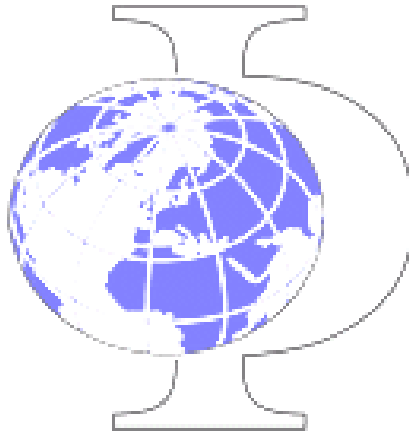


# Strategien zur Vermeidung des Klimawandels

**Prof. Klaus Pfeilsticker**  
**Institut für Umweltphysik**  
**Universität Heidelberg**



**Vortrag am IUP-Heidelberg , 14.10.2010**

# Warum brauchen wir eine andere Energieversorgung?

**Neuausrichtung der Energieversorgung ist motiviert durch**

**1. Weltweite Ressourcenverknappung (u.a. IEA-2010)**

- **Starker Preisanstieg von Öl, Gas, Kohle, ...**
- **Probleme in der Versorgungssicherheit**
- **Konflikte um Energieressourcen**
- **Umweltrisiken bei der Rohstoffförderung**
- **..**

**2. Klimawandel wg. Treibhausgasemissionen (u.a. IPCC-2007)**

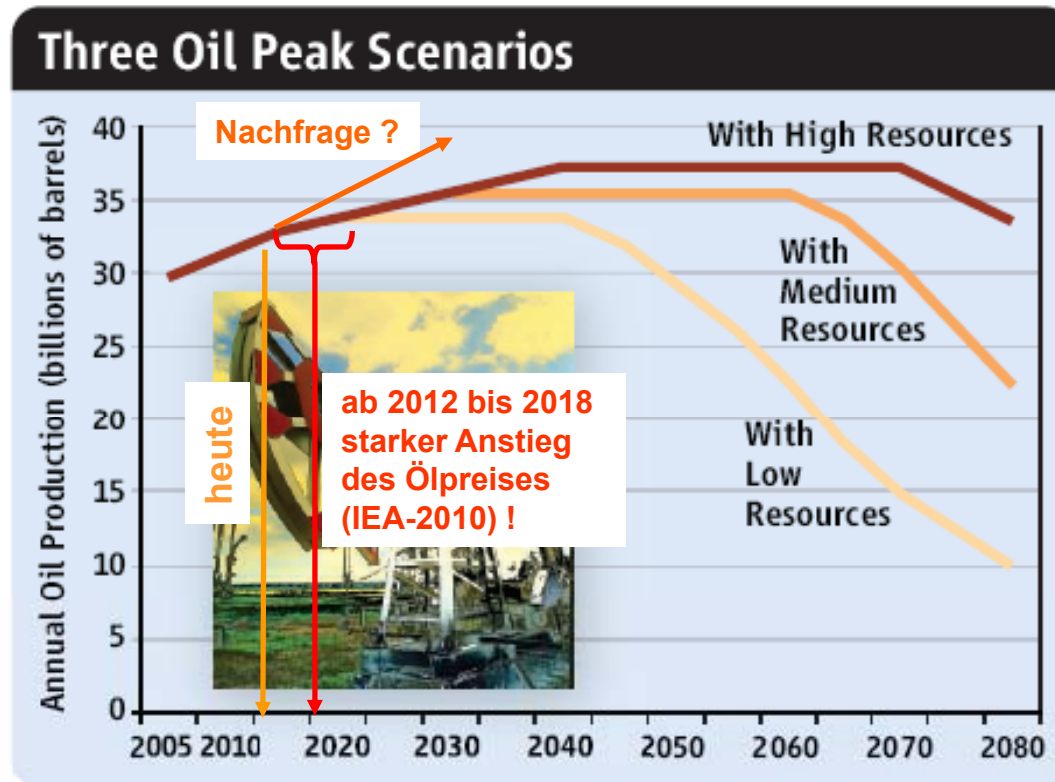
- **Temperaturerhöhung um 3 – 5 Grad bis 2100**
- **Änderung der Klimazonen**
- **Prognostizierter Meeresspiegelanstieg ~ 0.6 - 2 m bis 2100**
- **Nahrungsmittelkrise**
- **Verschwinden von Lebensräumen & Verringerung der Artenvielfalt**
- **...**

