

# Windenergie – Entwicklungen, Erwartungen und energiewirtschaftliche Einordnung

**Prof. Dr.-Ing. Alfred Voß**

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER)  
Universität Stuttgart

[www.ier.uni-stuttgart.de](http://www.ier.uni-stuttgart.de)

**VDE / VDI – Arbeitskreis Gesellschaft und Technik**

**Stuttgart, 30. Juni 2003**

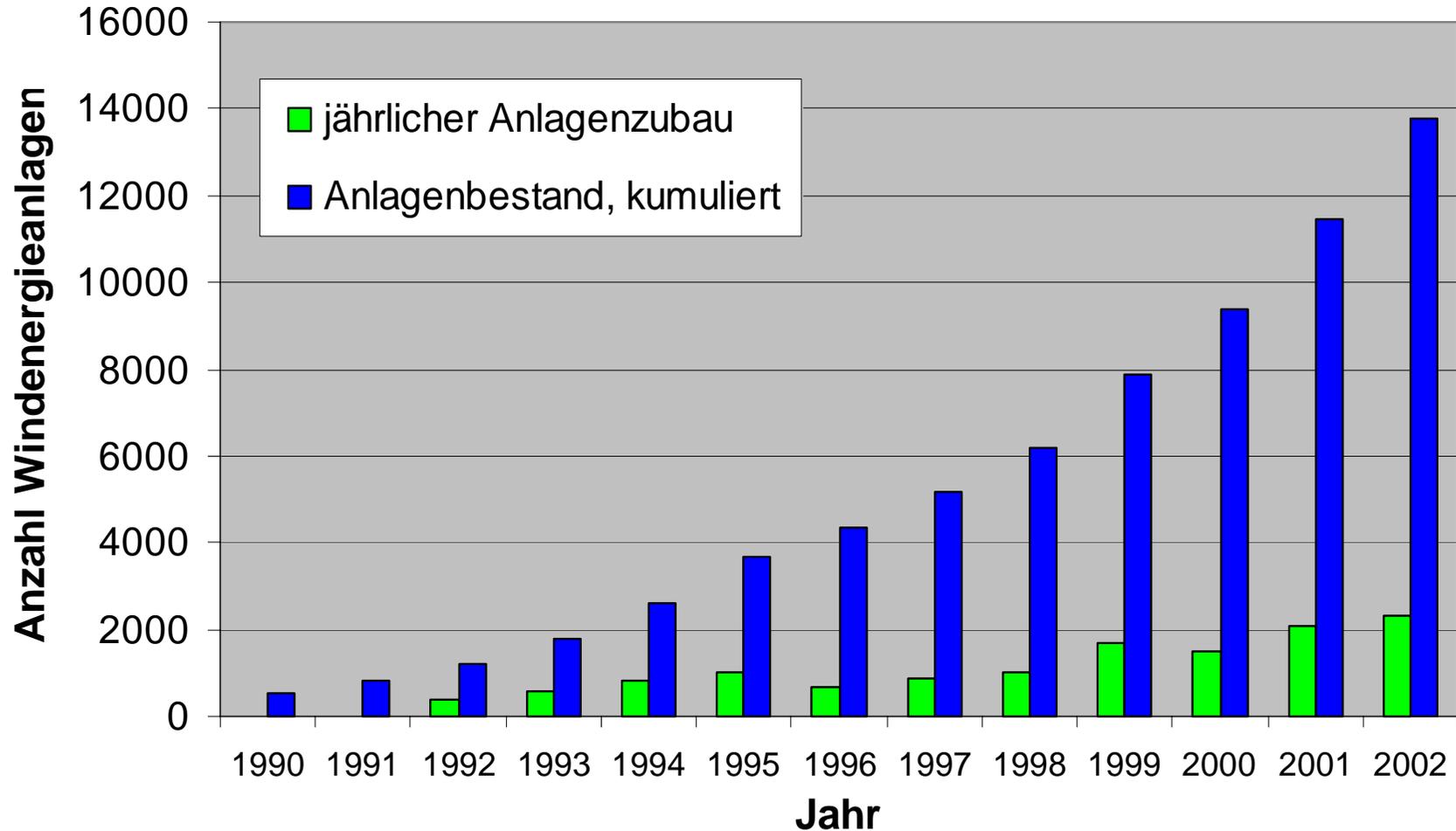
## Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland im Jahr 2001

	Primärenergie [PJ/a]	Elektrizität [GWh/a]
<b>Wasserkraft</b>	<b>85,8</b>	<b>23.830</b>
<b>Wind</b>	<b>41,4</b>	<b>11.500</b>
<b>Biomasse</b>	<b>226,0</b>	<b>2.000</b>
<b>Geothermie</b>	<b>3,7</b>	<b>--</b>
<b>Solare Strahlung</b>	<b>7,3</b>	<b>140</b>
<b>Gesamt</b>	<b>364,2 (2,5 %*)</b>	<b>37.470 (6,6 %**)</b>

\* Anteil am Primärenergieverbrauch

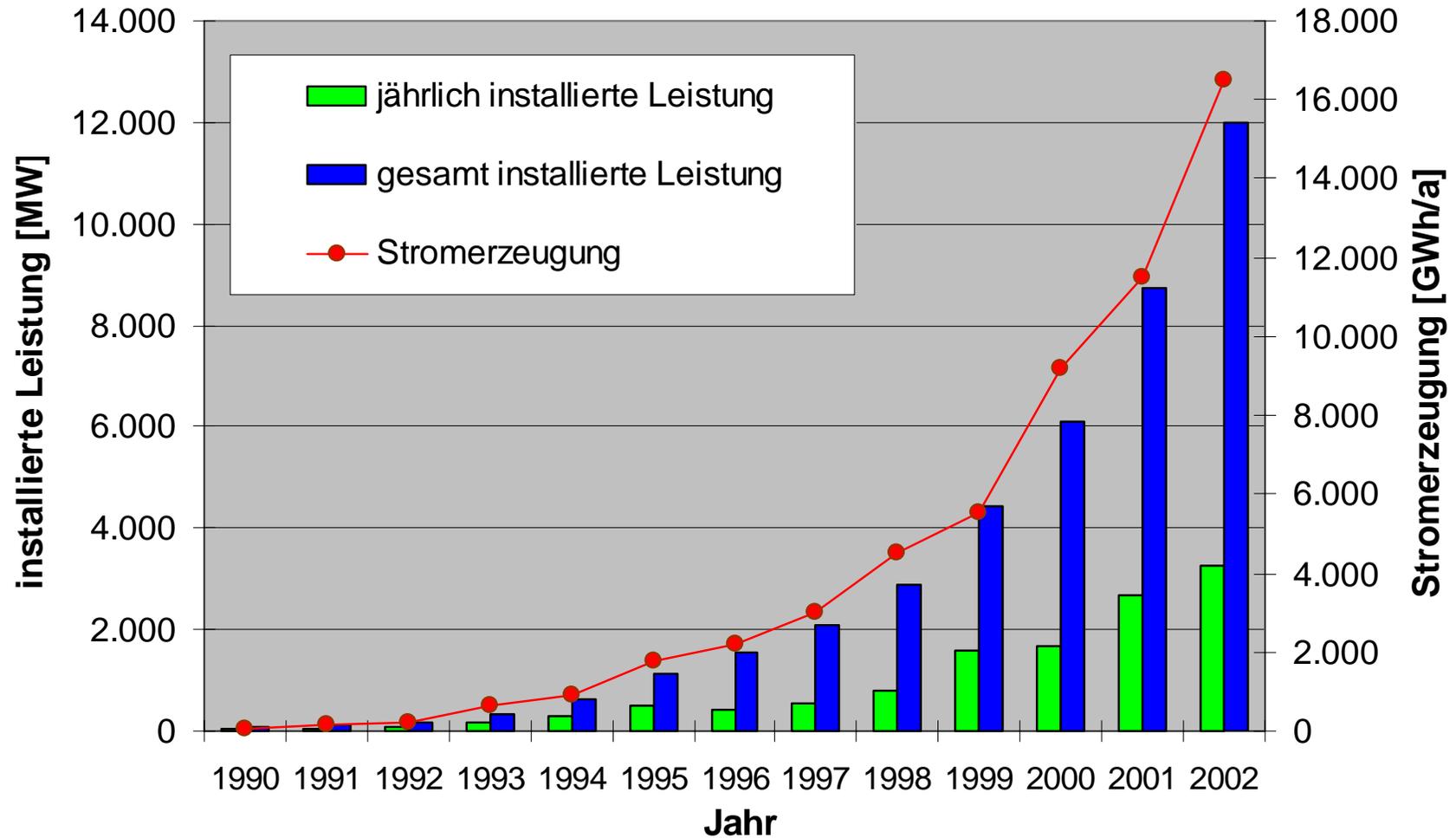
\*\* Anteil an der Stromerzeugung (2001: 570 TWh brutto)

## Entwicklung des Bestands von Windenergieanlagen in Deutschland



Quelle: Bundesverband WindEnergie e.V.

