



# “Regenerative Energien – Königsweg zu einer nachhaltigen Energieversorgung?”

Prof. Dr.-Ing. A. Voß

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Universität Stuttgart

VDI-Forum, Stuttgart, 31. Januar 2007



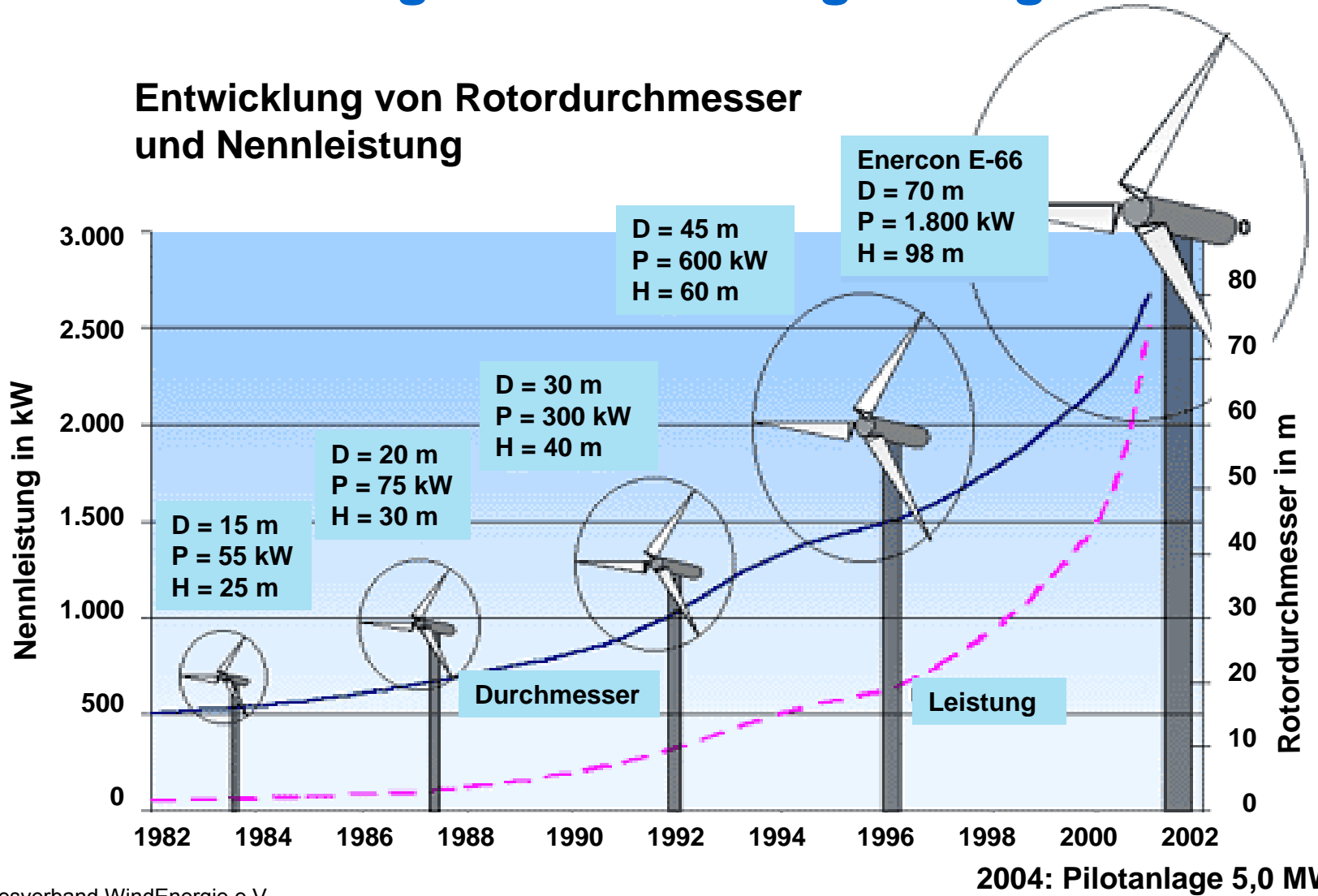
# Erneuerbare Energiequellen und ihre Nutzungsmöglichkeiten





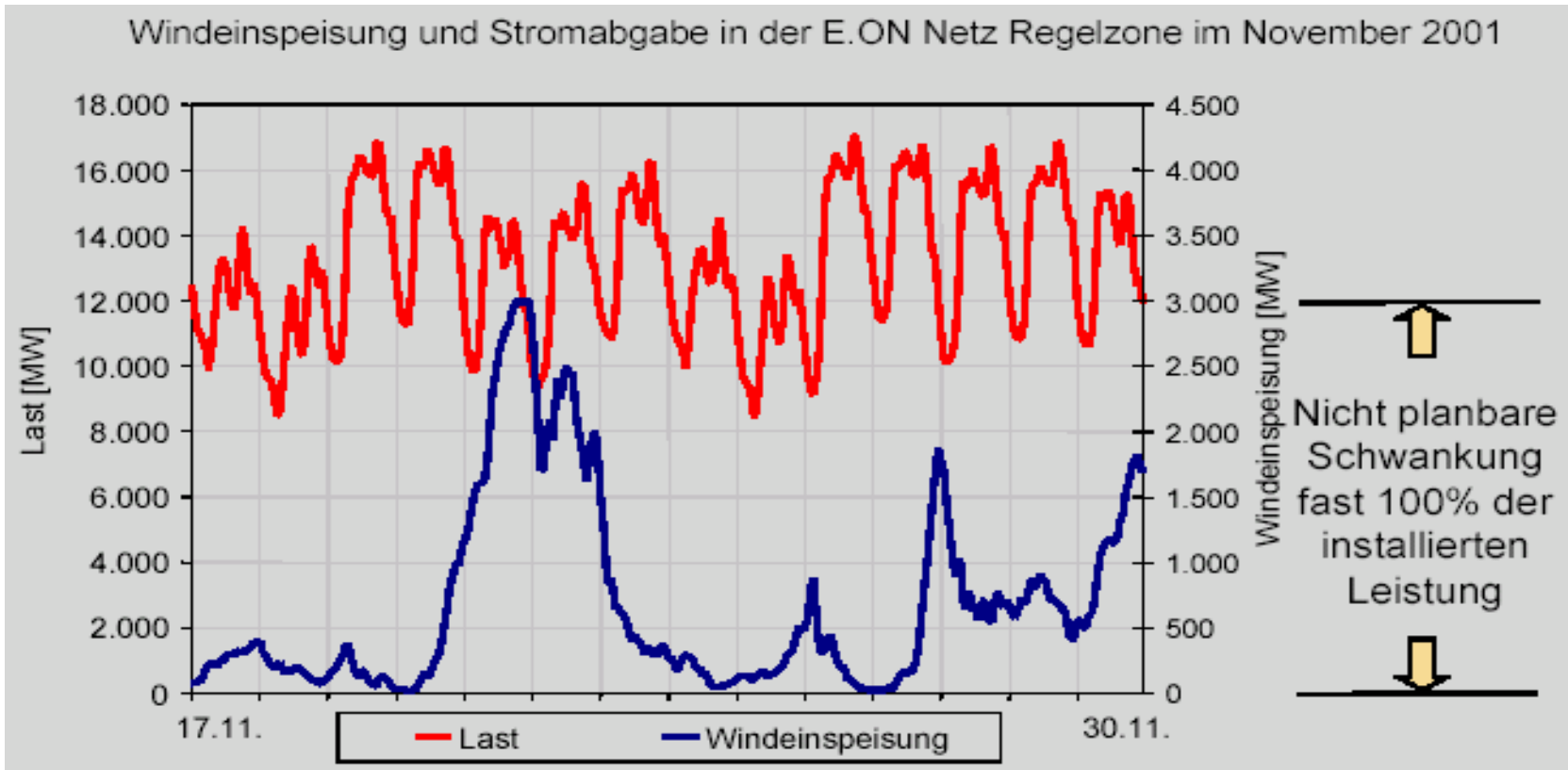
# Größenentwicklung von Windenergieanlagen

## Entwicklung von Rotordurchmesser und Nennleistung



Quelle: Bundesverband WindEnergie e.V.

