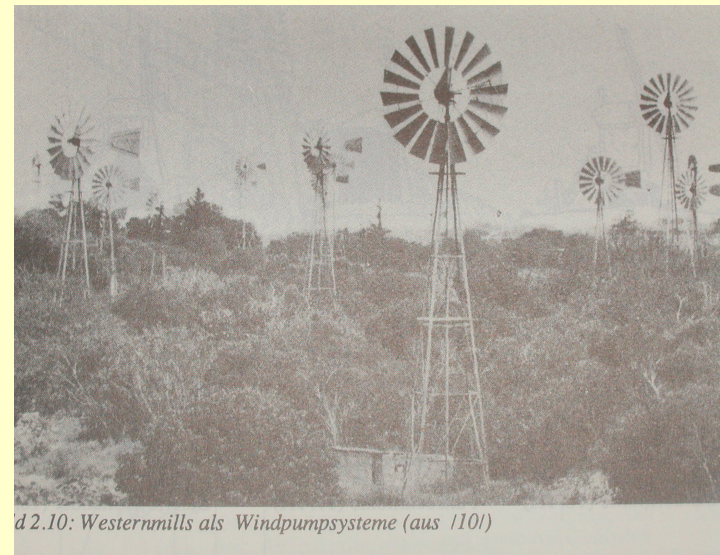
Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Technische Geschichte



Westernmills

- § Mitte des 19.Jh. entwickelt
- § Flügelrosette Ø 3-5m
- § Kolbenpumpe zur Wasserförderung
- § heute noch Zehntausende in Australien, Argentinien und USA



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Technische Geschichte

- Grundprinzipien unverändert
- „nur noch“ technische Weiterentwicklung:
 - o Windnachführung
 - o Leistungsanpassung
 - o Wirkungsgraderhöhung
 - o Serienfertigung (Westernmills als erste)
 - o Minimierung von Betreuung und Wartungsaufwand

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Physik - Windleistung

Leistung = Energie pro Zeiteinheit

$$P = dE/dt$$

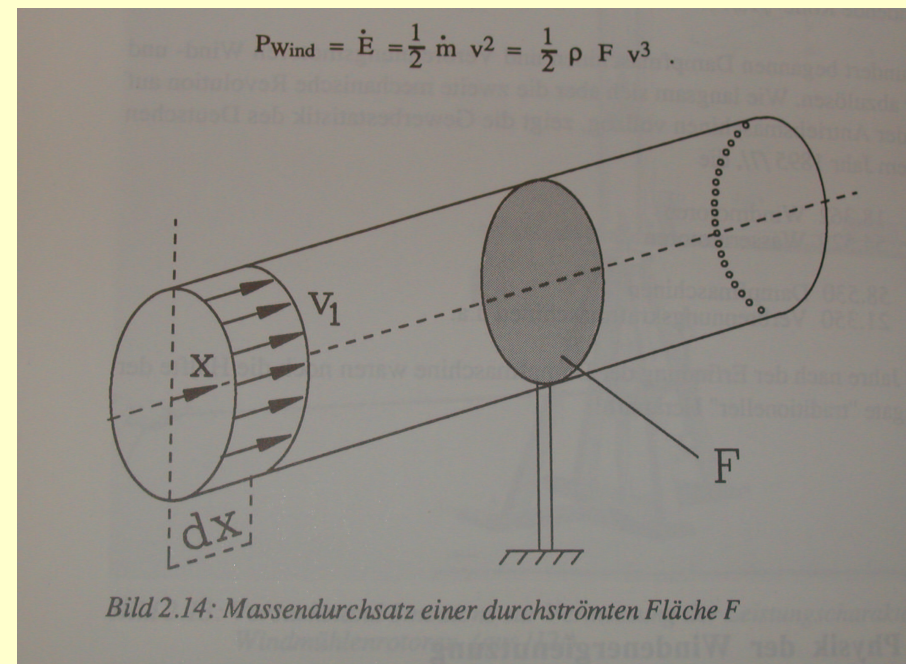
Kinetische Energie der Luftmasse

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

Luftmasse durchströmt Fläche F

$$dm/dt = d/dt (F \times \rho) = F \rho v$$

$$P = \frac{1}{2} dm/dt v^2 = \frac{1}{2} F \rho v^3$$



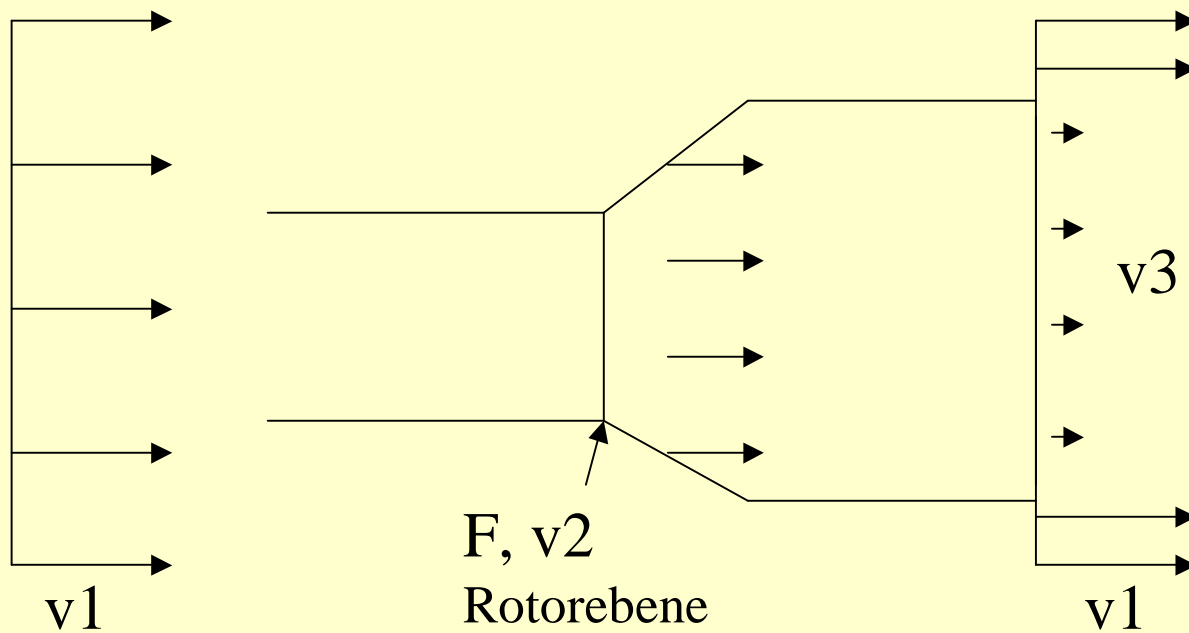
Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Physik - Leistungsentnahme