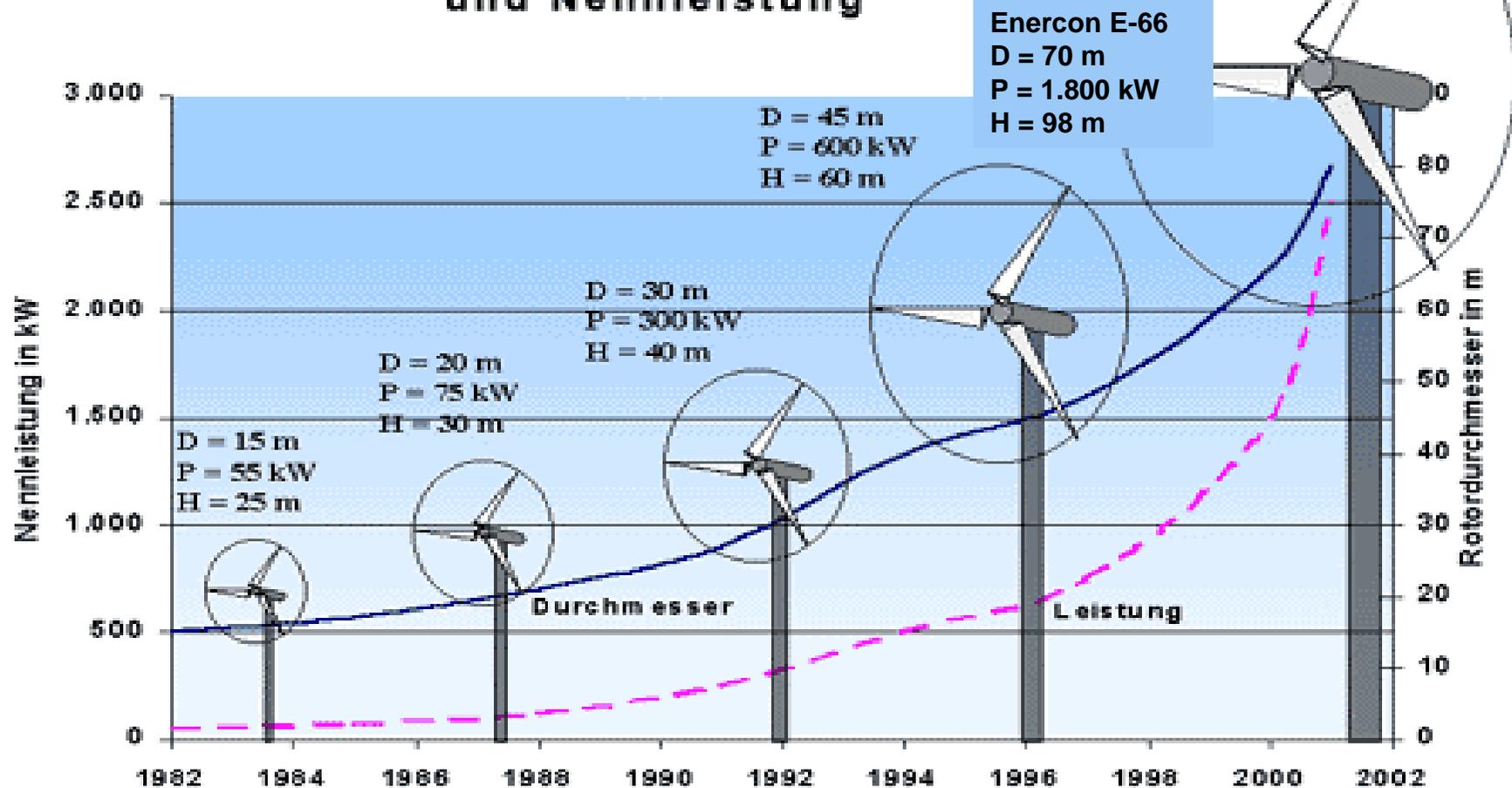
## Entwicklung der Windkraftnutzung in Deutschland



Quelle: Bundesverband WindEnergie e.V.

## Größenentwicklung von Windenergieanlagen

### Entwicklung von Rotordurchmesser und Nennleistung



**2002: Pilotanlage 4,5 MW**

Quelle: Bundesverband WindEnergie e.V.