# Charakteristik des Windenergieangebots



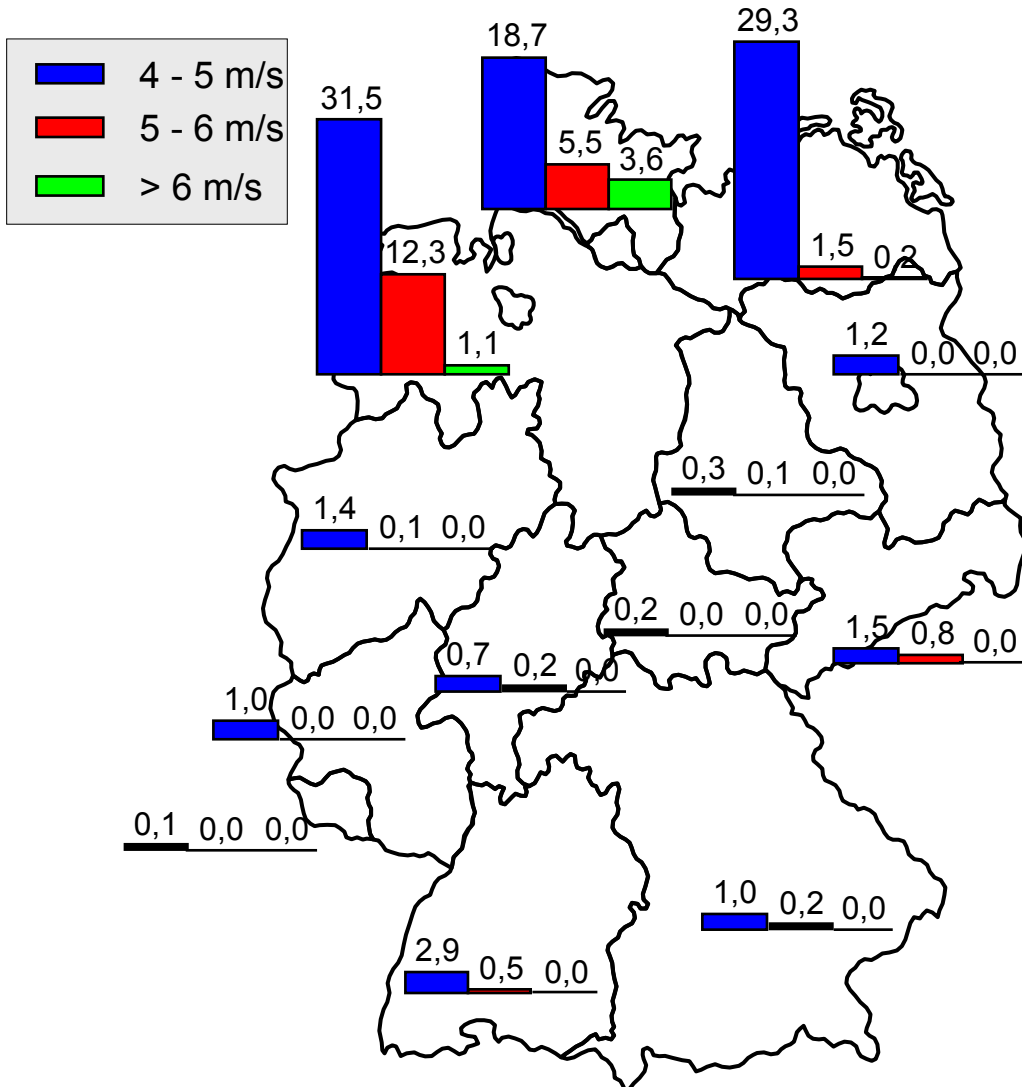
Ungesicherte Verfügbarkeit und fluktuierendes Angebot:

→ Spart nur wenig konventionelle Kraftwerksleistung

→ Erhöht den Regelbedarf des konventionellen Kraftwerksparks



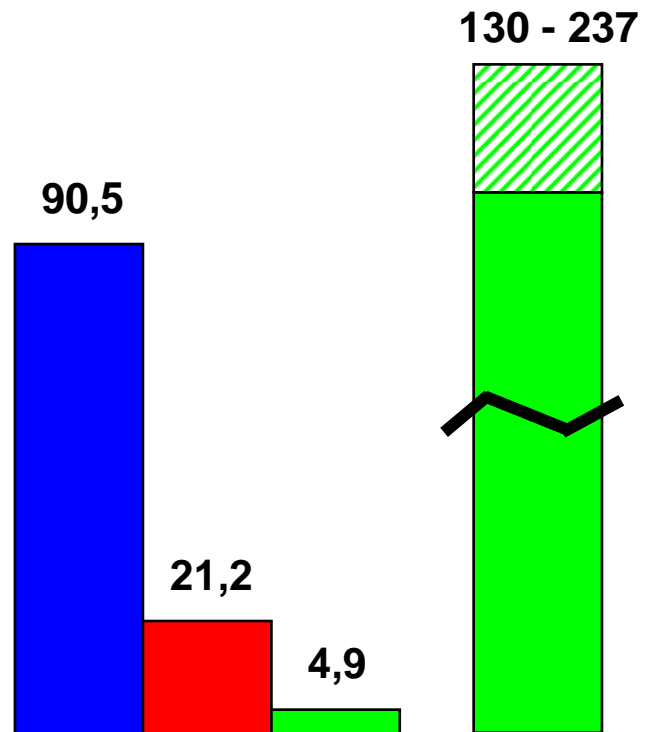
# Technische Potenziale der Windenergieerzeugung in Deutschland



Angaben in TWh/a

Onshore Potenziale

Offshore Potenziale





# Kosten des Windstroms



Erzeugungskosten (je nach Standort)