## Mögliche Handlungsoptionen zur Vermeidung des Klimawandels bzw. Reaktionen auf die wachsende Energieressourcenknappheit

1. **Problem ignorieren, bzw. dessen Relevanz relativieren oder sogar bestreiten!**
2. **Anpassen an Klimaänderungen (engl. Adaptation)**
3. **Aktive Klimabeeinflussung (engl. Geoengineering)**
4. **Vermeiden der Klimaänderungen (engl. Mitigation) bzw. Reagieren auf Energieressourcenknappheit**

## Prognose der weltweiten Rohölförderung bis 2080

„The Looming Oil Crisis Could Arrive Uncomfortably Soon....“

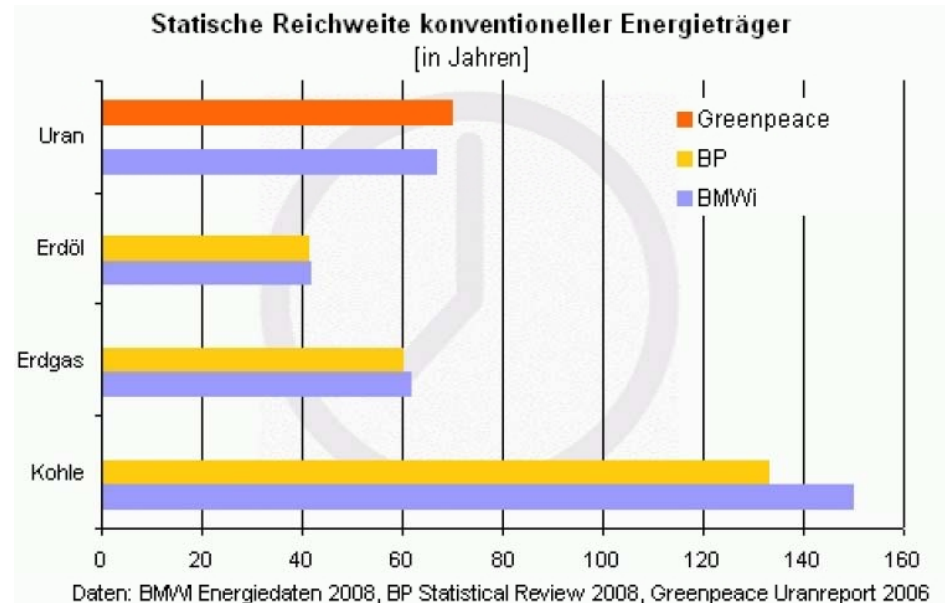
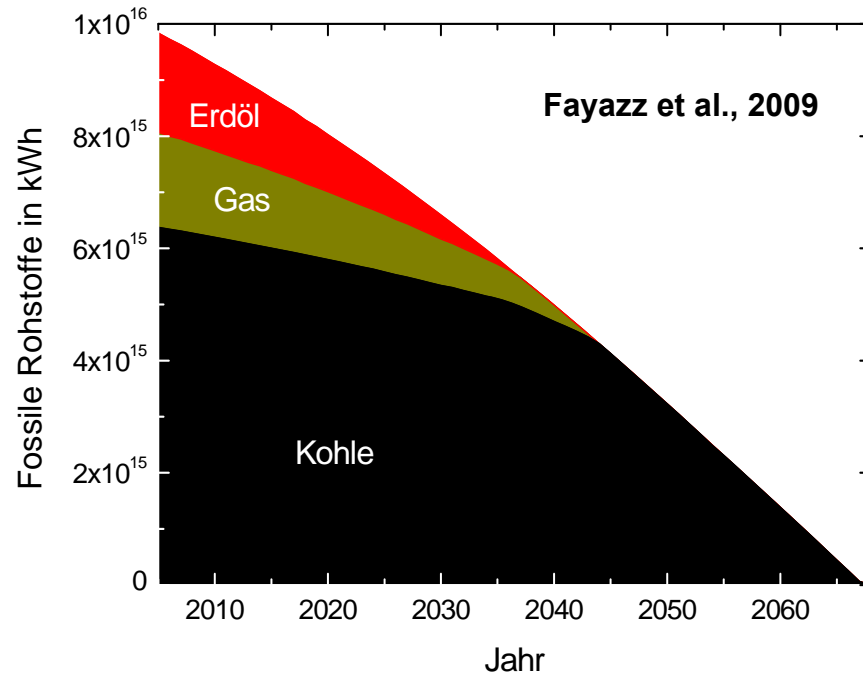


... due to oil demand larger than supply !