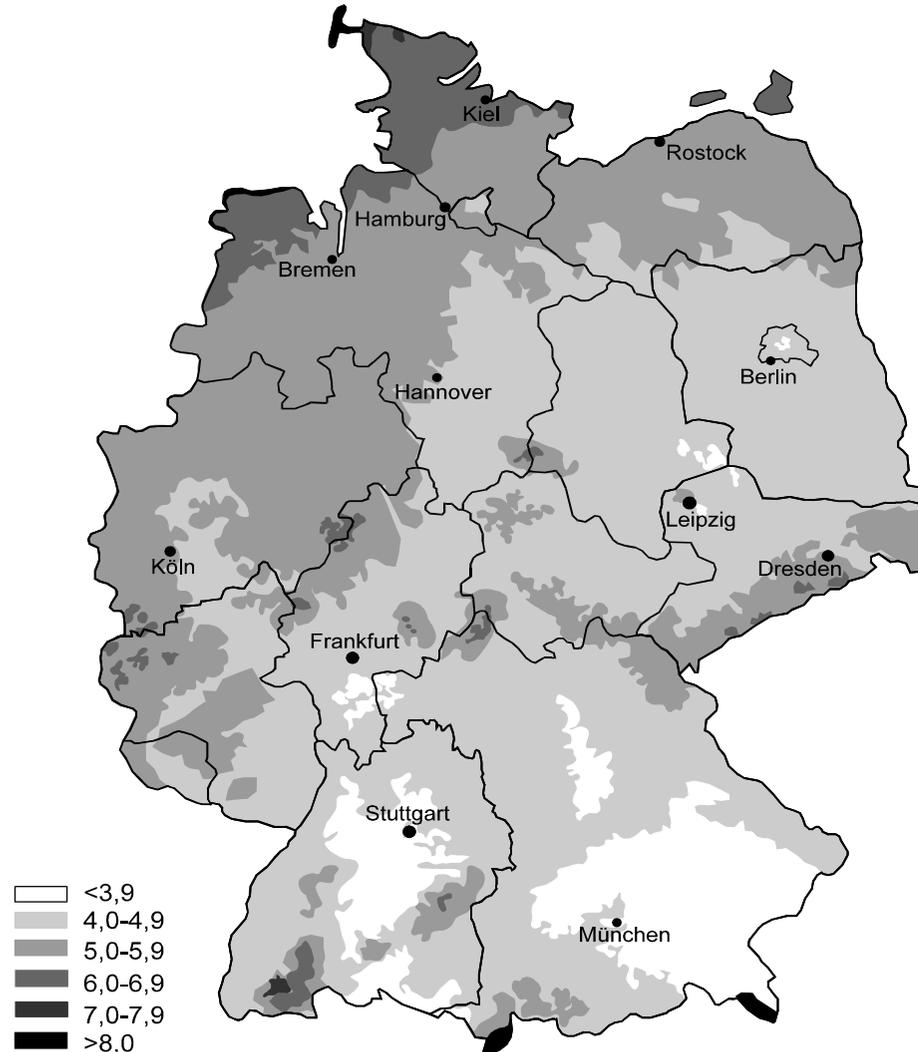




## Offshore WEK – Technische Besonderheiten

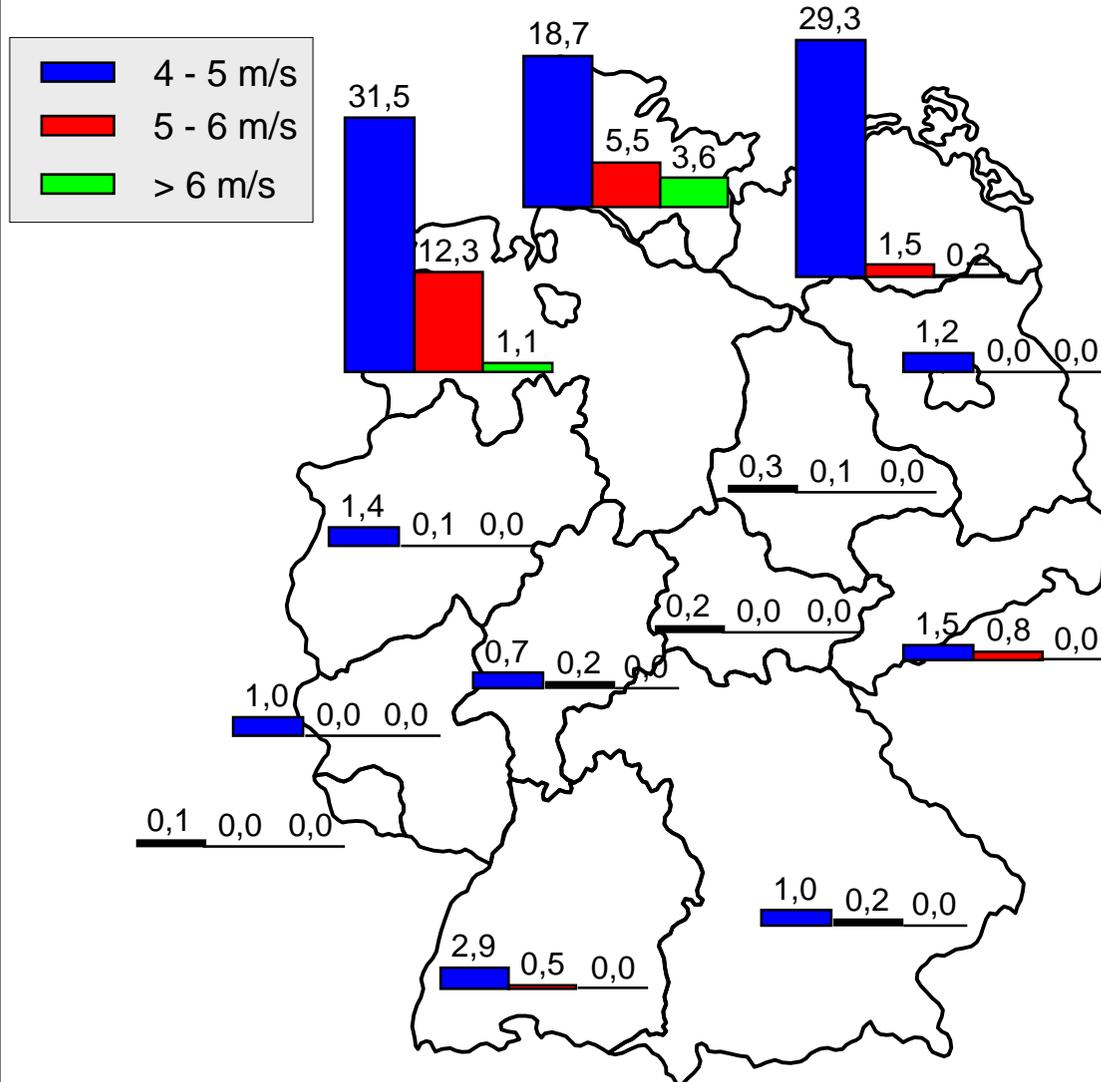
- große Leistungen
- Fundamentierung
- Netzanbindung
- Wartung und Instandhaltung

## Zonen ähnlicher Windgeschwindigkeit in Deutschland



Quelle: Kaltschmitt, Wiese 1993

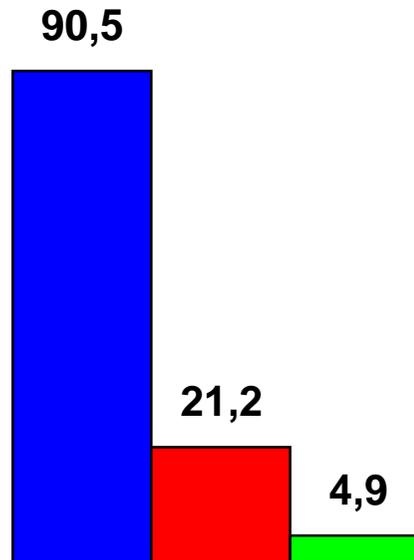
# Technische Potenziale der Windenergieerzeugung in Deutschland