**7 bis 12 ct / kWh**



Back-up-Kosten für gesicherte Leistung

**0,5 bis 1,4 ct / kWh**

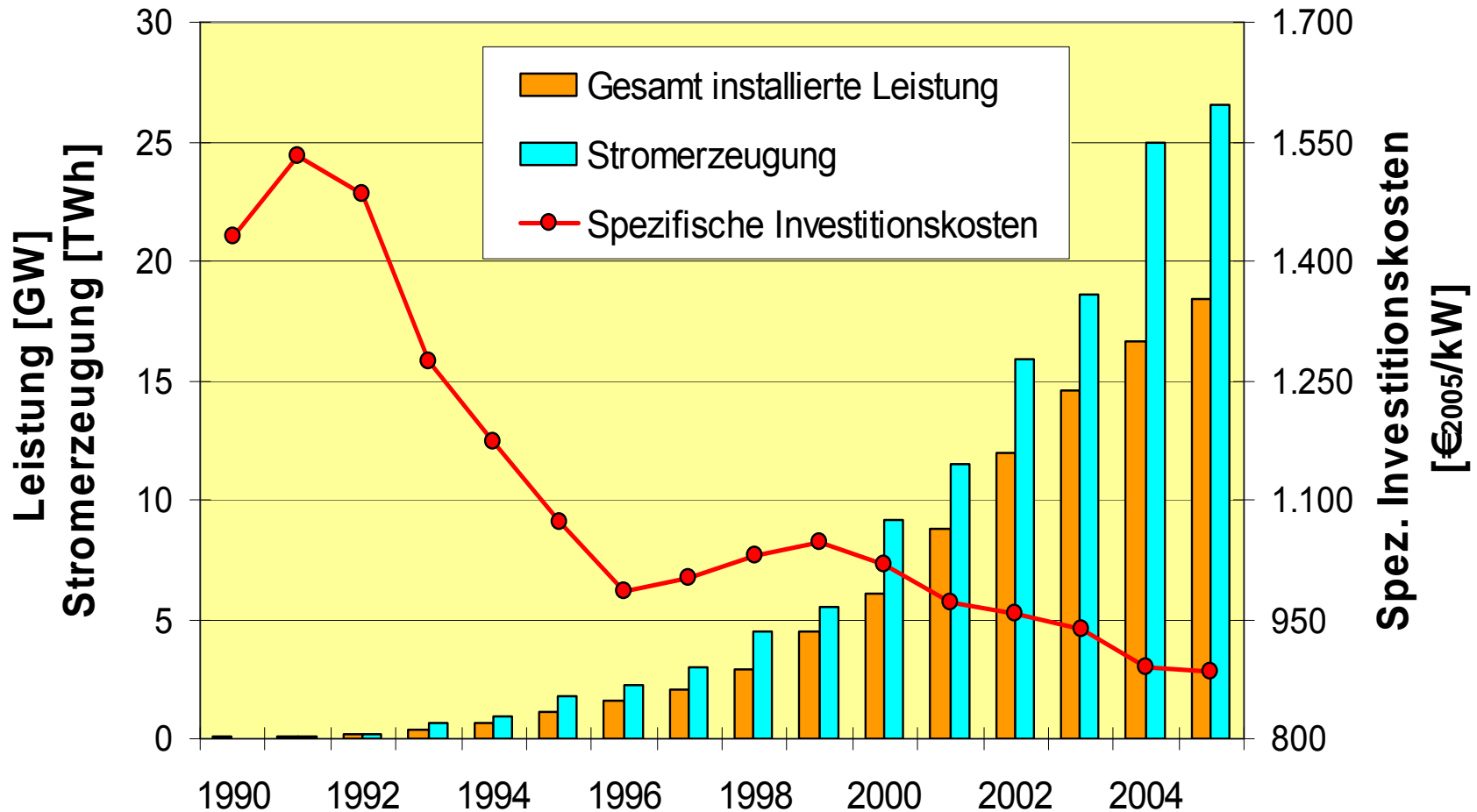


Netzausbau und Netzverluste

**ca. 0,2 ct / kWh**

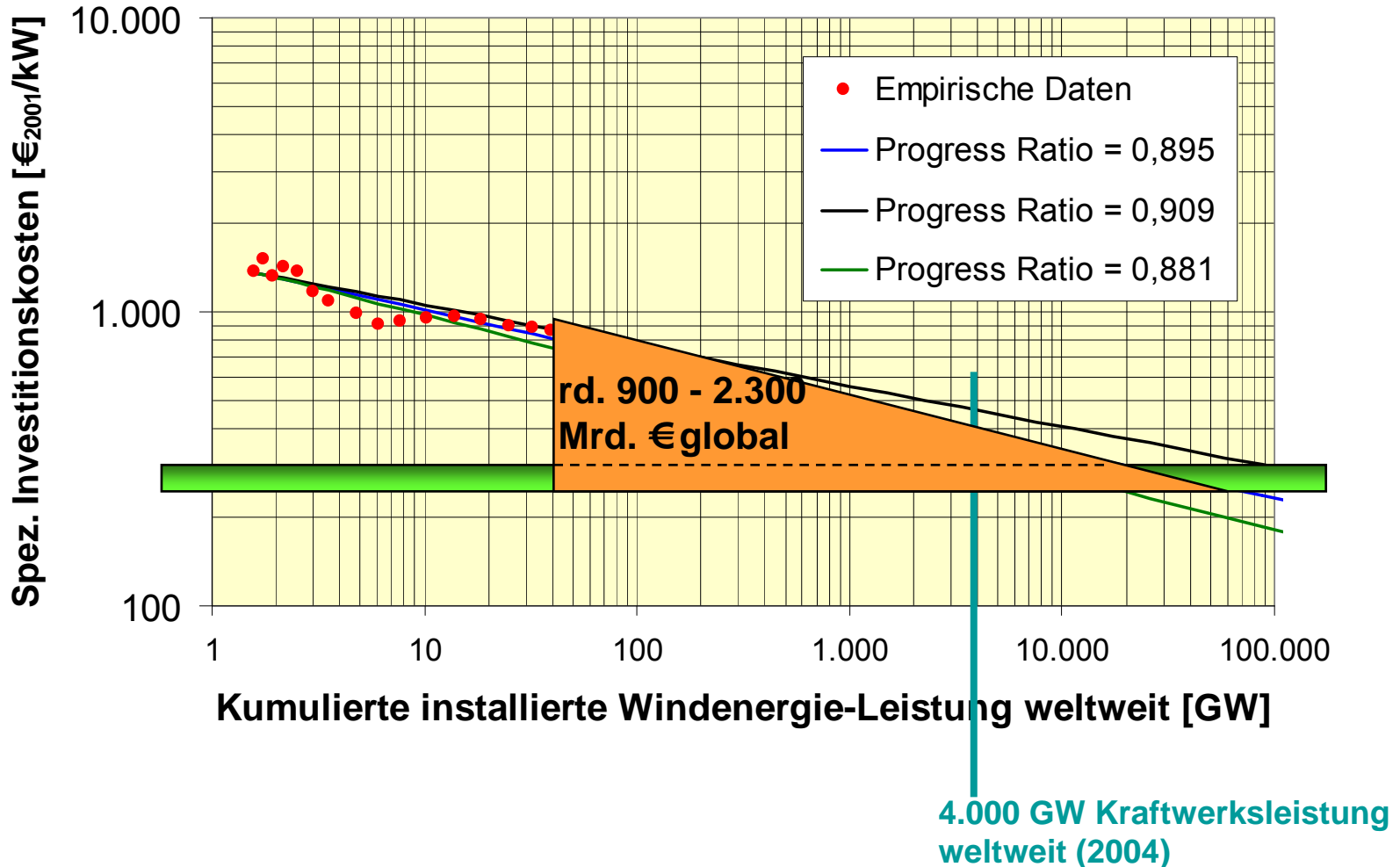
**8 bis 14 ct / kWh**

# Entwicklung der Windenergienutzung und der spezifischen Investitionskosten



2005: Schätzwerte

# Lernkurve Windenergie

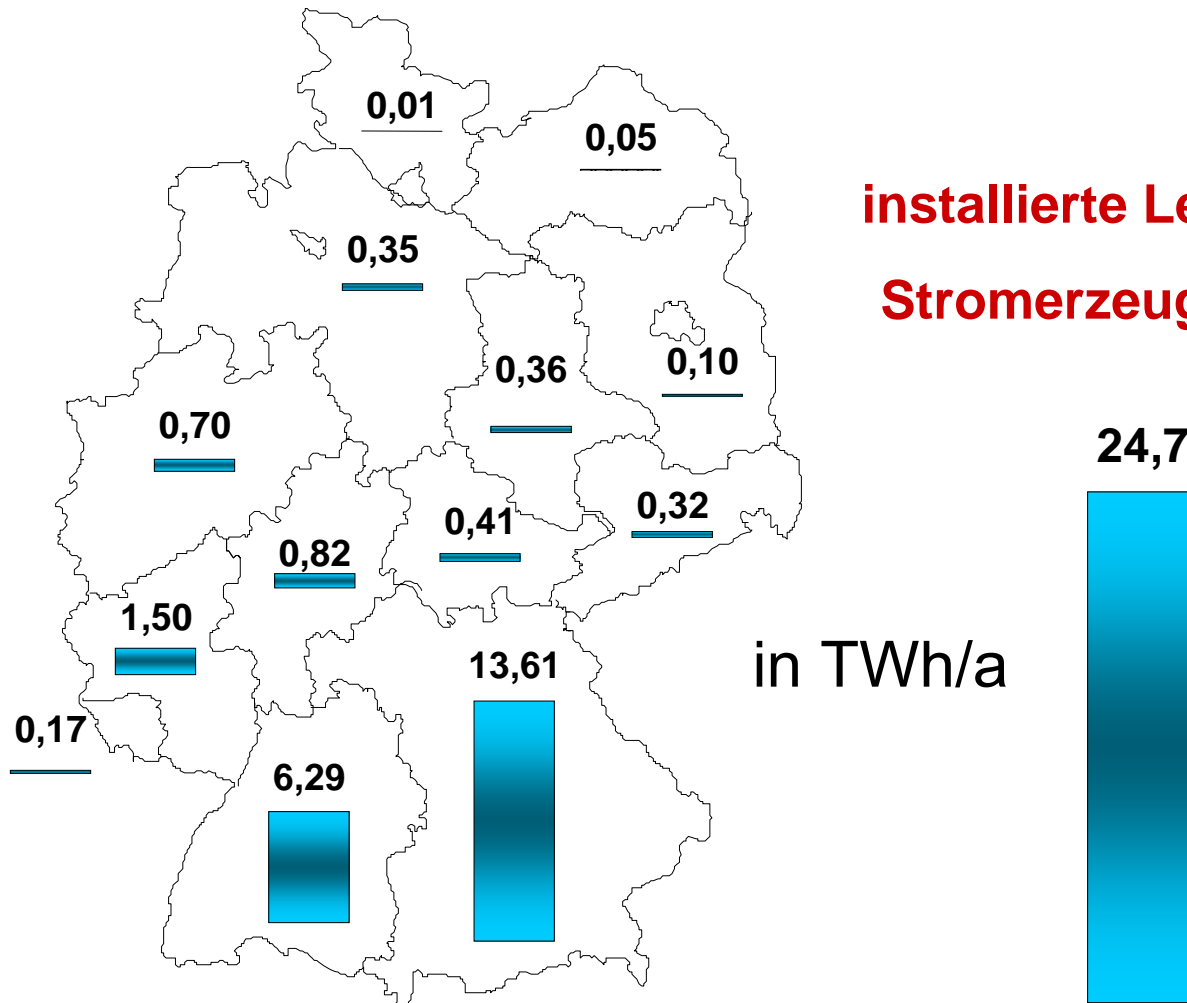




# Wasserkraft



# Technisches Stromerzeugungspotenzial der Wasserkraft in Deutschland



**2005**

**installierte Leistung**

**4.680 MW<sub>el</sub>**

**Stromerzeugung**

**21,5 TWh**

in TWh/a

Quelle: Kaltschmitt, Wiese 1993

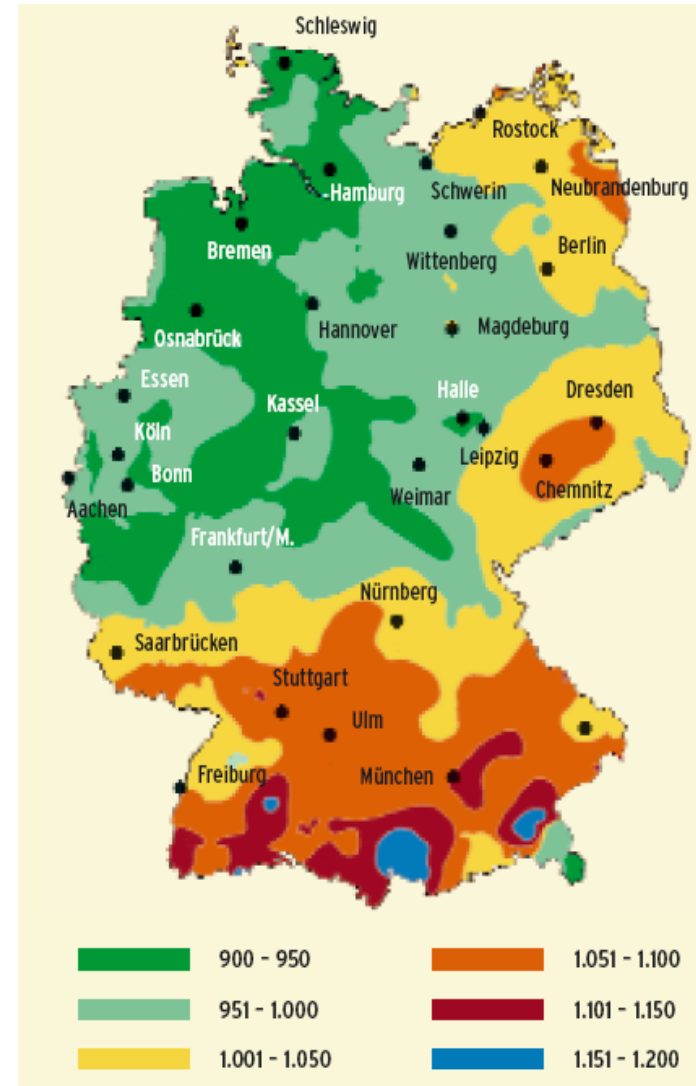
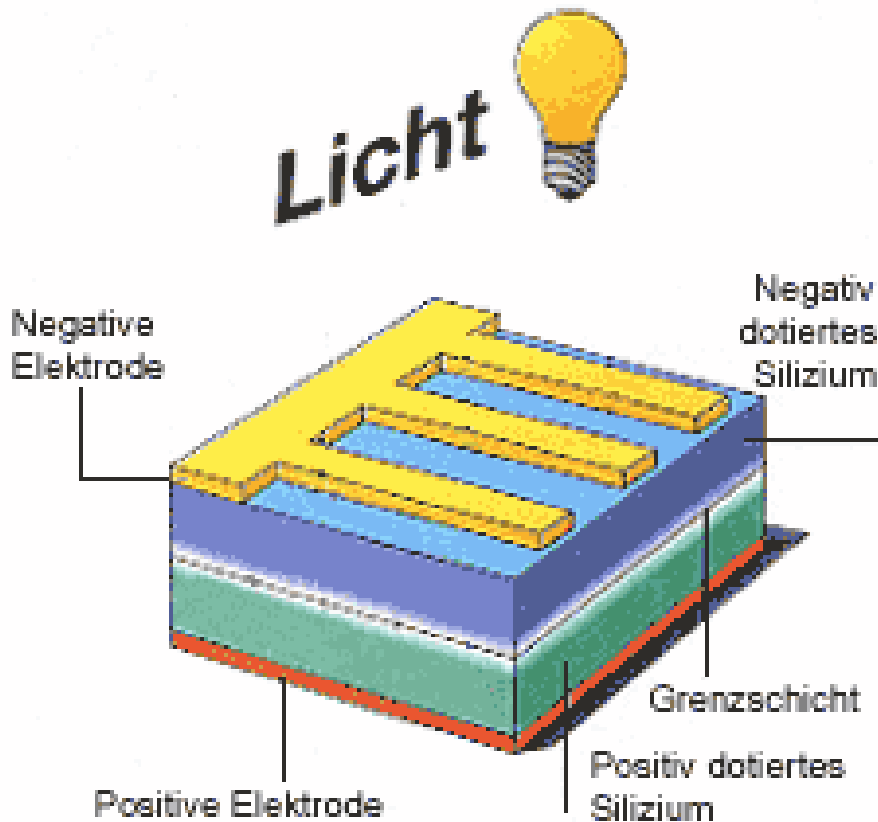