- Kinetische Energie der Luftmassen wird durch Abbremsen in mechanische Energie des Rotors umgewandelt
- 100% nicht möglich, da sonst Abbremsung auf 0, d.h. Querschnittsfläche für nachfolgende Luftmassen „verstopft“
- Optimum für Ausnutzung durch Abbremsen:

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Physik - Leistungsentnahme



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Physik - Leistungsentnahme

Entzogene kinetische Energie: $E = \frac{1}{2} m (v_1^2 - v_3^2)$

Entnommene Leistung: $\dot{E} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} (v_1^2 - v_3^2)$
($\frac{dm}{dt} = \rho F v_2$)

$v_3 = 0$ à „Verstopfung“

$v_3 = v_1$ à keine Windentnahme

Froude-Rankinsches Theorem: optimale Leistungsentnahme bei
 $v_2 = \frac{1}{2} (v_1 + v_3)$

$$\dot{E} = \frac{1}{4} \rho F (v_1 + v_3) (v_1^2 - v_3^2) = \frac{1}{2} \rho F v_1^3 \cdot c_p$$

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Physik - Leistungsentnahme

Entnommene Leistung = Windleistung • Leistungsbeiwert

$$c_p = \frac{1}{2} (1 + v_3/v_1) [1 - (v_3/v_1)^2]$$

Maximum bei $v_3 = 1/3 v_1$

c_p maximal 0.59 à Fast 60 % der im Wind vorhandenen Leistung
ist durch ideale Windturbine nutzbar

Praxis:

Widerstandsläufer à $c_p < 0.2$

Auftriebsläufer à $c_p < 0.5$

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion

- Konstruktion und Auslegung abhängig von der Windverteilung am geplanten Standort und von Betriebsführungskonzept (Windpark, Inselbetrieb)
- Abmessungen
 - o der Windgeschwindigkeit (nimmt mit der Höhe zu) entsprechend
 - o Rotordurchmesser aus vorgegebener Nennleistung bestimmen

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Rotor

1. Orientierung der Rotorachse

- Horizontalläufer
 - Luv : Rotor in Windrichtung vor dem Turm
 - Lee: Rotor in Windrichtung hinter dem Turm (passive Windnachführung möglich)
- Vertikalläufer

2. Rotordrehzahl

- Konstant – Vorteil bei der Netzeinspeisung
- Variabel – effizienter, aber höherer Aufwand für frequenzkonstante Netzeinspeisung

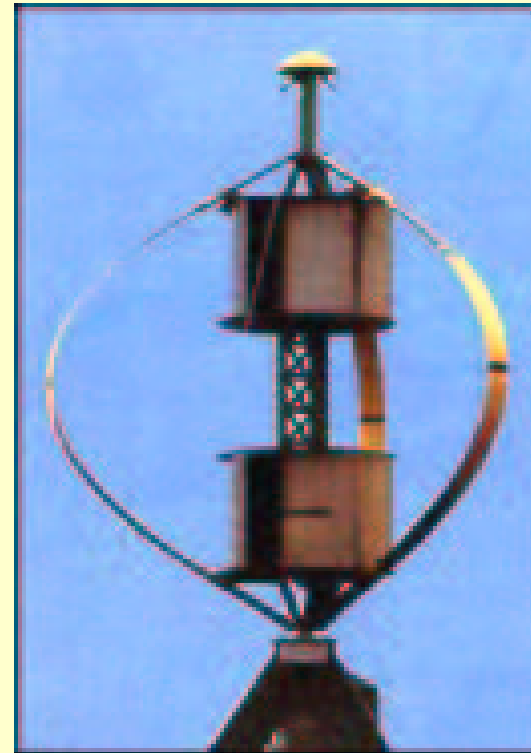
Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Vertikalläufer