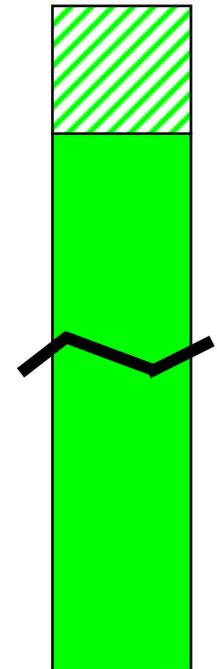
Angaben in TWh/a

Onshore  
Potenziale

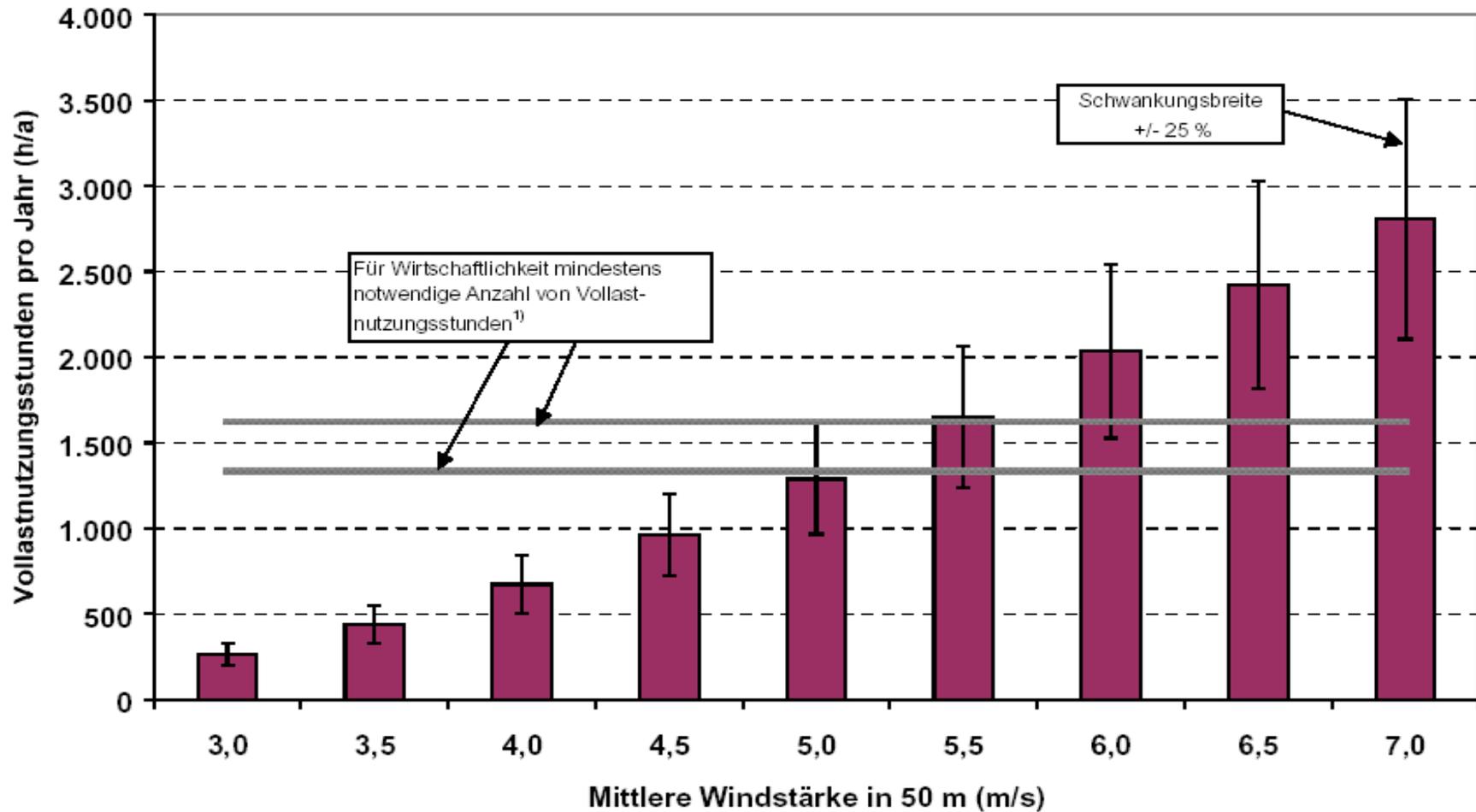
Offshore  
Potenziale



130 - 237



## Volllaststunden in Abhängigkeit der Windgeschwindigkeit



## Anforderungen und Charakteristika fallen auseinander

### Anforderungen an die Erzeugung

- flexibler Abruf nach Bedarf
- hohe Zuverlässigkeit
- steuerbare Einspeisung und Regelleistungsvorhaltung zum Abdecken kurzfristiger Nachfrageänderungen
- Erzeugung vorrangig in Verbrauchsschwerpunkten

### Charakteristika der Windenergie

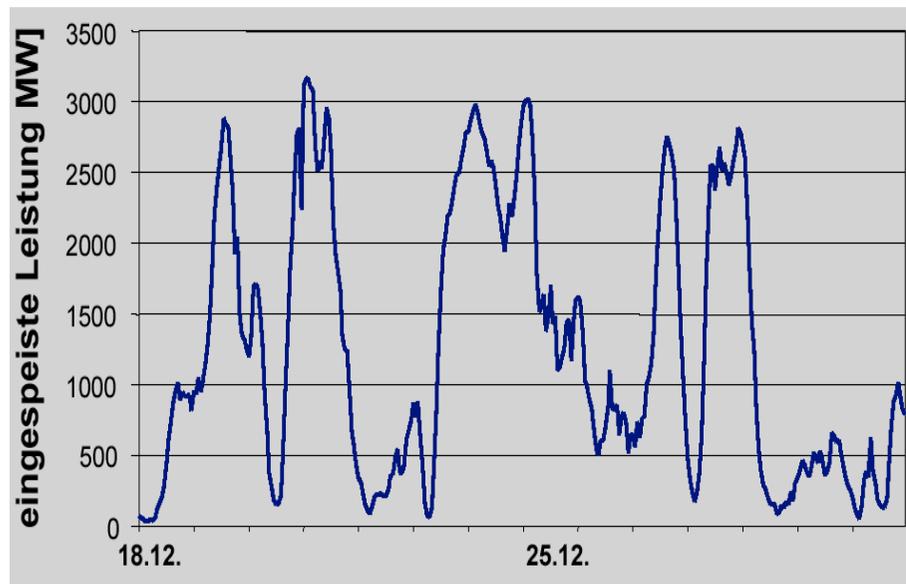
- Einspeisung entsprechend Windenergie ("must run")
- Erzeugung eingeschränkt verfügbar und nicht planbar
- kurzfristige Änderungen des Winddargebots erfordern schnellen Ausgleich
- Konzentration an Küstenstandorten und ggf. im Meer

## Windausbau und Netzausbau

- Windstromeinspeisungen werden in den Küstenregionen nur zum Teil verbraucht. Überschüsse müssen zu den Verbrauchsschwerpunkten transportiert werden
- Transportkapazitäten des bestehenden Netzes dafür nicht ausgelegt
- Mittel- bis langfristig erheblicher Netzausbau notwendig, insbesondere bei stärkerer Nutzung von Off-Shore Wind

## Charakteristik des Windenergieangebots

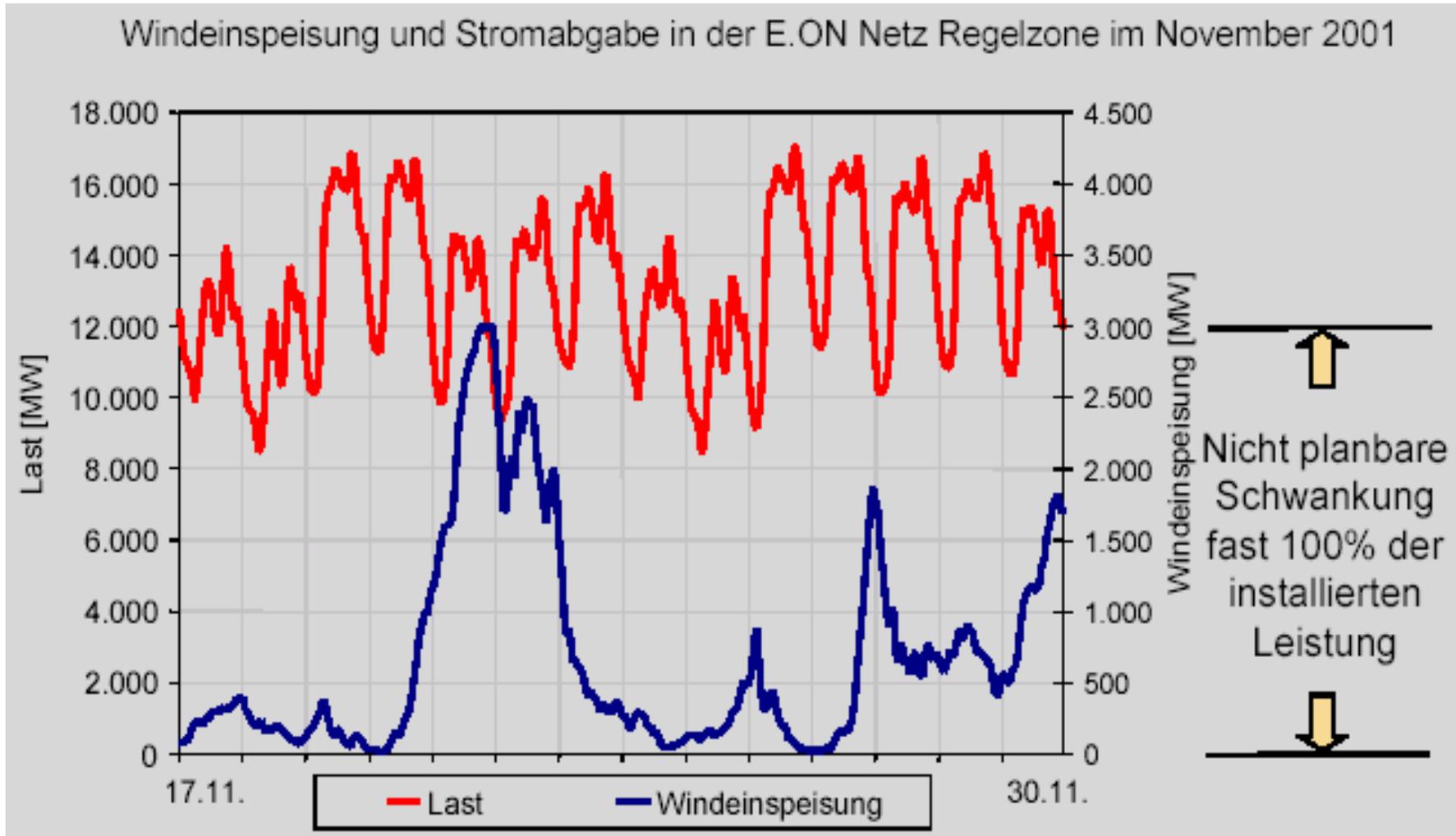
Windeinspeisung in das E.ON Netz  
Regelzone vom 18.12. bis 31.12.01