# Photovoltaische Strahlungsenergienutzung





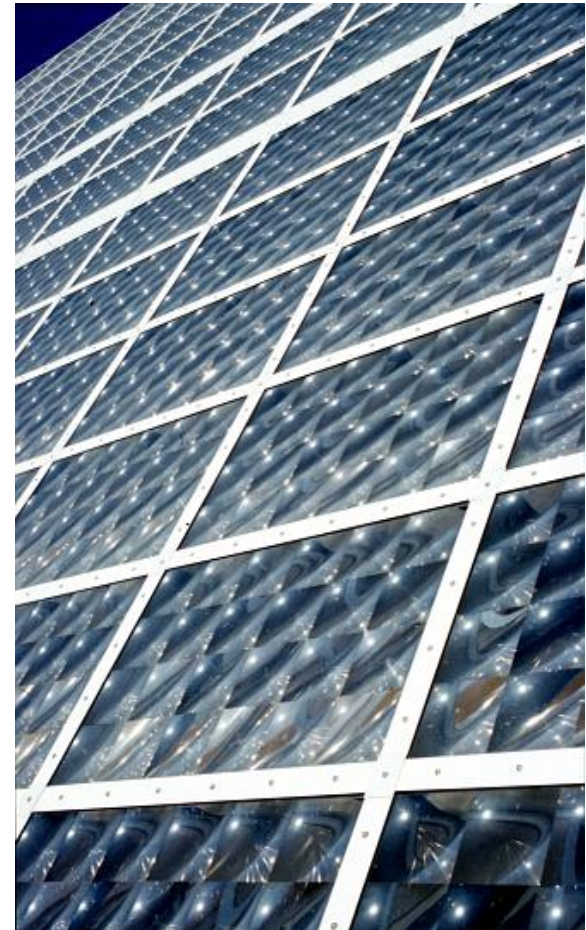
# Globalstrahlung in Deutschland



Quellen: DWD, <http://www.solarserver.de/lexikon/lexikonp.html>

# Entwicklungsperspektiven der Photovoltaik: Technologie

- ◆ Mono- und multikristalline Si-Zellen heute marktbeherrschende Zelltypen
  - ◆ Modulwirkungsgrade: 13 – 15 %
  - ◆ Spez. Investitionskosten:
    - 4.000 (Freiflächenanlagen) –
    - 7.000 €/kW<sub>p</sub> (Dachanlagen)
  - ◆ Volllastbenutzungsstunden: 800 – 900 h/a
- ◆ Kostenreduktion durch
  - ◆ Verbesserte Herstellungsverfahren
  - ◆ Dünnschichtsolarzellen aus
    - ⇒ dünnem kristallinen Silizium
    - ⇒ Cadmiumtellurid CdTe
    - ⇒ Kupfer-Indium-Diselenid CIS



# Kosten des photovoltaisch erzeugten Stroms



Erzeugungskosten (je nach Standort)