Sooner or later. The less oil left to be pumped from the ground, the earlier world production reaches a peak. In a new analysis, only the earliest, low-resource peak looks reliable.

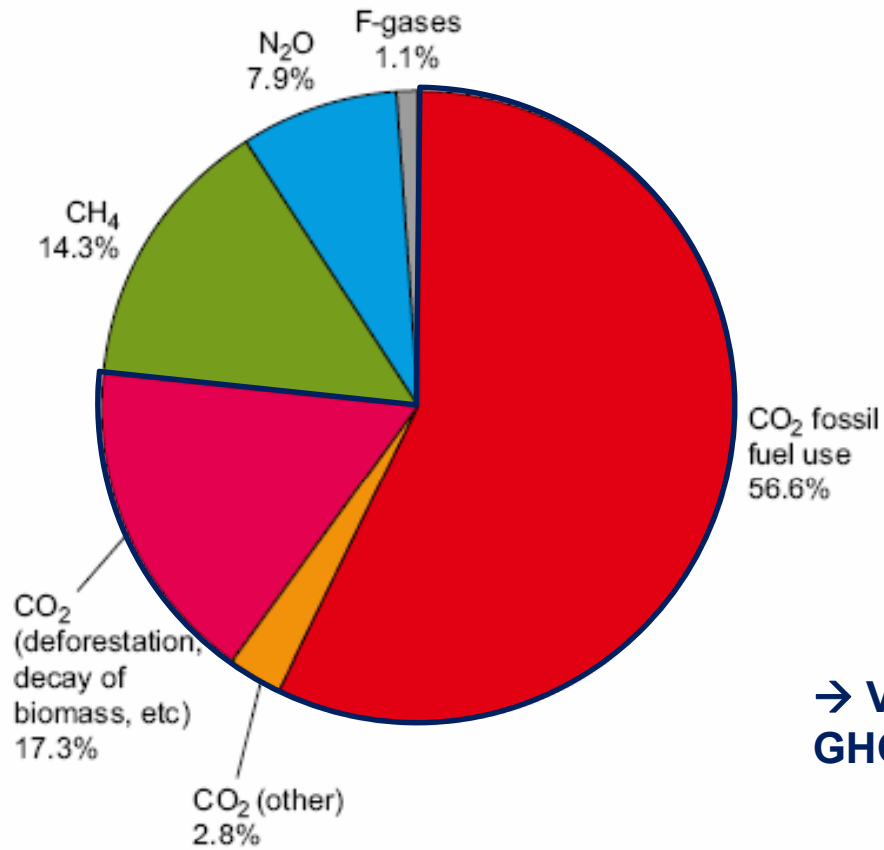
A. Kerr, Science, 316, 351, 2007

## Reichweite fossiler Energieträger (dynamisch)



→ Die ‚Reichweite‘ konventioneller Energieträger ist umstritten, aber wohl vor allem eine Funktion der (ständig steigenden) Nachfrage und des (tendenziell fallenden) Angebotes und daher des Preises, den die Kunden bezahlen wollen bzw. können!