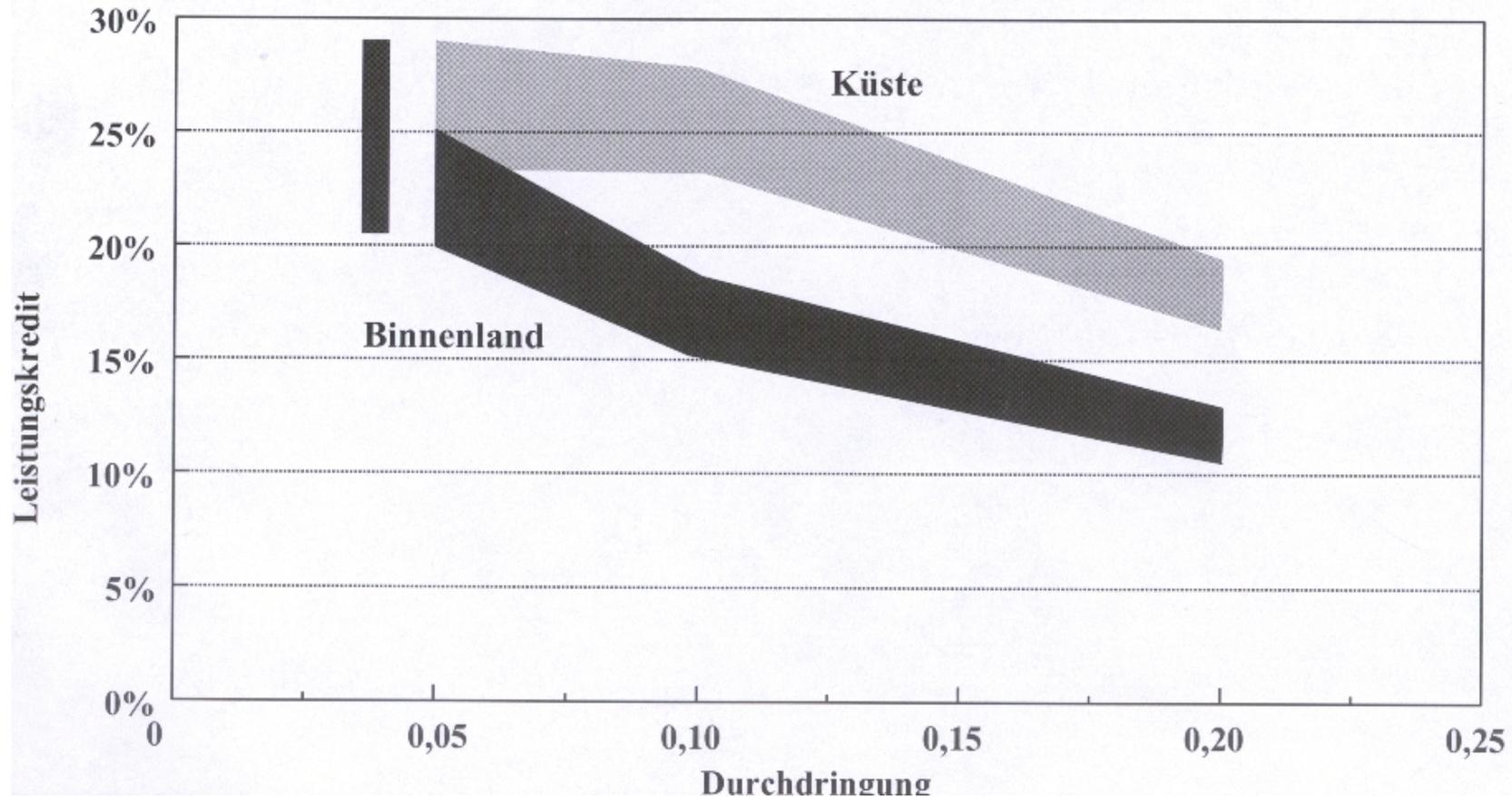
Ungesicherte Verfügbarkeit  
und fluktuierendes Angebot

- spart keine oder nur wenig konventionelle Kraftwerksleistung
- erhöht den Regelenergiebedarf
- vermehrte Leistungsregelung erhöht Brennstoffverbrauch

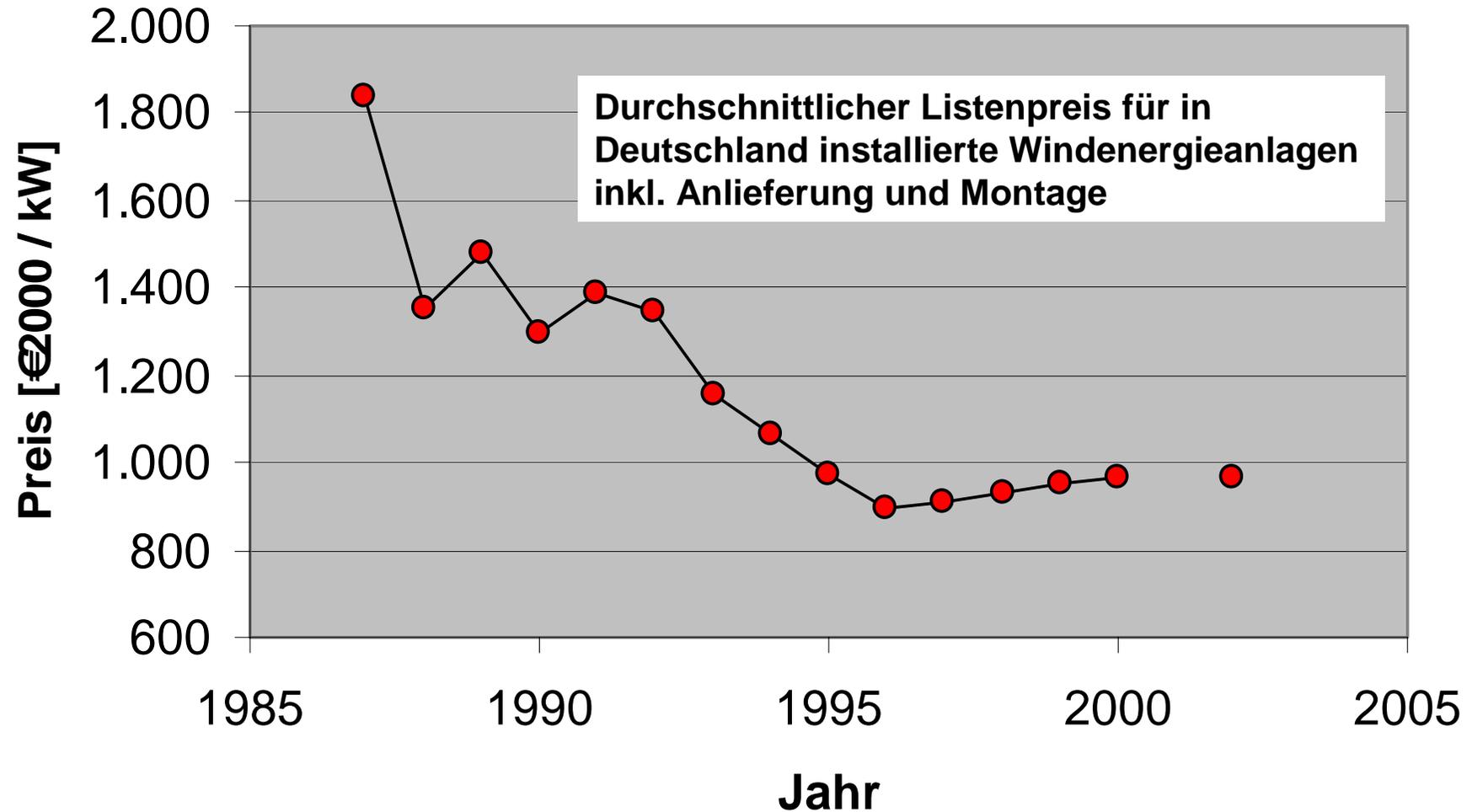
## Charakteristik des Windenergieangebots