**46 bis 61 ct / kWh**

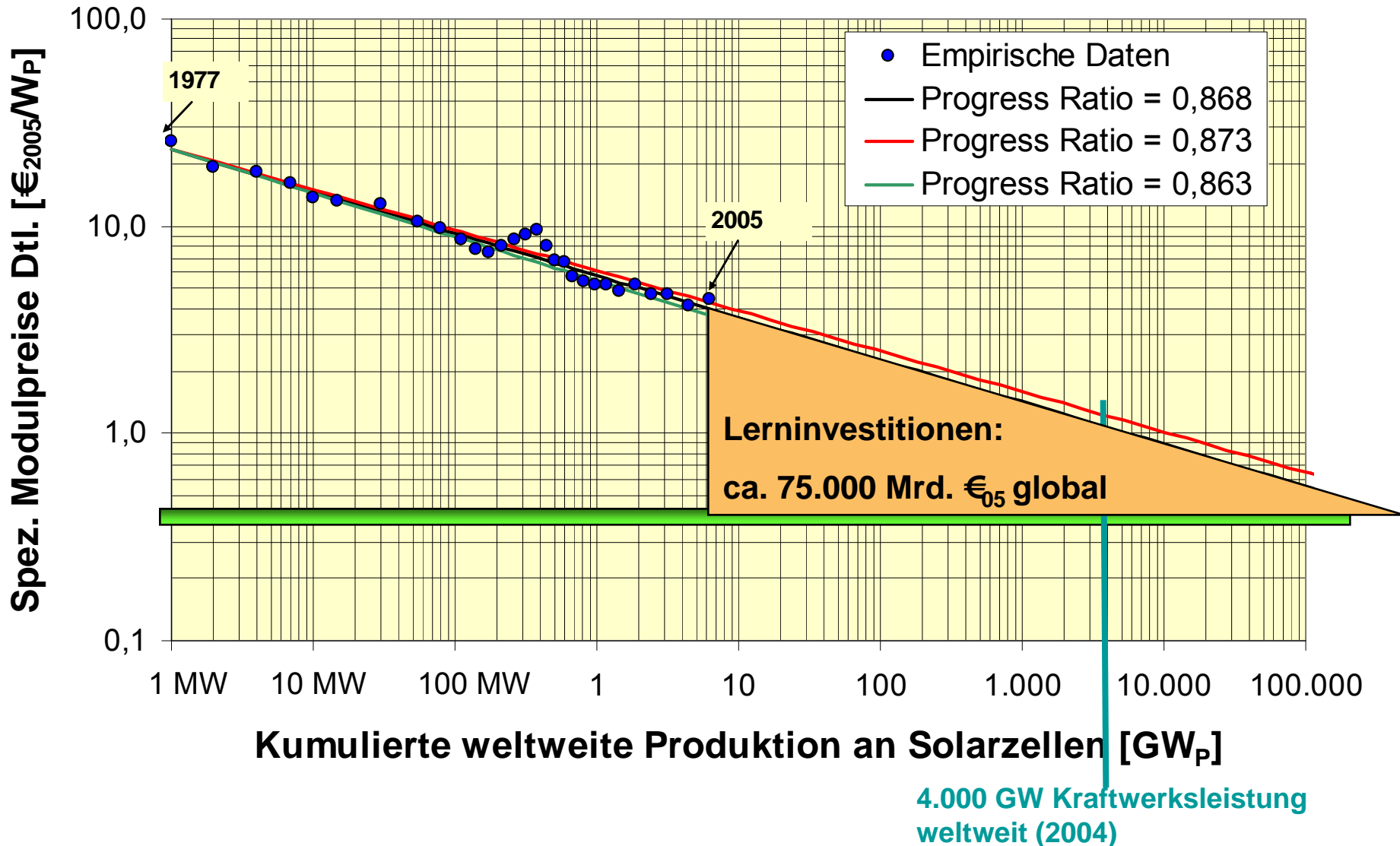


Back-up-Kosten für gesicherte Leistung

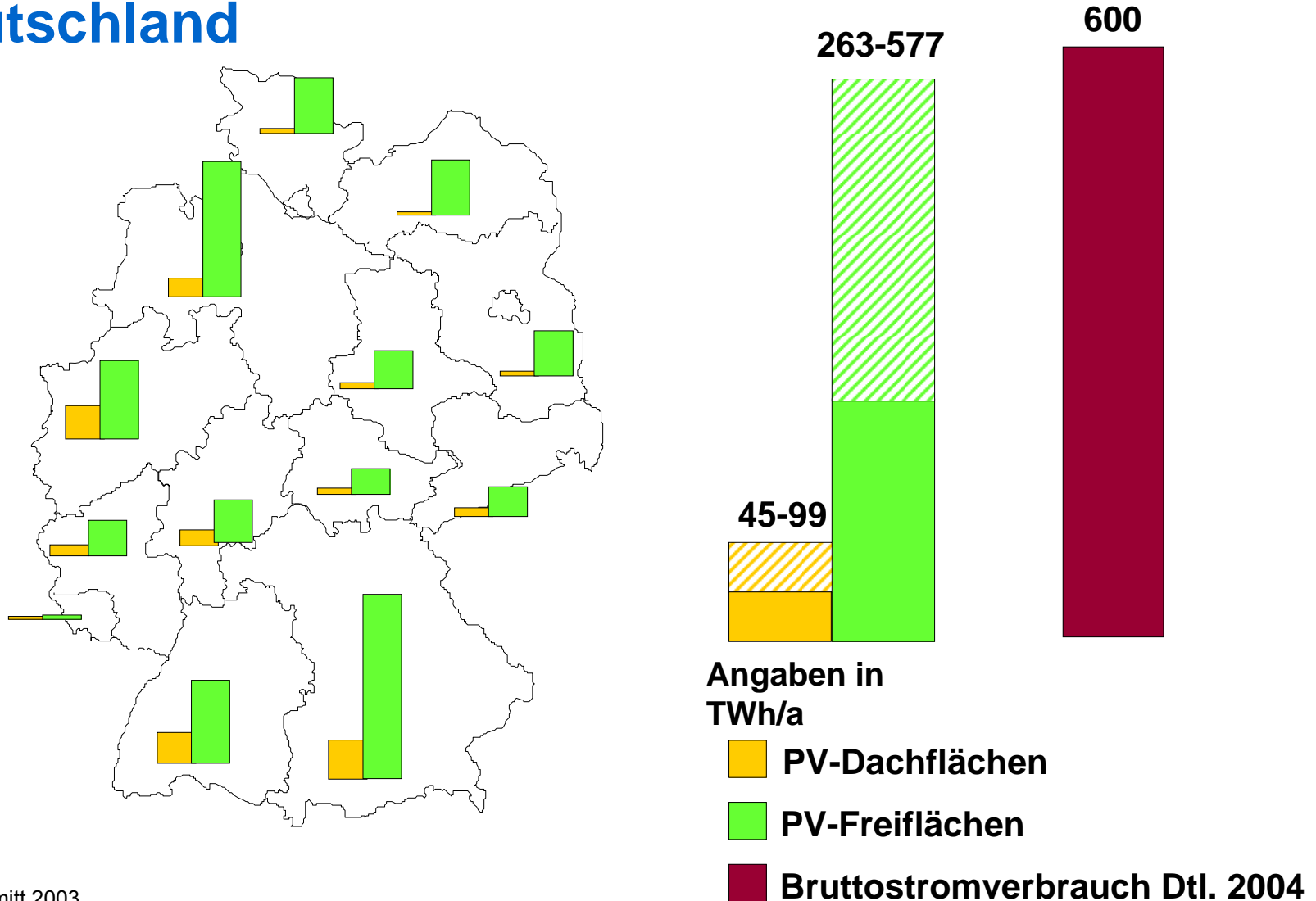
**0,7 bis 1,7 ct / kWh**

**47 bis 63 ct / kWh**

# Lernkurve Photovoltaik



# Photovoltaische Stromerzeugungspotenziale in Deutschland



Quelle: Kaltschmitt 2003



# Solarthermische Strahlungsenergienutzung

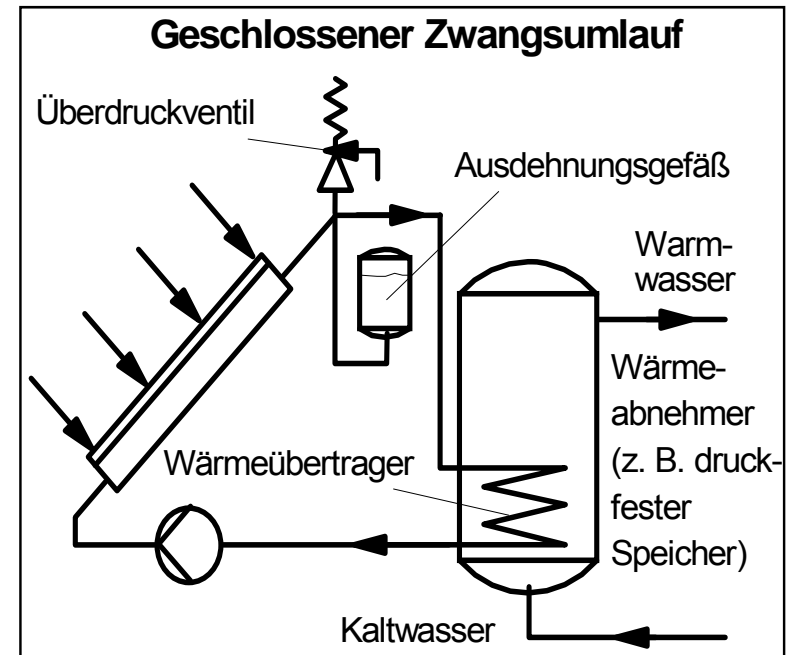


# Anlagen der solarthermischen Wärmebereitstellung

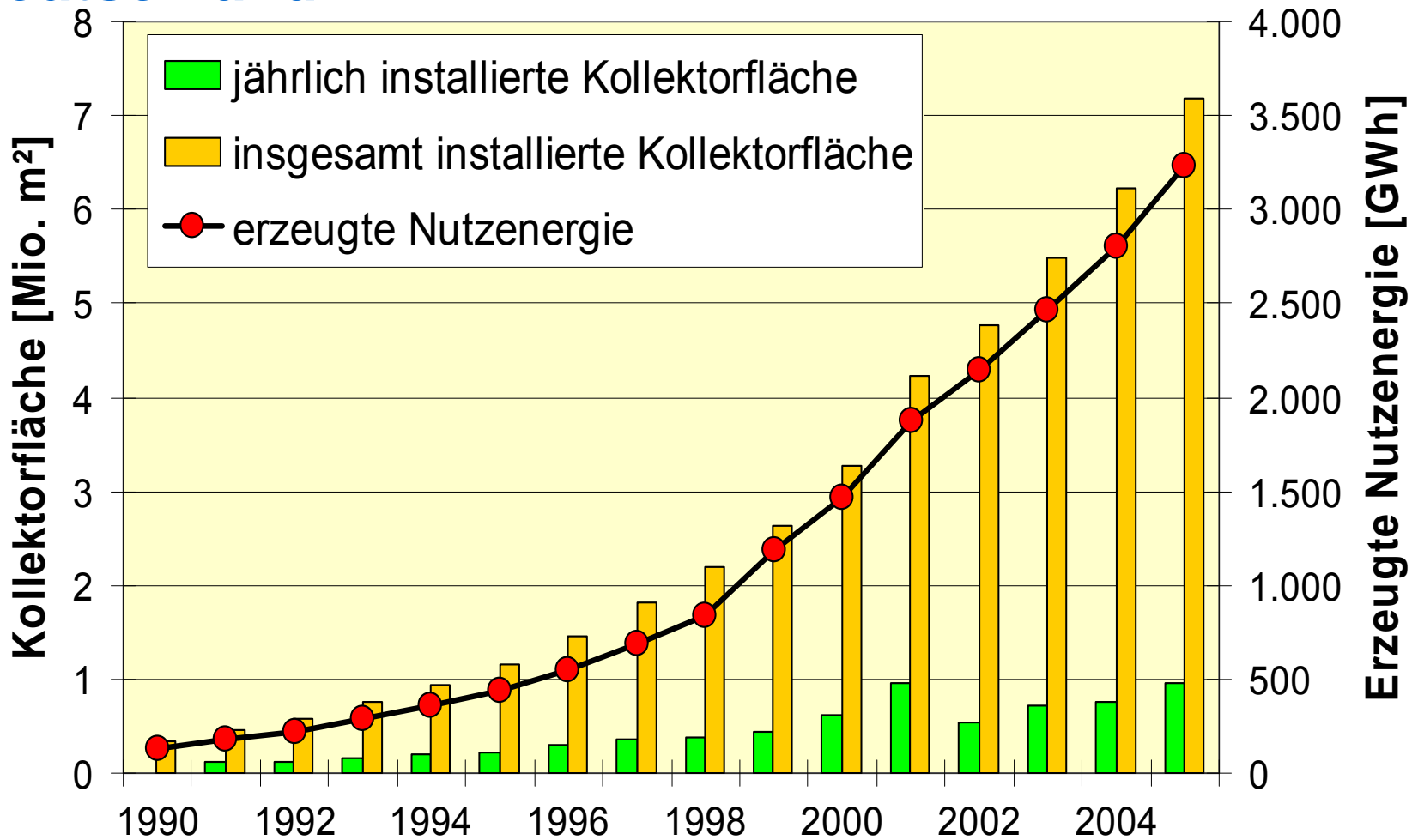
Vakuumröhrenkollektor



Flachkollektor



# Entwicklung der installierten Kollektorfläche in Deutschland



Quellen: BMU, Erneuerbare Energien und Umwelt in Zahlen, 2005; [www.solarwirtschaft.de](http://www.solarwirtschaft.de)



# Typische solarthermische Anlagen

Anlagentyp	Solarthermische Brauchwassererwärmung	Solarthermische Kombianlage
ausgelegt für	4-Personen-Haushalt	
Kollektorfläche	5 m <sup>2</sup>	15 m <sup>2</sup>
Speichervolumen	300 l	700 – 1.000 l
Solarer Deckungsanteil	Warmwasser: 50 %  Gesamtwärme: 12 %	Warmwasser: 50 %  Gesamtwärme: 25 %
Energiegestehungs- kosten	0,19 €/kWh	0,15 €/kWh



# Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland im Jahr 2005 (1990)

	Primärenergie [PJ/a]		Elektrizität [GWh/a]	
	1990	2005	1990	2005
Wasserkraft	61,2	77,5	17.000	21.500
Wind	0,1	95,4	40	26.500
Biomasse	45,2	459,1	1.422	13.200
Geothermie	k.A.	5,7	--	0,2
solare Strahlung	< 0,1	14,3	1	1.000
<b>Gesamt</b>	<b>106,5</b> (1,1 %*)	<b>652,0</b> (4,6 %*)	<b>18.463</b> (3,4 %**)	<b>62.200</b> (10,1 %**)