Darrieusrotor



Savoniusrotor



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Vertikalläufer

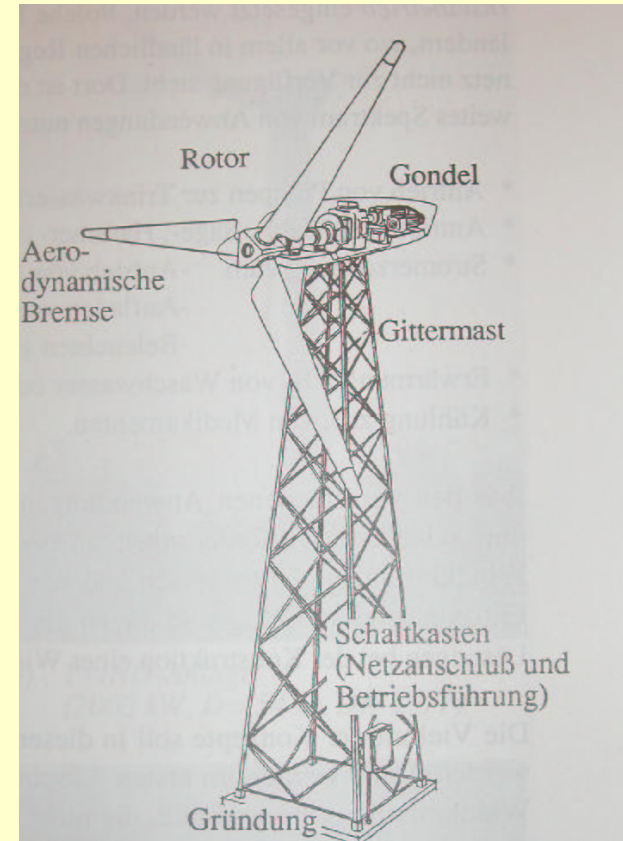
H-Rotor: Heidelberg Motor HM56

- speziell für Stromversorgung einer antarktischen Forschungsstation entwickelt
- sehr robuste Bauweise für extreme Windverhältnisse



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Horizontalläufer



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Rotor

Anzahl der Rotorblätter

- viele Rotorblätter bei langsam laufenden Anlagen (Westernmill 20 – 30)
- schnell laufende Rotoren:
 - 1 - aerodynamische Unwucht
 - 2 - periodisch variierendes Trägheitsmoment
 - 3 - gleichmäßige Massenverteilung
- aber: Rotorblätter teuer (ca. 20% der Gesamtkosten), da teure Kunststoffe (glas- oder kohlefaser verstärkt – GFK, CFK)

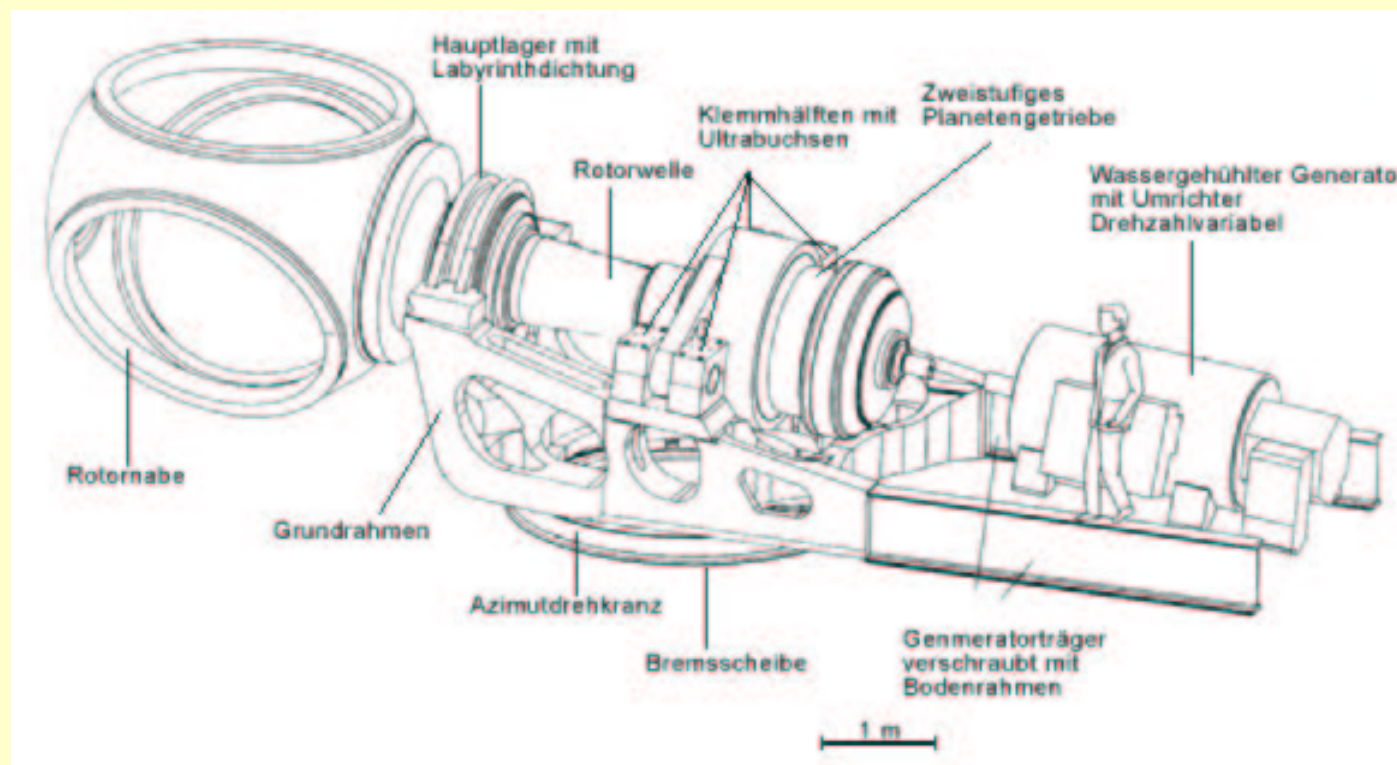
Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Rotor