## Leistungskredit der Windstromerzeugung bezogen auf die installierte Windanlagenleistung



## Entwicklung der Kosten von Windenergieanlagen



## Investitionskosten onshore / offshore - Windenergieanlagen

	<b>onshore</b>	<b>offshore</b>
Anlagekosten (inkl. Anlieferung, Montage)	800 – 1.100 €/kW	950 – 1.150 €/kW
Fundamentierung	3 – 9 % der Anlagekosten	35 – 38 % der Anlagekosten
Netzanschluss	5 - 30 % der Anlagekosten	36 – 67 % der Anlagekosten
Sonstiges (Planung, Erschließung,...)	5 – 8 % der Anlagekosten	7 – 24 % der Anlagekosten
<b>Gesamtinvestition</b>	<b>920 – 1.430 €/kW</b>	<b>1.700 – 2.000 €/kW</b>
Betriebskosten	3,5 - 5 % Anlagekost./a	5 - 7,5 % Anlagekost./a

## Kosten des Windstroms

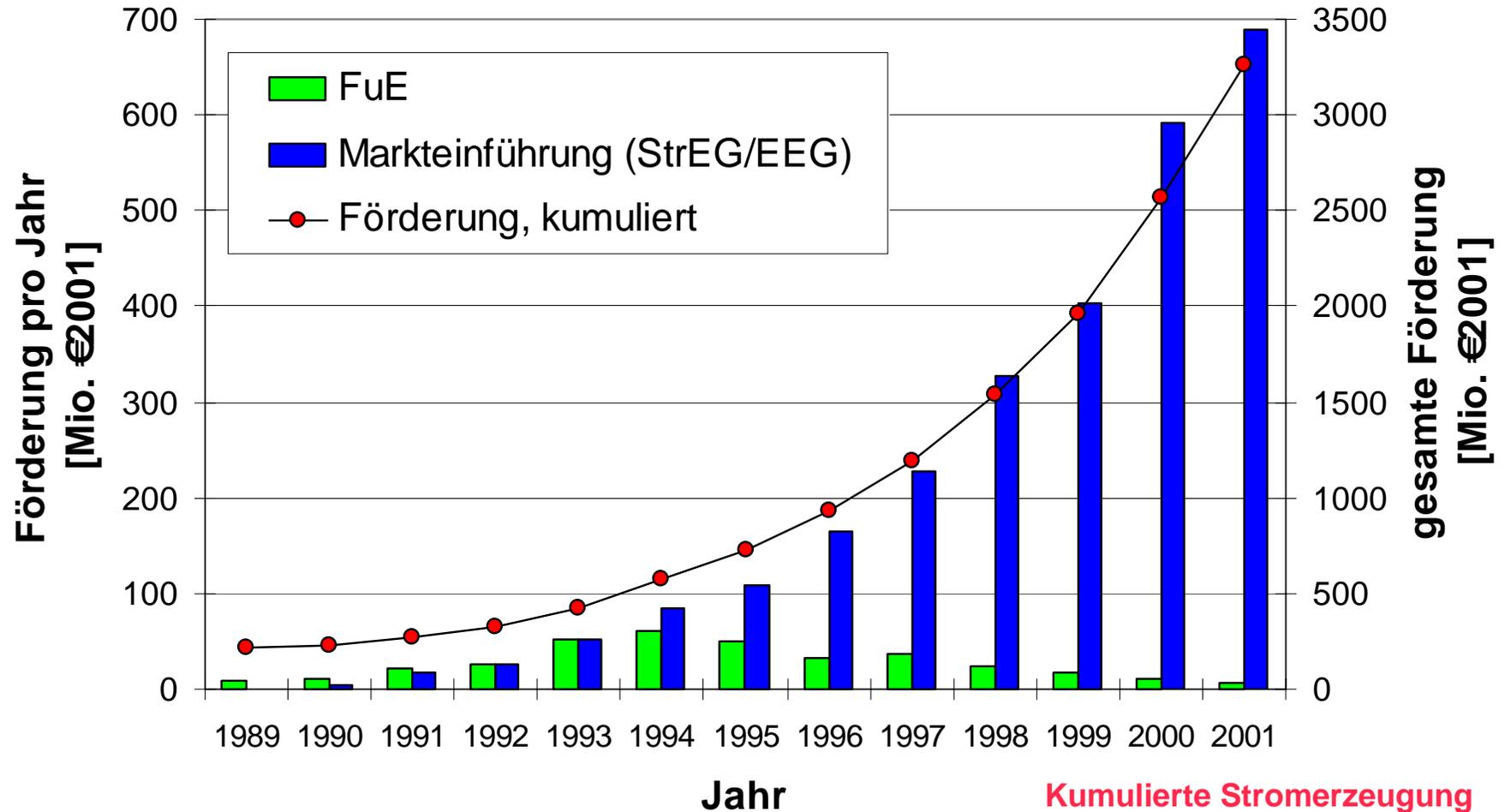
- Erzeugungskosten (je nach Standort, bei Zinssatz von 8%)	8 bis 13 ct / kWh
- Back-Up-Kosten für gesicherte Leistung	0,7 bis 1,8 ct / kWh
- Netzausbau und Netzverluste	ca. 0,2 ct / kWh
<hr/>	
Gesamtkosten	9 bis 15 ct / kWh
Kosten konventioneller Kraftwerke	2,5 bis 3 ct / kWh

## Windenergie und Arbeitsplätze

- Gesamtvergütung für Windstromeinspeisung 2001 nach EEG für 10.500 GWh: **952 Mio. Euro**
- Windfolgekosten: **2 ct / kWh**
- Unterstellter Marktwert des Windstroms: **2,5 ct / kWh**
- Arbeitsplätze in der deutschen Windbranche:  
direkt **4.700**; indirekt **30.000**

Subvention je Arbeitsplatz: **26.000 bis 190.000 EUR / a**

## Windenergie: Förderung



**Kumulierte Stromerzeugung  
 bis Ende 2001: rd. 40.000 GWh**

*„Eine einzelne Windkraftanlage kostet die Volkswirtschaft bei gutem Wind 500 Euro pro Tag, bei Flaute deutlich weniger, weil die Energieversorger und die Verbraucher weniger belastet werden. Das führt zu der eigenartigen Erkenntnis, dass der volkswirtschaftlich wirtschaftlichste Betriebszustand von Windkraftanlagen der Stillstand ist.“*

*(Dr. Runge, Leserbrief in der FAZ)*

## Windenergie und Klimaschutz

	<b>CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten</b> [EUR / t CO <sub>2</sub> ] *)
<b>Wind</b>	<b>85 - 170</b>
<b>Photovoltaik</b>	<b>1.200</b>
<b>Erdgas</b>	<b>~ 0</b>
<b>Kernenergie</b>	<b>~ 0</b>

\*) gegenüber Steinkohlekraftwerk

## Nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development)

### Brundtland Kommission:

„Nachhaltige Entwicklung“ ist eine „Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“.

### Ziel

Die Verbesserung der ökonomischen und sozialen Lebensbedingungen aller Menschen, der heute und zukünftig lebenden, mit der langfristigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlage in Einklang zu bringen.