\* Anteil am Primärenergieverbrauch

\*\* Anteil an der Stromerzeugung (brutto)

Quelle: BMU 2006 (2005: Schätzwerte)



## ➤ **Nachhaltige Energieversorgung – was ist darunter zu verstehen?**



# 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 Lebensgrundlagen in Einklang zu bringen.



## Naturwissenschaftliche Grundlagen

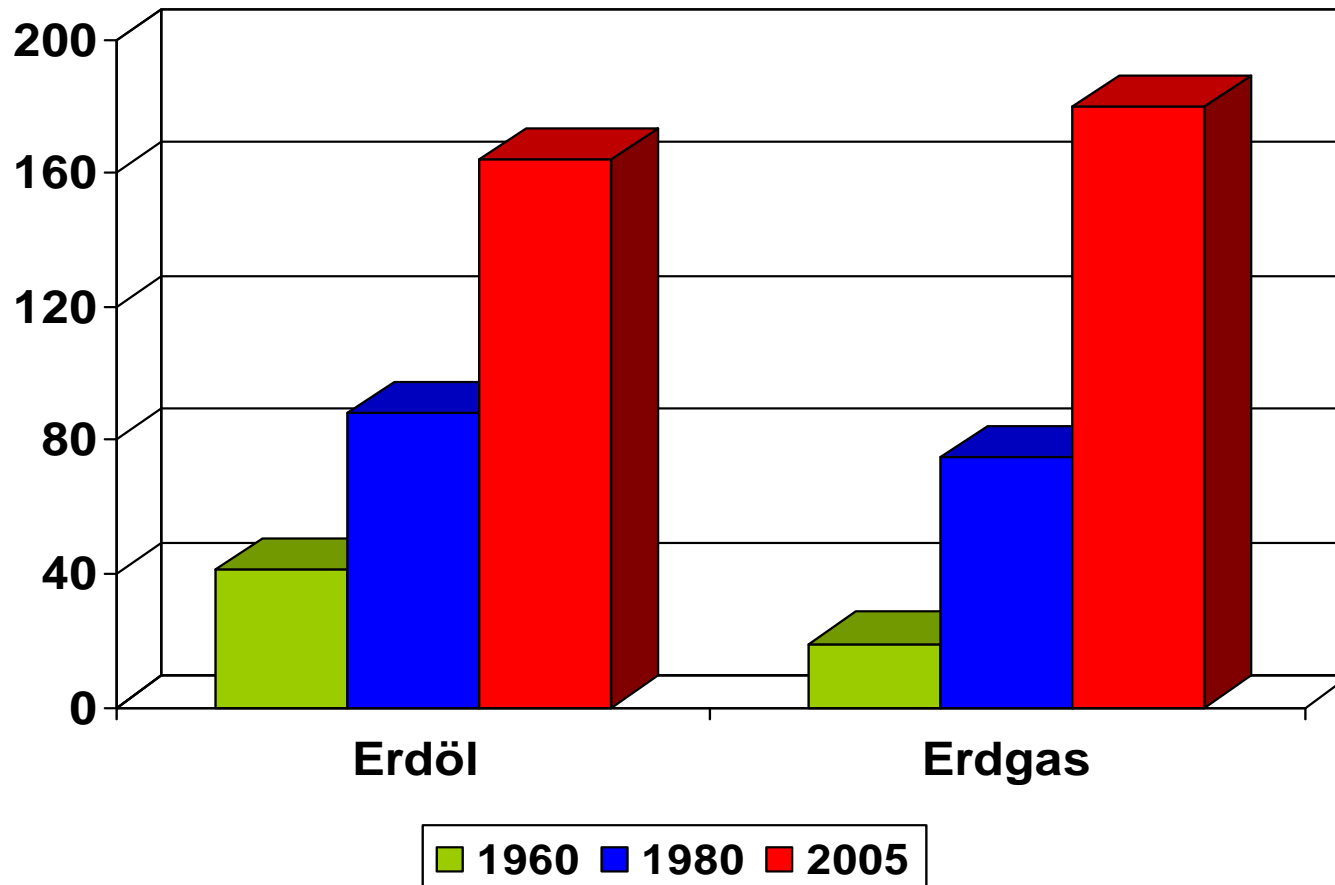
- **2. Hauptsatz der Thermodynamik  $\Rightarrow$  Leben sowie die Entfaltung wirtschaftlicher und kultureller Leistungen bedürfen ständiger Zufuhr von arbeitsfähiger Energie und Materie.**
- **Wachsendes Wissen (Gestaltungsfähigkeit) und die damit mögliche Weiterentwicklung von Technik sind die Basis zur Erhaltung bzw. Erweiterung der Entfaltungsspielräume kommender Generationen.**
- **Energiebedingte Umweltbelastungen resultieren aus der mit der Stoffwandlung verbundenen Stofffreisetzungen in die Umwelt.**



# Nachhaltigkeit und die Nutzung vorratsbegrenzter Ressourcen

- Ist die Nutzung vorratsbegrenzter Ressourcen (z.B Erdöl und Kohle) mit dem Nachhaltigkeitsprinzip vereinbar ?
- Die Bereitstellung von Energiedienstleistungen erfordert den Einsatz von Energieträgern, aber auch von nichtenergetischen Rohstoffen und Materialien.
- Stand der Technik bestimmt die technisch-wirtschaftlich verfügbare Energie- und Rohstoffbasis.
- Eine Nutzung vorratsbegrenzter Ressourcen erfordert eine Gegenleistung:
  - ⇒ die Ausweitung der technisch-wirtschaftlich verfügbaren Ressourcenmenge.