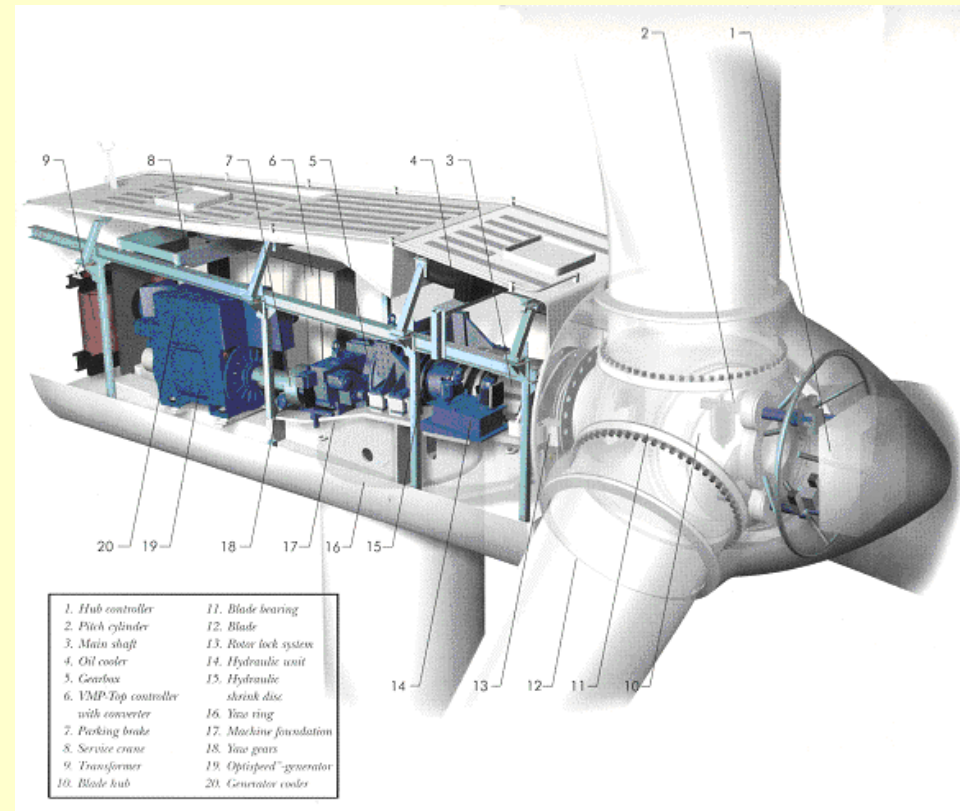
Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Gondel



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Gondel



- | | |
|--------------------------------------|---------------------------|
| 1. Hub controller | 11. Blade bearing |
| 2. Pitch cylinder | 12. Blade |
| 3. Main shaft | 13. Rotor lock system |
| 4. Oil cooler | 14. Hydraulic unit |
| 5. Gearbox | 15. Hydraulic shrink disc |
| 6. VMP-Top controller with converter | 16. Yaw ring |
| 7. Parking brake | 17. Machine foundation |
| 8. Service crane | 18. Yaw gears |
| 9. Transformer | 19. Optispeed-generator |
| 10. Blade hub | 20. Generator cooler |

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Gondel



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Gondel

Windnachführung

- passiv
 - * selbständig (Giermoment bei Lee-Läufern)
 - * Windfahne (Westernmills, Kleinanlagen)
- aktiv
 - * Antrieb für Gondeldrehung (kann durch Rosette erfolgen, dann ohne Fremdenergie)
 - * Giermotor (Bremsen lösen, Nachführbewegung, Bremsen feststellen)

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Konstruktion - Gondel

Leistungsbegrenzung und Sicherheitssystem

- Stalleffekt – Formung der Flügel so, dass Strömungsabriss bei hohen Windgeschwindigkeiten
 - o nur bei Rotoren mit konstanter Drehzahl
- Pitch – Drehen der Rotorblätter in den oder aus dem Wind durch Blattwinkelverstellung
- Abschaltung bei 20 – 25 m/s Windgeschwindigkeit
 - o Stillstand durch Abbremsen
 - o Trudeln im Leerlauf
- Zwei unabhängige Sicherheitssysteme, da bei Versagen Totalschaden

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

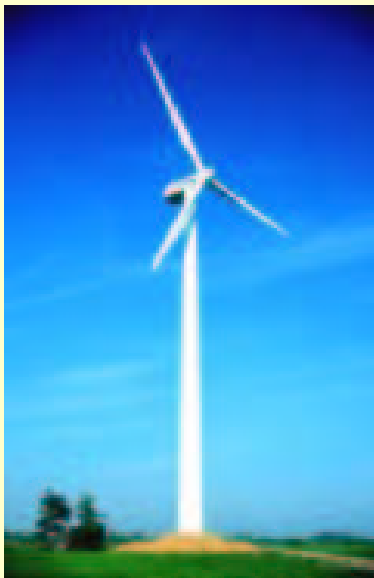
Konstruktion - Turm

- Auslegung
 - starr - Nennbetriebsfrequenz < 1 . Eigenfrequenz des Turmes
 - weich - Frequenz > 1 . Eigenfrequenz
 - spart Material bei großen Anlagen
 - kompliziert bei variabler Drehzahl – kontrolliertes Hochfahren
 - freitragend – hohe Nick- und Torsionssteifigkeit, aber auch hoher Materialeinsatz
 - abgespannt – leicht, geringe Kosten bei Transport und Montage, definierte Spannung der Seile notwendig, muss regelmäßig kontrolliert werden