## ➤ **Nachhaltige Entwicklung - Konkretisierung des Leitbildes für den Energiebereich**

- Naturwissenschaftliche Grundlagen -  
Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik
- Nachhaltige Energieversorgung und die Nutzung erschöpfbarer Energievorräte
- Energie und die Senkenfunktion der Umwelt
- Nachhaltige Entwicklung und das allgemeine ökonomische Prinzip

## Orientierungs- und Handlungsregeln

1. Die Nutzung erneuerbarer Ressourcen darf auf Dauer nicht größer sein als ihre Regenerationsrate.
2. Nicht-erneuerbare Energieträger und Rohstoffe sollen nur in dem Umfang genutzt werden, in dem ein physisch und funktionell gleichwertiger wirtschaftlich nutzbarer Ersatz verfügbar gemacht wird, in Form neu erschlossener Vorräte, erneuerbarer Ressourcen oder einer höheren Produktivität der Ressourcen.
3. Stoffeinträge in die Umwelt dürfen auf Dauer die Aufnahmekapazität bzw. Assimilationsfähigkeit der natürlichen Umwelt nicht überschreiten.
4. Die Gefahren und Risiken der Bereitstellung von Energiedienstleistungen für die menschliche Gesundheit müssen kleiner sein als die durch sie vermiedenen natürlichen Risiken.
5. Die Bereitstellung von Energiedienstleistungen soll zu möglichst geringen gesamtwirtschaftlichen Kosten (private plus externe Kosten) erfolgen.

## Referenzanlagen zur Stromerzeugung

Verwendete Bezeichnung	Technik	Anlagennennleistung (netto)	Nutzungsgrad	Lebensdauer
<b>Steinkohle</b> (43 %)	Staubfeuerung	600 MW	43,0 %	35 a
<b>Braunkohle</b> (40 %)	Staubfeuerung	800 MW	40,1 %	35 a
<b>Erdgas GuD</b> (57,6 %)	GuD	777,5 MW	57,6 %	35 a
<b>Nuklear</b> (DWR)	DWR	1375 MW	34 %	40 a
<b>PV</b> (poly) (amorph)	polykristallin	5 kW	9,5 % <sup>1)</sup>	25 a
	amorph	5 kW	4,5 % <sup>1)</sup>	25 a
<b>Wind</b> (4,5 / 5,5 m/s) <sup>2)</sup>	Horizontalachsenkonverter	1 MW	—	20 a
<b>Wasser</b> (3,1 MW)	Laufwasserkraft	3,1 MW	90 %	60 a

<sup>1)</sup> Systemwirkungsgrad inkl. Wechselrichterwirkungsgrad  
<sup>2)</sup> jahresmittlere Windgeschwindigkeit

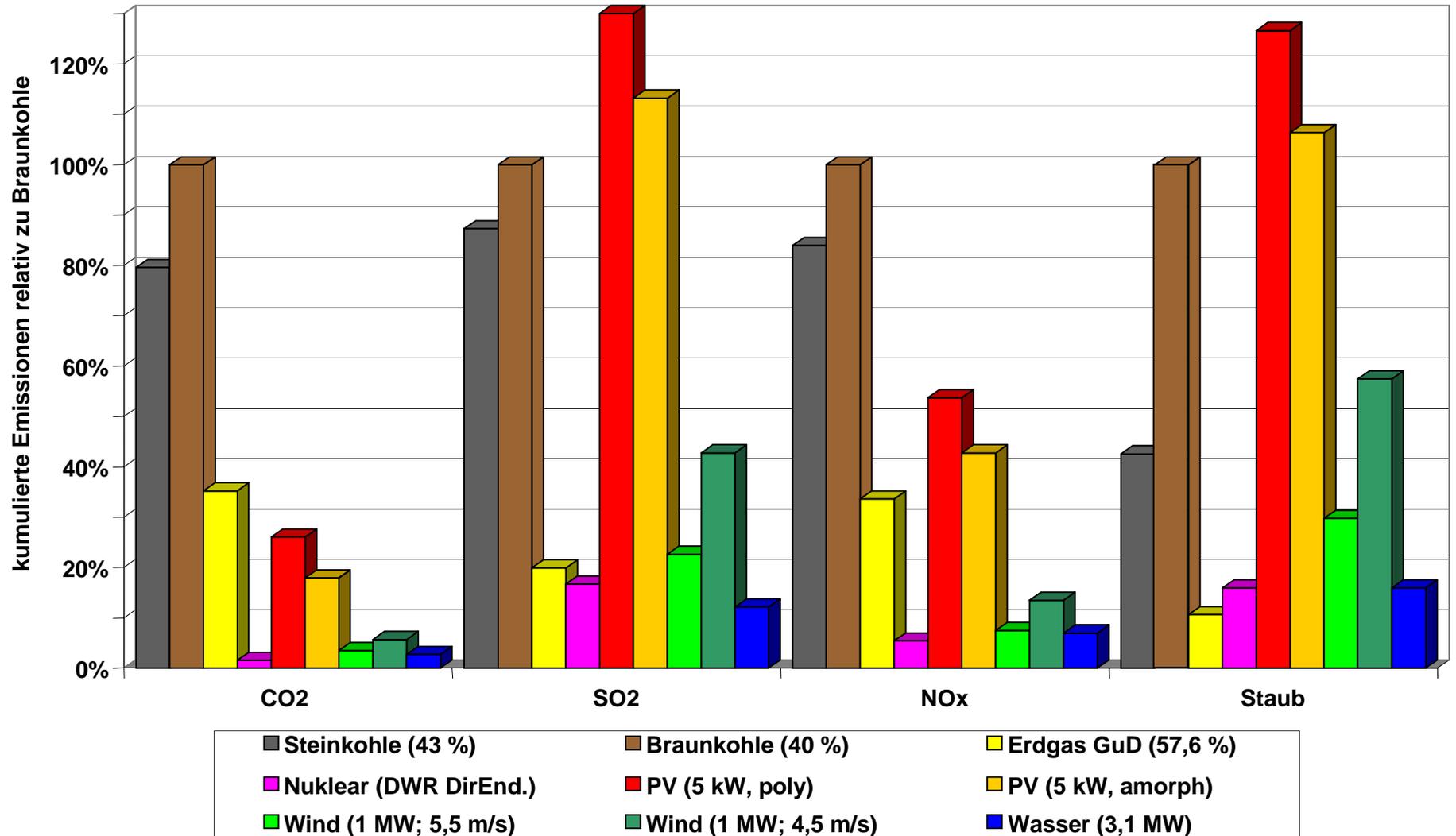
## Kumulierter Energieaufwand (KEA) und energetische Amortisationszeit (EAZ)

		<b>KEA</b> (ohne Brennstoff) [kWh <sub>Prim</sub> / kWh <sub>el</sub> ]	<b>EAZ</b> [Monate]
<b>Steinkohle</b>	(43 %)	0,29	3,6
<b>Braunkohle</b>	(40 %)	0,17	2,7
<b>Erdgas GuD</b>	(57,6 %)	0,17	0,8
<b>Nuklear</b> (DWR, DirEnd.)		0,07	2,9
<b>PV</b>	amorph	0,62	71
(5 kW)	poly	0,94	107
<b>Wind</b>	5,5 m/s	0,08	7,3
(1 MW)	4,5 m/s	0,18	16,4
<b>Wasser</b>	(3,1 MW)	0,05	13,7