# Globale Treibhausgasemissionen

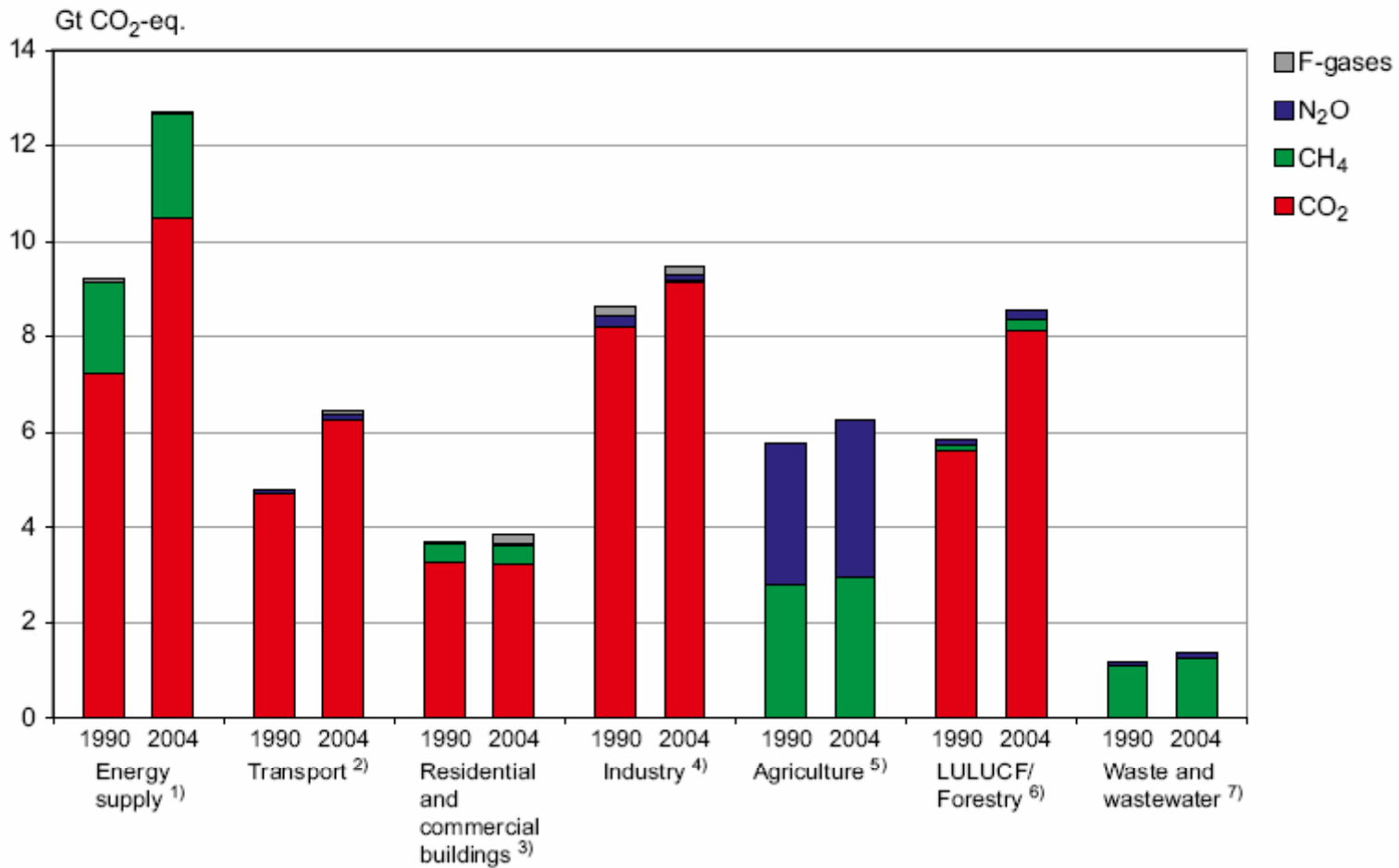


→ Vortrag heute: 76.7 % der GHG Emissionen (CO<sub>2</sub>)