# Entwicklung der sicher gewinnbaren Reserven





## Effiziente Ressourcennutzung und Ökonomie

- **Haushälterischer Umgang mit knappen Ressourcen ist ein zentraler Aspekt von Nachhaltigkeit.**
- **Auch das allgemeine ökonomische Prinzip zielt auf die Minimierung des Ressourcenverbrauchs ab.**
  - ⇒ **Kosten und Preise dienen dabei als Maß für die Ressourceninanspruchnahme.**
- **Kosten sind dann ein Maß für die relative Nachhaltigkeit von Energiesystemen wenn alle Kosten, auch die der Umweltinanspruchnahme erfasst sind.**
  - ⇒ **Internalisierung externer Kosten**



# Nachhaltige Energieversorgung

## wenn

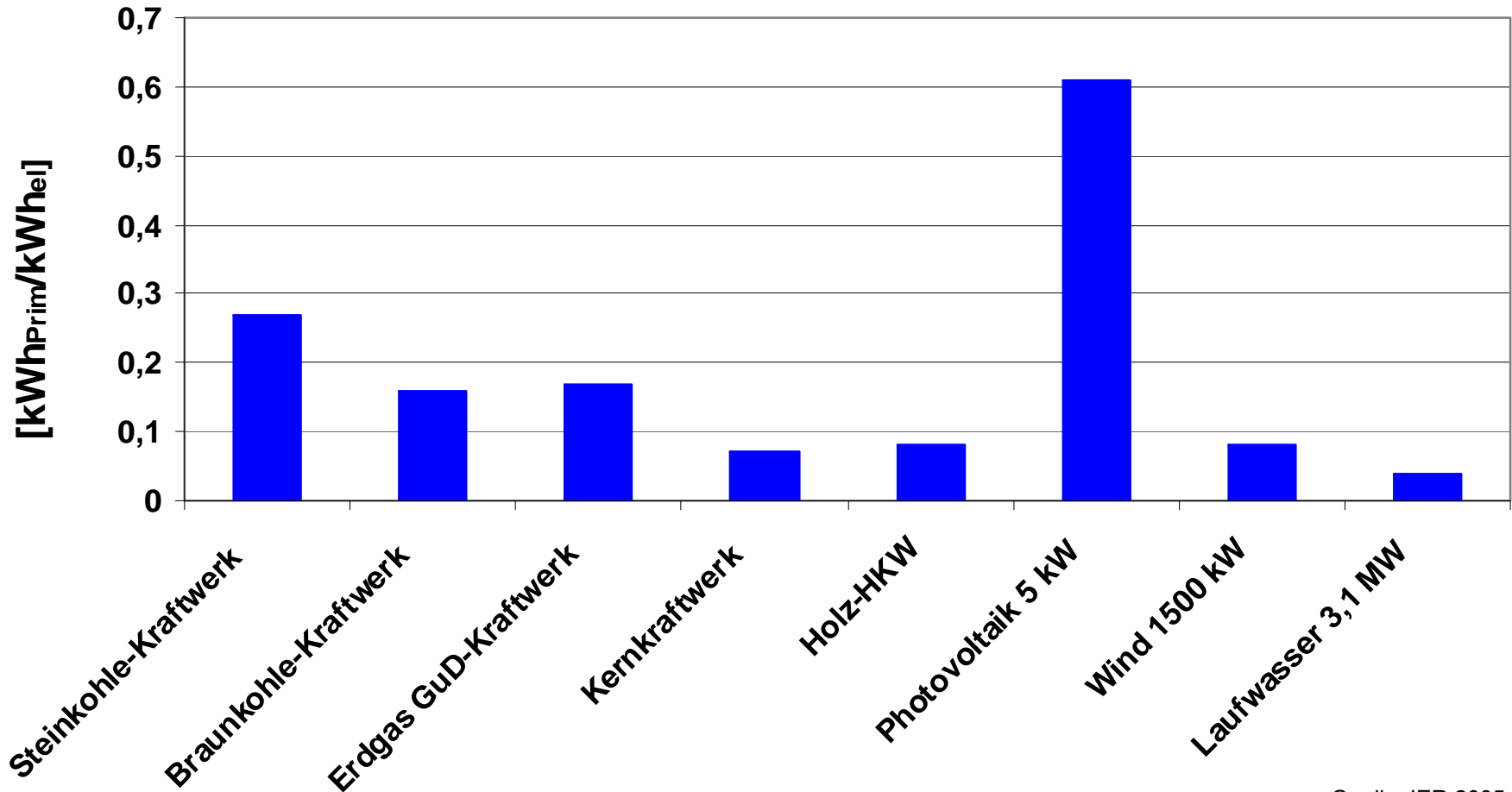
- das Potenzial für die Bereitstellung von Energiedienstleistungen für die nächste Generation größer wird.
  - ➔ Ausweitung der wirtschaftlich nutzbaren Energie- und Rohstoffbasis
- die mit der Energienutzung verbundenen Stofffreisetzungen die Assimilationskapazität der Umwelt als Senke nicht überschreiten.
- die Energiedienstleistungen mit möglichst geringem Ressourcenaufwand, einschließlich der Ressource Umwelt bereitgestellt werden.
  - ➔ Relative Nachhaltigkeit von Energiesystemen lässt sich messen am gesamten Ressourcenverbrauch je Energieeinheit (Rohstoffe, Energie, Kapital, Arbeit, Umwelt)
  - ➔ Vollkosten sind Maß für relative Nachhaltigkeit



## ➤ **Stromerzeugungssysteme auf dem Prüfstand der Nachhaltigkeit**



# Spezifischer kumulierter Energieaufwand (KEA) (ohne Brennstoff)



Quelle: IER 2005



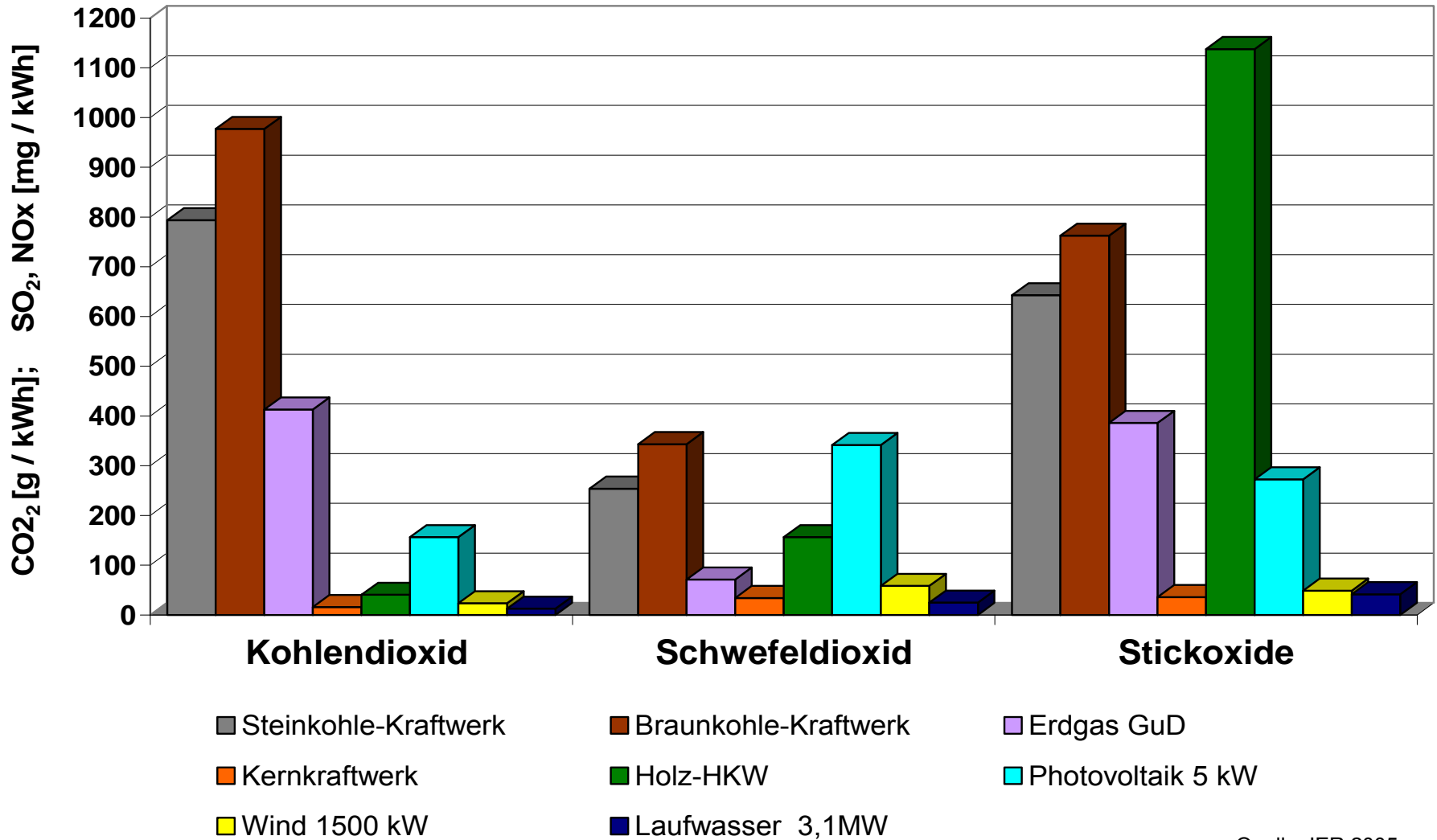
## Gesamter Rohstoff und Materialaufwand