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

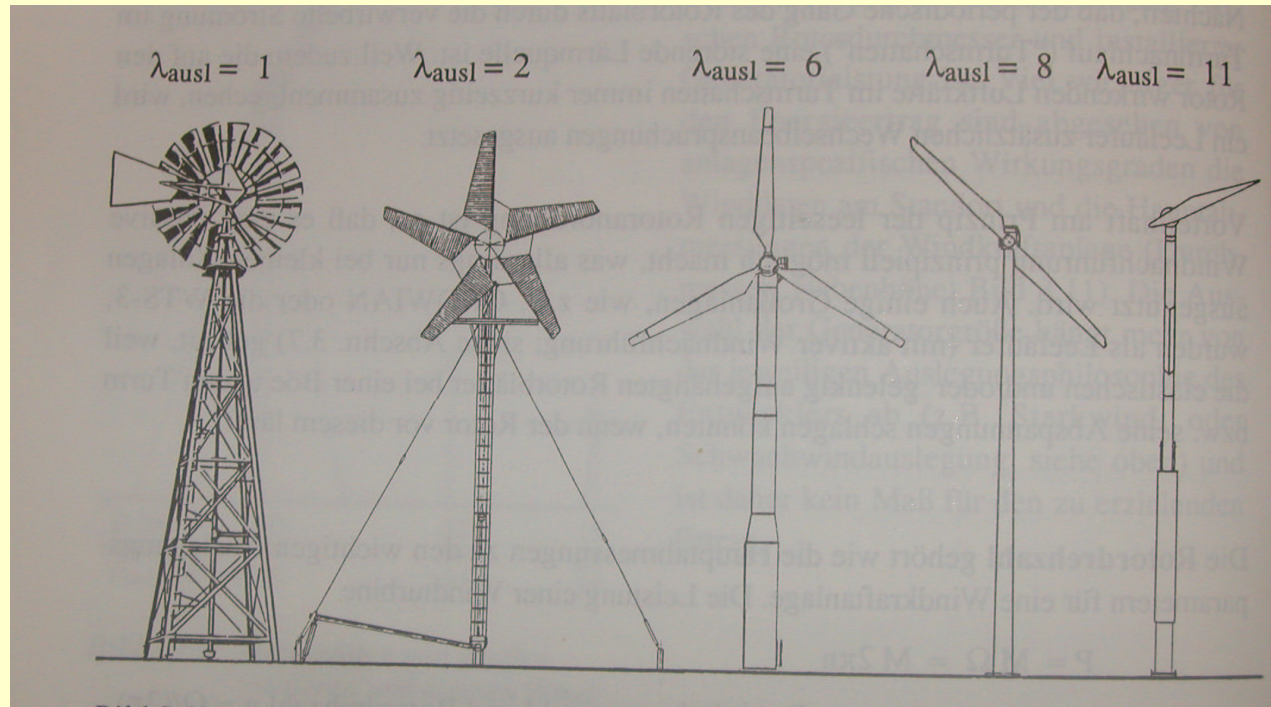
Konstruktion - Turm

Kosten: 15–20 % der Gesamtherstellungskosten, 90% der Transport- und Montagekosten



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

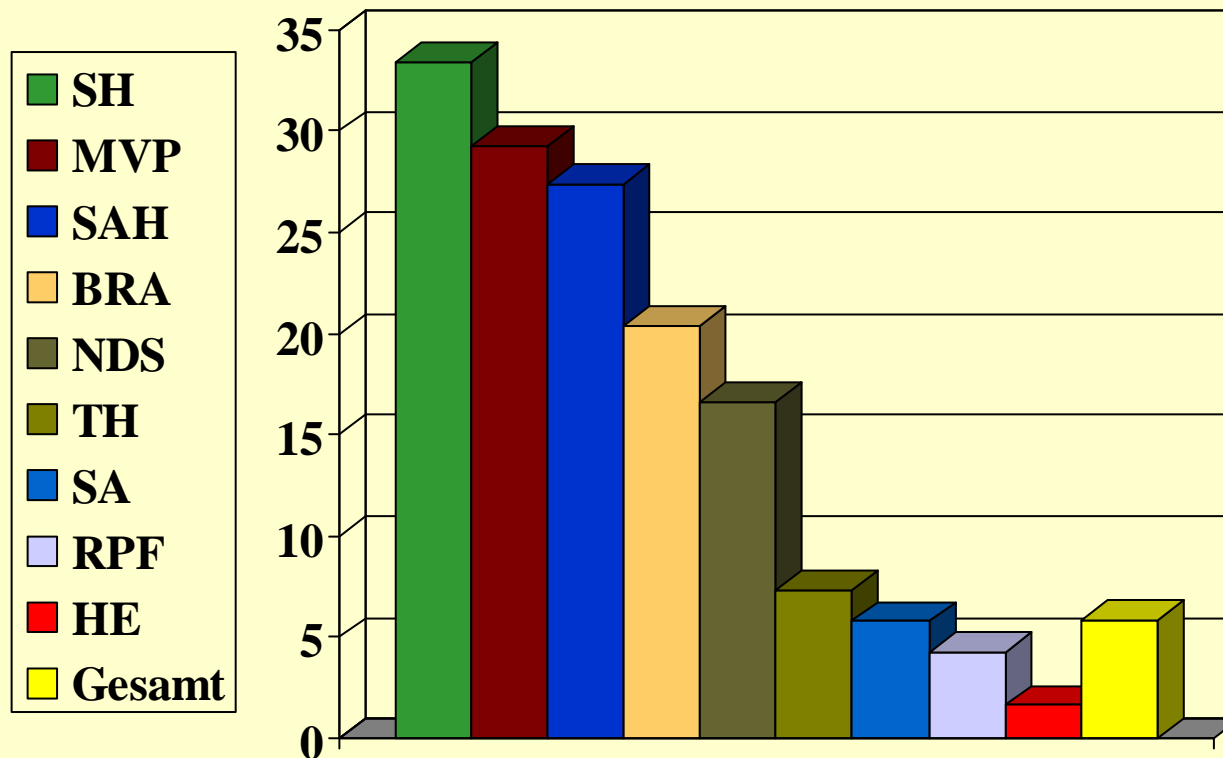
Konstruktion



Schnelllaufzahl $\lambda = u / \text{Windgeschwindigkeit}$, $u = \Omega * R$ (Drehzahl*Radius)