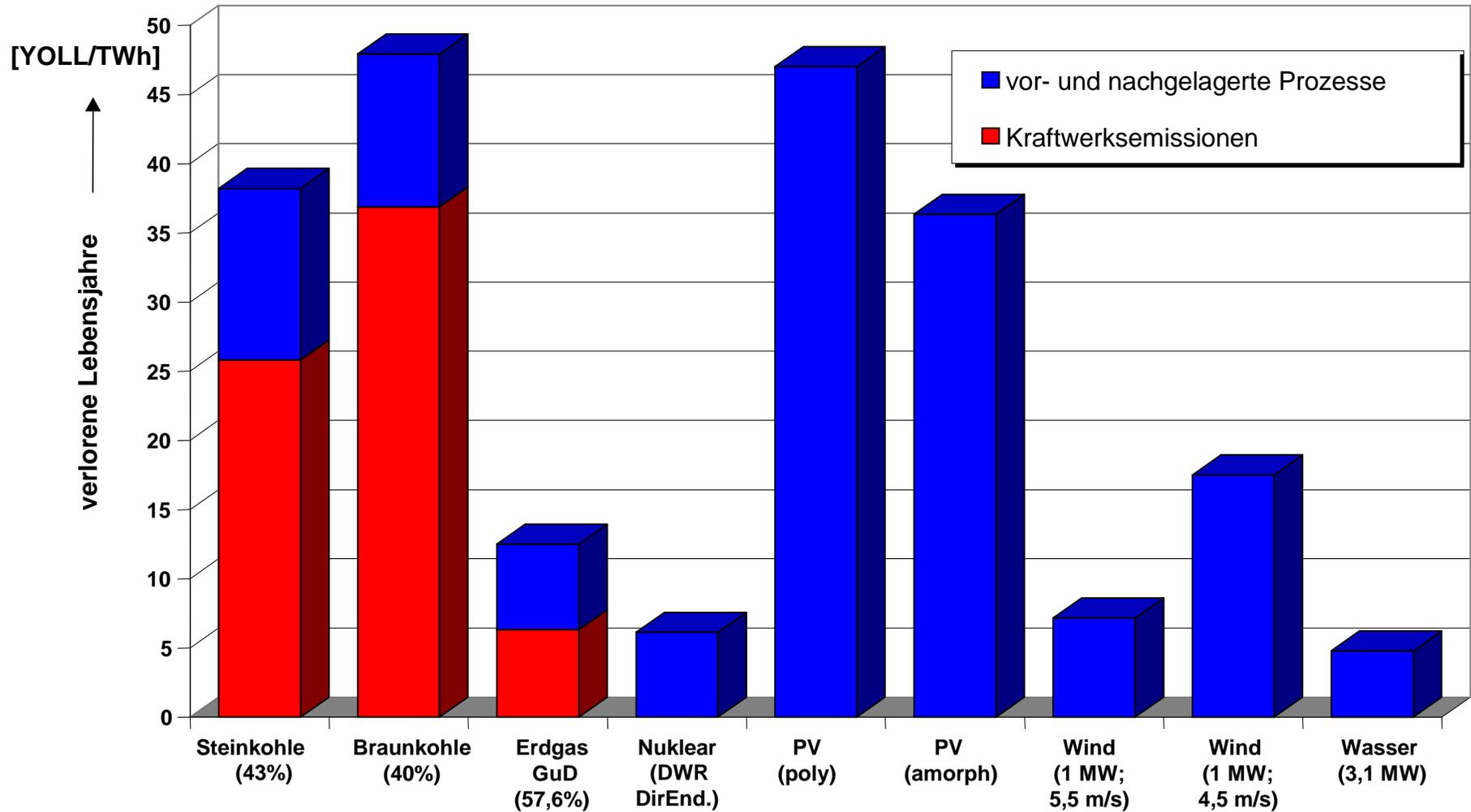
## Gesamter Rohstoff- und Materialaufwand

	<b>Eisen</b> [kg / GWh <sub>el</sub> ]	<b>Kupfer</b> [kg / GWh <sub>el</sub> ]	<b>Bauxit</b> [kg / GWh <sub>el</sub> ]
<b>Steinkohle</b> (43 %)	2.308	2	20
<b>Braunkohle</b> (40 %)	2.104	8	19
<b>Erdgas GuD</b> (57,6 %)	969	3	15
<b>Nuklear</b> (DWR, dir. Endlagerung)	445	6	27
<b>PV</b> poly	6.708	251	2.100
(5 kW) amorph	8.153	338	2.818
<b>Wind</b> 5,5 m/s	5.405	66	54
(1 MW) 4,5 m/s	10.659	141	110
<b>Wasser</b> (3,1 MW)	2.430	5	10

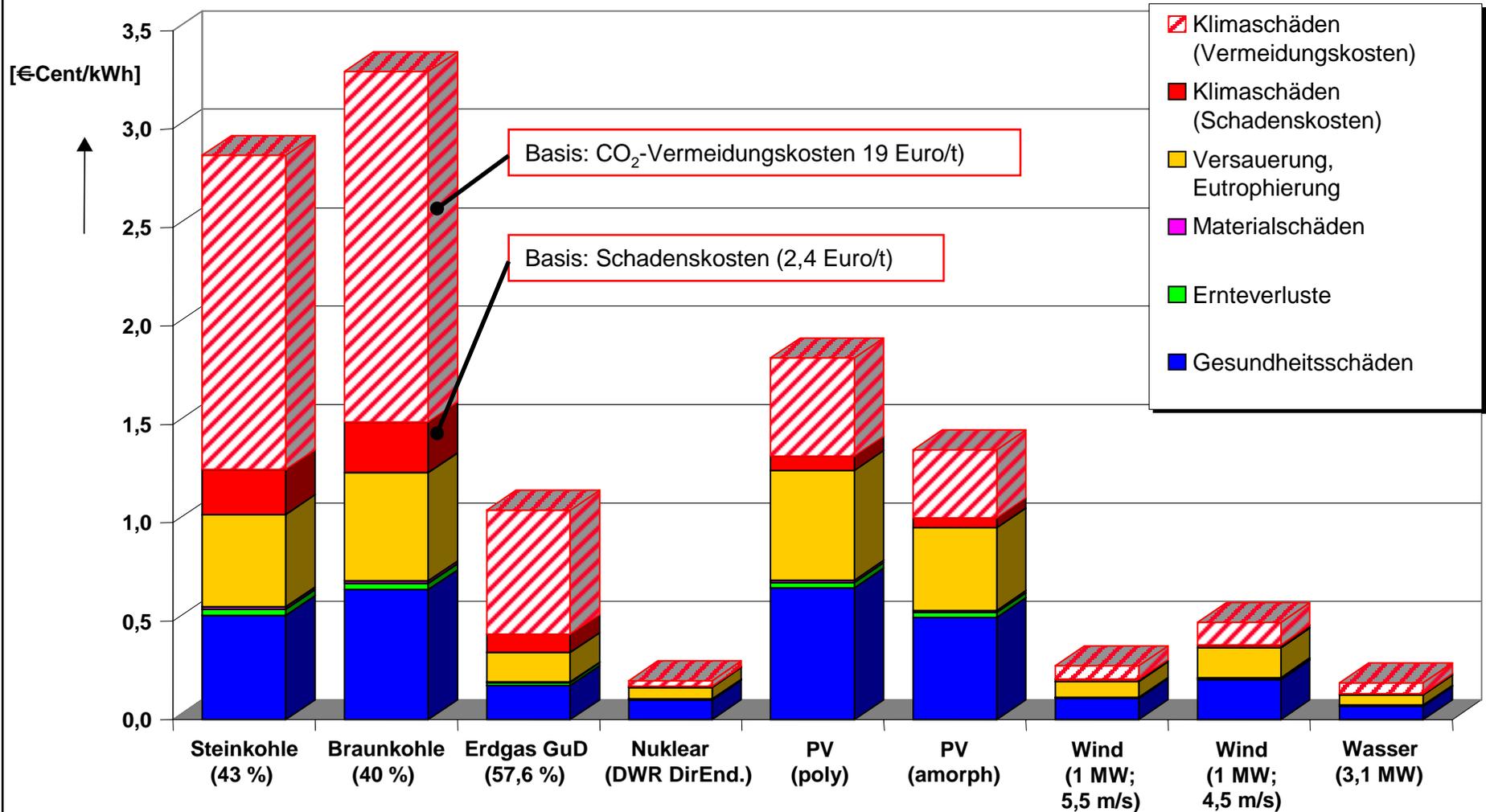
## Kumulierte Emissionen



## Gesundheitsrisiken



## Externe Kosten



## Gestehungskosten und Externe Kosten der Stromerzeugung