	<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-Kraftwerk</b>	<b>1.700</b>	<b>8</b>	<b>30</b>
<b>Braunkohle-Kraftwerk</b>	<b>2.134</b>	<b>8</b>	<b>19</b>
<b>Erdgas GuD</b>	<b>1.239</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Kernkraftwerk</b>	<b>457</b>	<b>6</b>	<b>27</b>
<b>Holz-HKW</b>	<b>934</b>	<b>4</b>	<b>18</b>
<b>Photovoltaik 5 kW</b>	<b>4.969</b>	<b>281</b>	<b>2.189</b>
<b>Wind 1500 kW</b>	<b>4.471</b>	<b>75</b>	<b>51</b>
<b>Laufwasser 3,1 MW</b>	<b>2.057</b>	<b>5</b>	<b>7</b>

Quelle: IER 2005

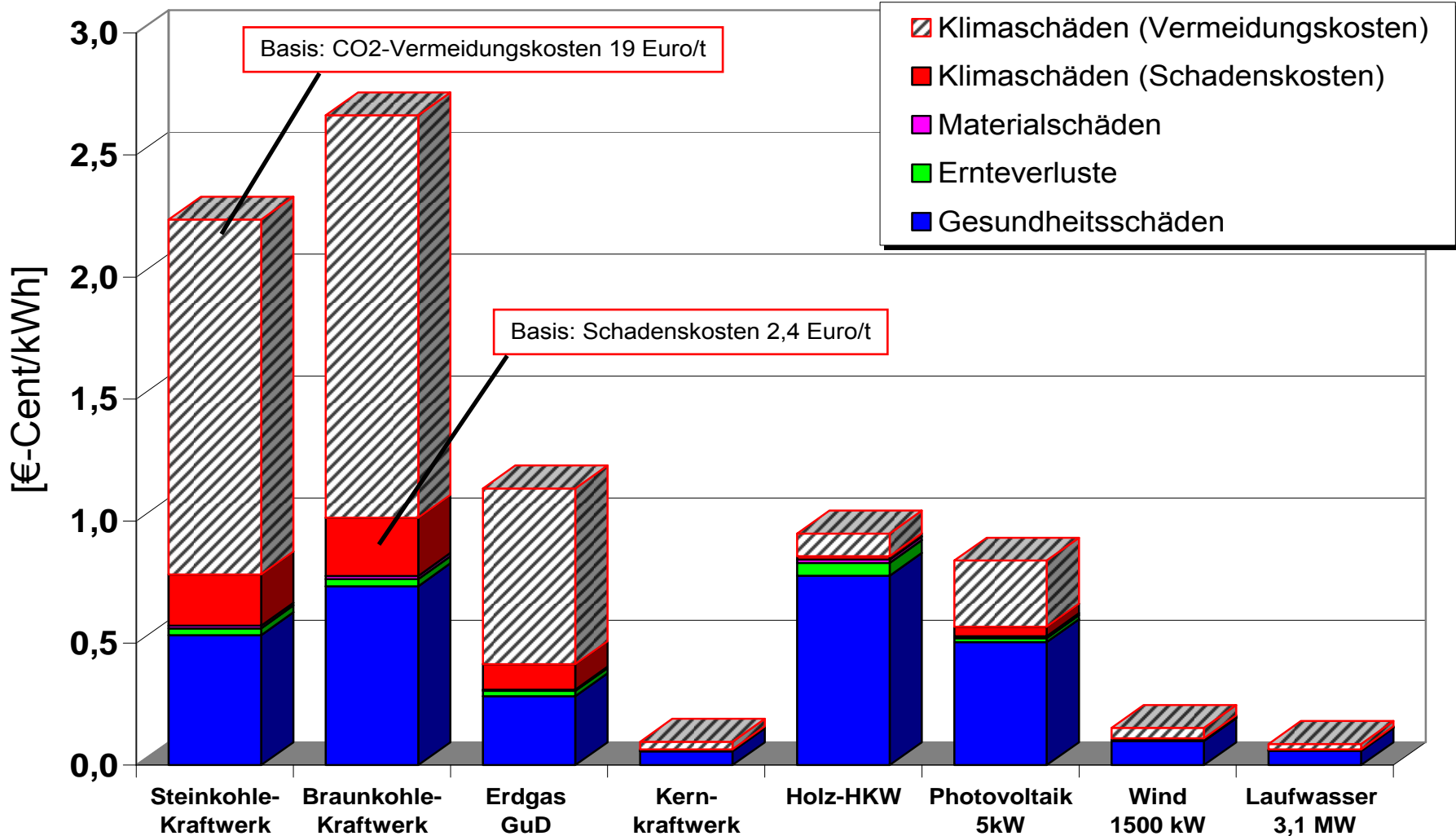


# Kumulierte Emissionen



Quelle: IER 2005

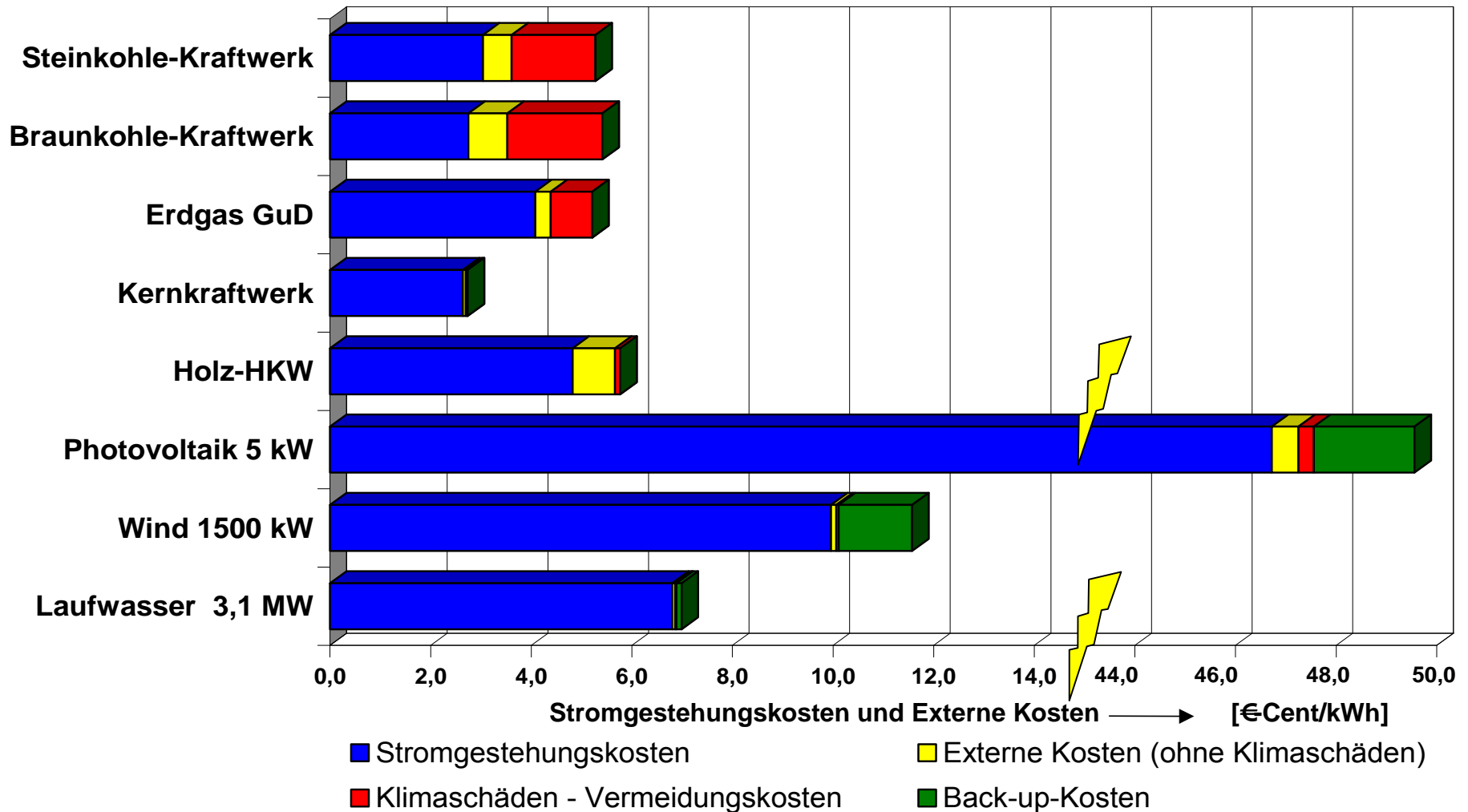
# Externe Kosten



Quelle: IER 2005



# Gesamtkosten der Stromerzeugung



Quelle: IER 2005



**Danke für Ihre  
Aufmerksamkeit!**