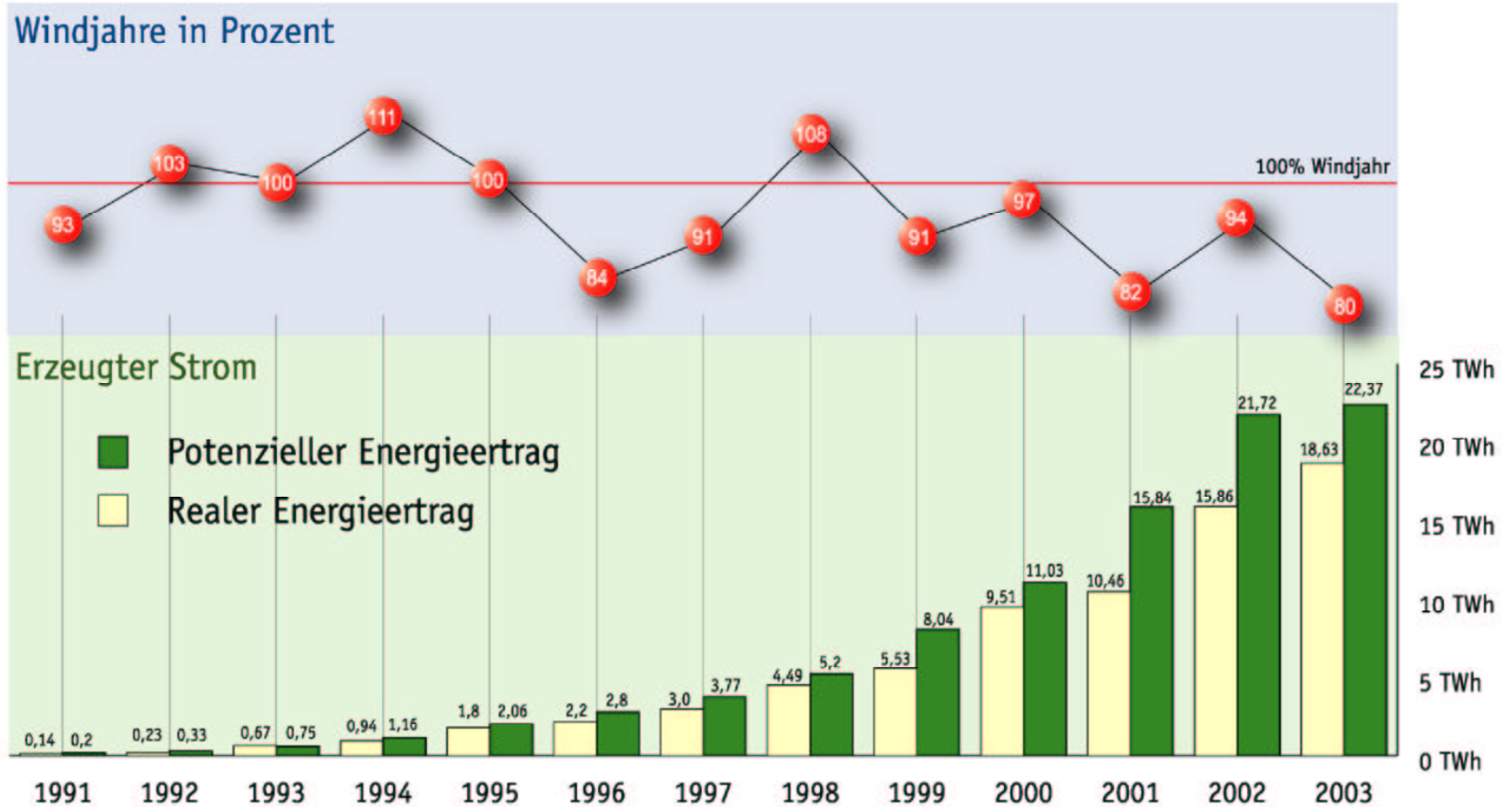
Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Statistik



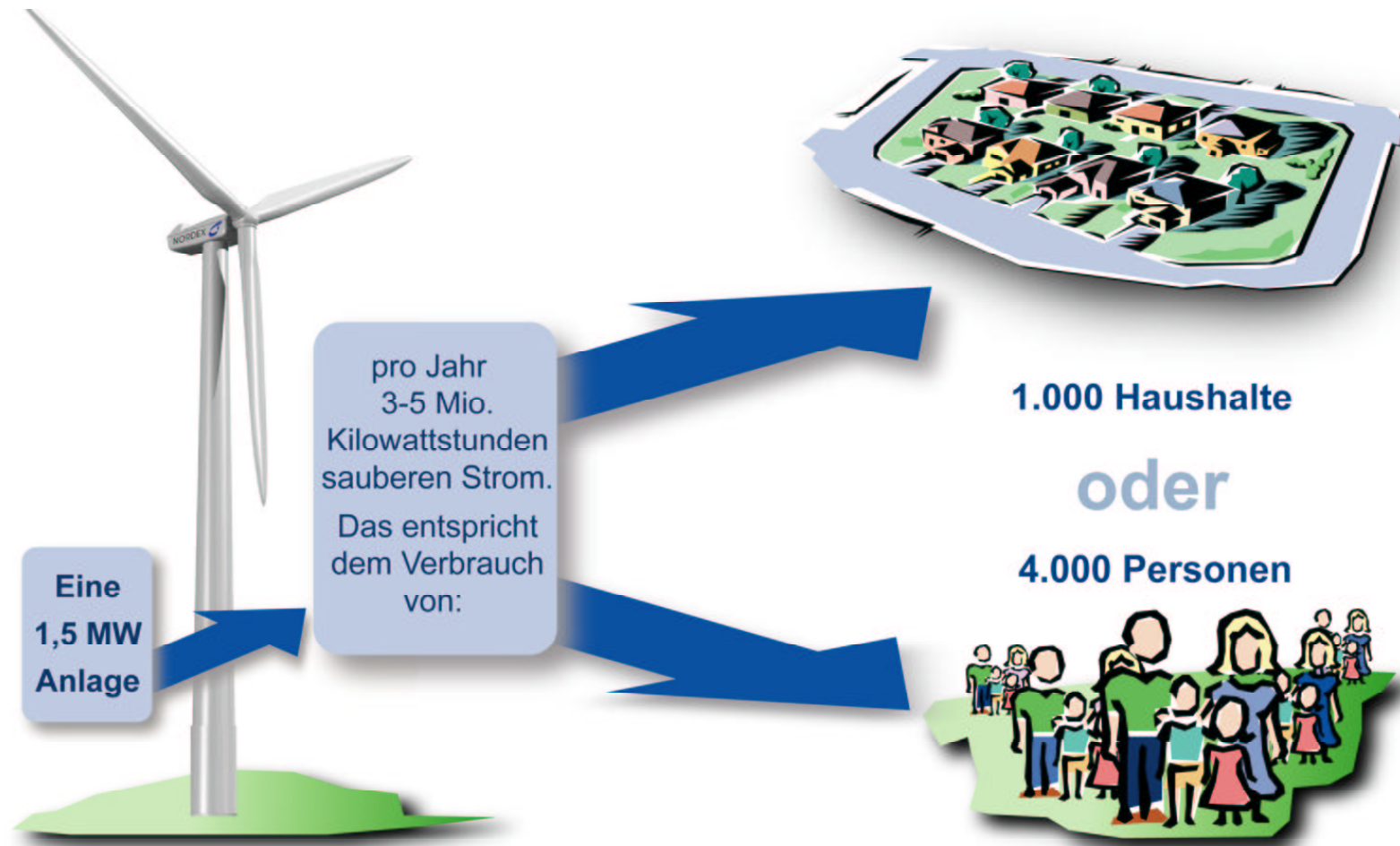
Anteil des potentiellen Jahresenergieertrags aus WEA am Nettostromverbrauch

Stromproduktion durch Windenergie



Quelle: ISET; Jahrbuch Erneuerbarer Energien 02/03

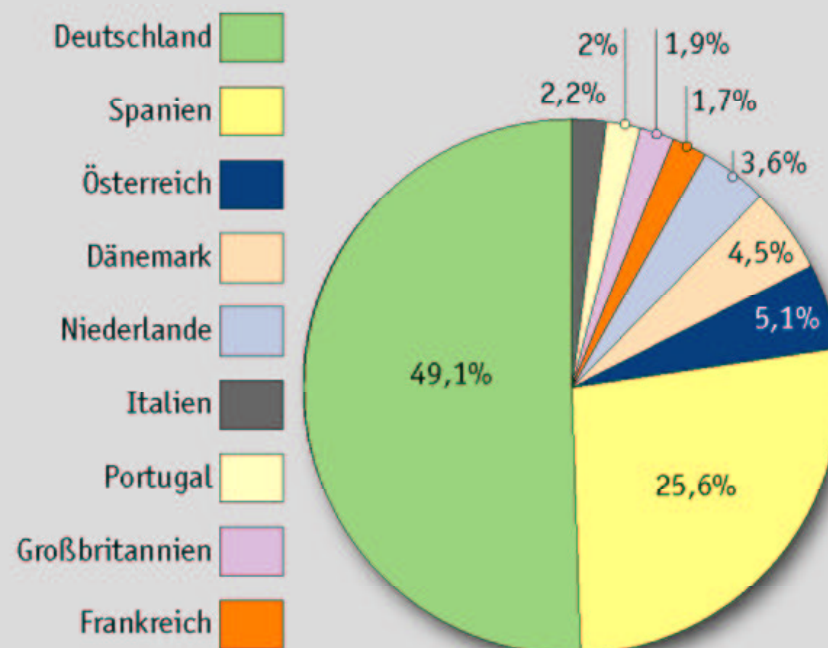
Leistung einer 1,5 MW Anlage



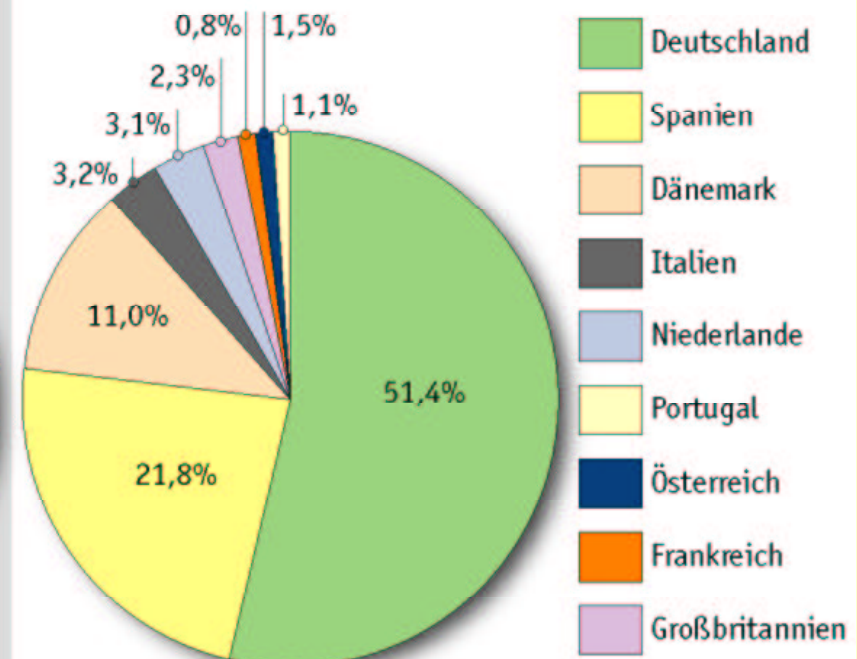
Europa: Die wichtigsten Märkte

Stand: 05.02.2004

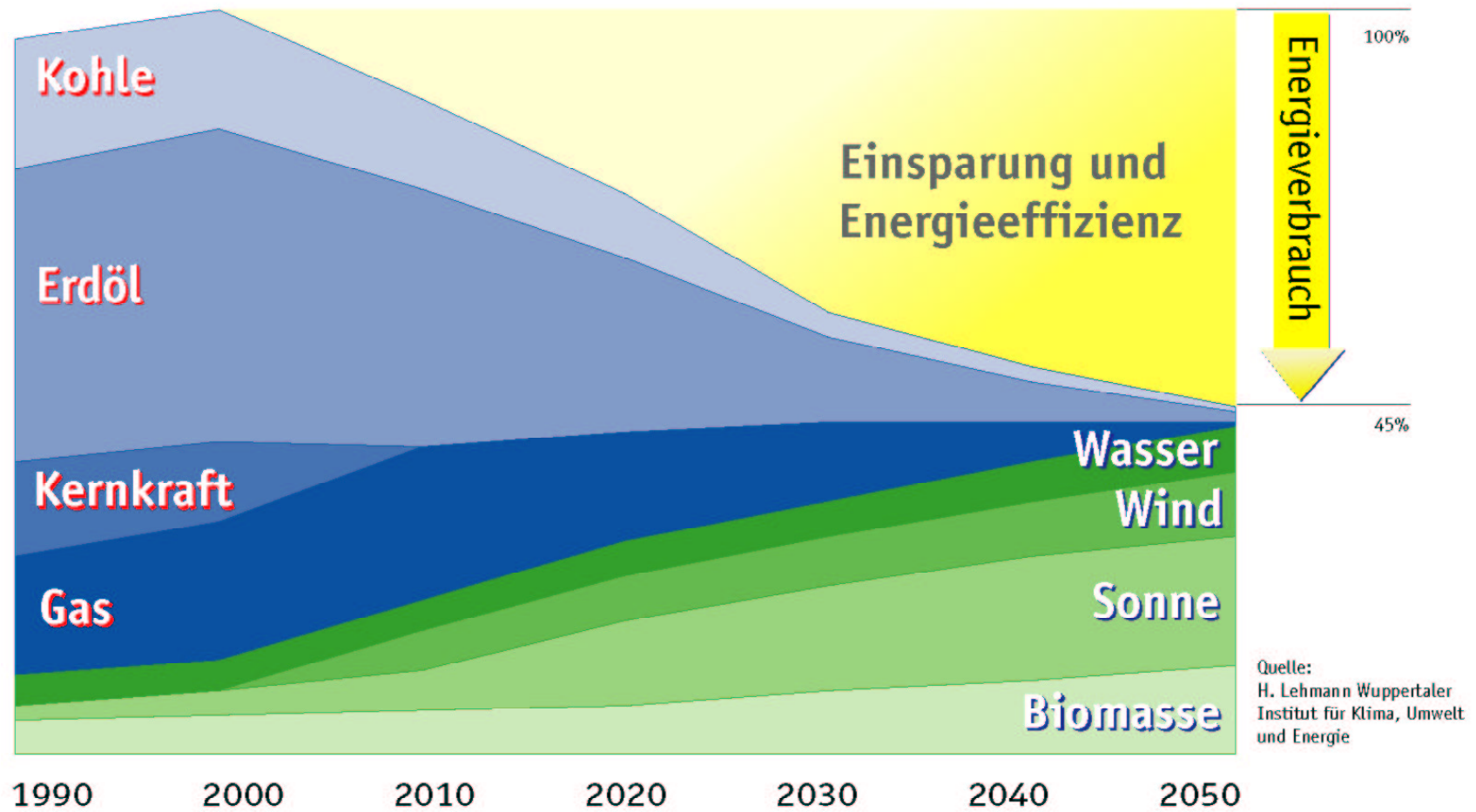
Anteil am Zubau installierter Leistung in Europa
in Prozent



Anteil an der gesamten installierten Leistung in Europa
in Prozent



Deckung des Primärenergieverbrauchs



Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Energiepolitik

Pro und Kontra zur Windenergie

- Energievorräte aus 500 000 Jahren erdgeschichtlicher Entwicklung innerhalb von wenigen hundert Jahren aufgebraucht

- erhebliche Folgen für Umwelt und Gesundheit

Alternative – erneuerbare Energien Wind, Wasser, Sonne

- Gegenargumente – Landschaftsbild gestört, Gefahren durch Umstürzen, Eiswurf, Lärmbelästigung, optische Irritationen, Störung der Tierwelt

Windenergie – Geschichte, Technik, Nutzung

Statistik

	Anzahl der WEA	Installierte Gesamtleistung in kW	Durchschnittl. installierte Leistung pro Anlage in kW/WEA
1990	300	~ 500	~160
2004	~16.500	~16.800	1.005