**Figure TS.1b:** Global anthropogenic greenhousegas emissions in 2004 [Figure 1.1b].

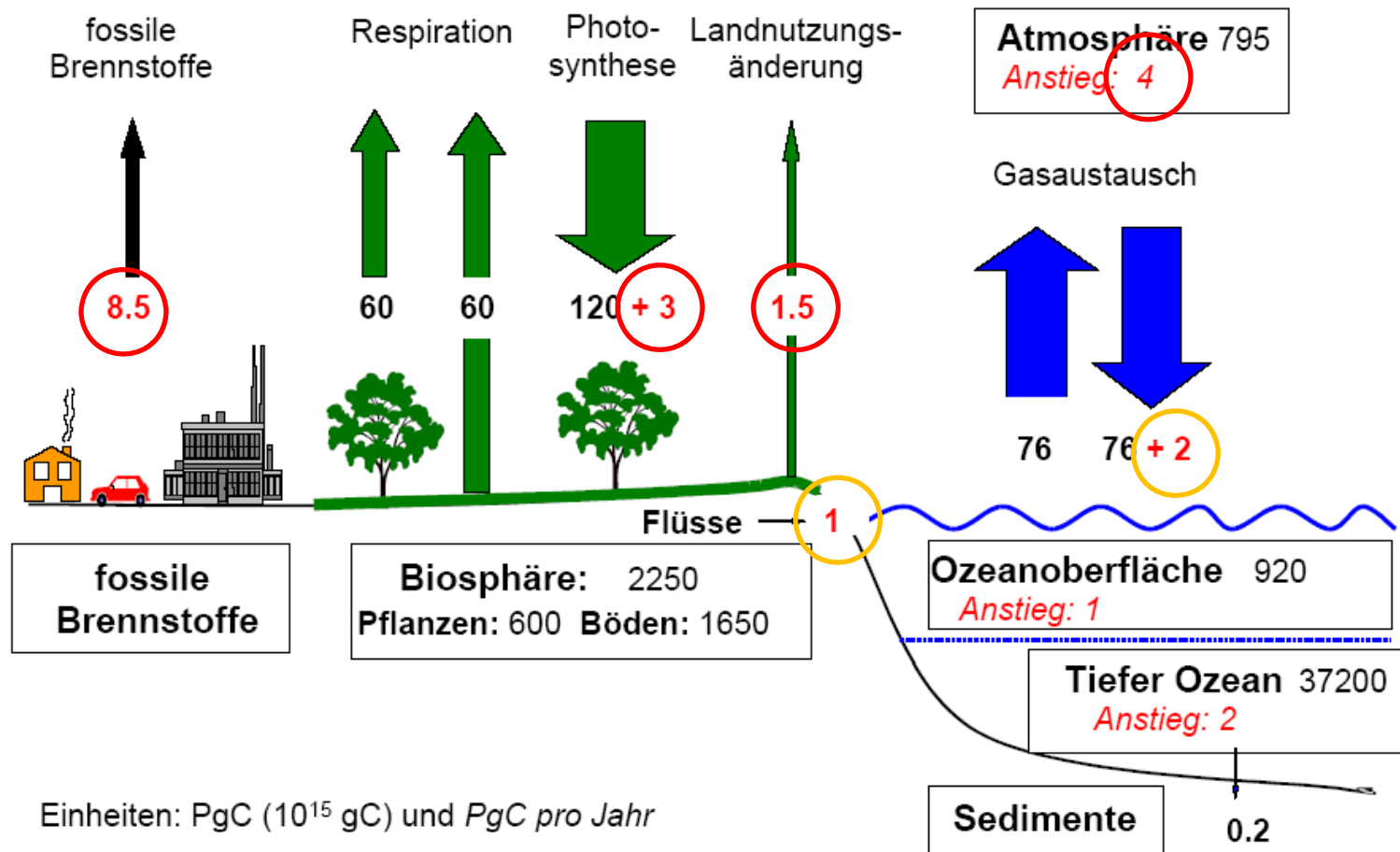
IPCC, WGIII, 2007

# Globale Treibhausgasemissionen



IPCC, WGIII, 2007

# Globaler CO<sub>2</sub> Kreislauf (2008)



Ingeborg Levin, pers. Mitteilung, 2010

## Globaler CO<sub>2</sub> Kreislauf (2000 – 2005) und CO<sub>2</sub> Emissionsgerechtigkeit

Eine Stabilisierung der atmosphärischen CO<sub>2</sub> Konzentration erfordert:

$$\Sigma \text{ Quellen} = \Sigma \text{ Senken}$$

also

Nettoquellen (+) bzw. (-) Senken:

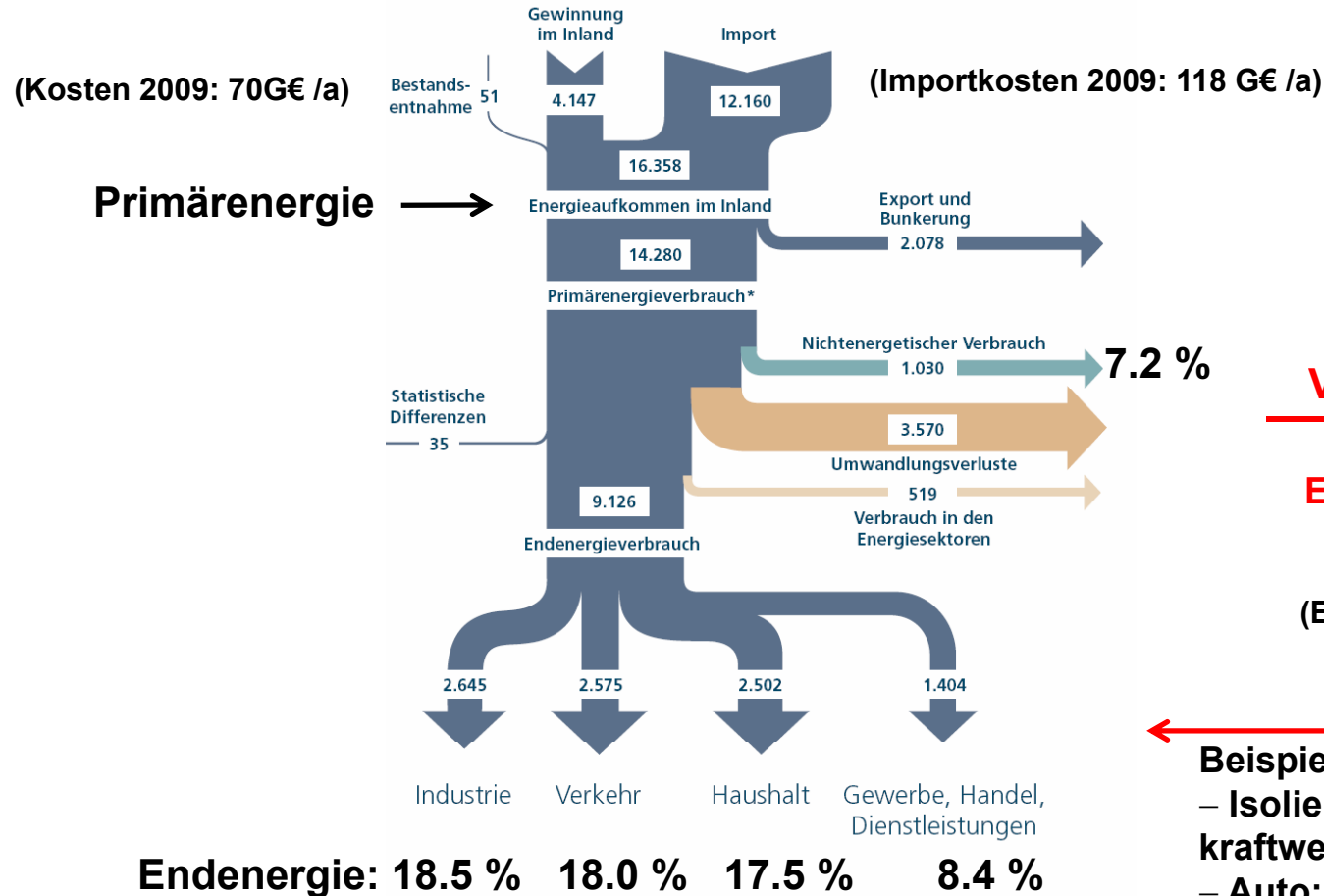
(1) Verbrennen fossilen Kohlenstoffs:	+ 8.5 GtC/a
(2) Landnutzungsänderung (*):	+ 1.5 GtC/a
(3) Aufnahme im tiefen Ozean (*):	- 2 GtC/a
(4) Atmosphärischer Anstieg:	- 4 GtC/a
(5) Netto Photosynthese (*):	- 3 – 0 GtC/a
(6) Zufluss durch Flüsse:	-1 GtC/a
Bilanzsumme:	0 bis + 3.0 GtC/a

(\*) unsicher

- Um die atmosphärische CO<sub>2</sub> Konzentration zu stabilisieren darf die Menschheit etwa **2 - 3 GtC/a** freisetzen, unterstellt alle anderen Faktoren im Klimasystem bleiben gleich.
- Im Sinne einer globalen **Emissionsgerechtigkeit** sind das für jeden Erdbewohner **0.3 – 0.45tC/a**, oder **1.1 – 1.65t<sub>CO2</sub>eq/a**!
- Daher sollte die deutsche CO<sub>2</sub> Emission mittelfristig (~2050) etwa **90 - 135 Mt<sub>CO2</sub> eq/a** (heute **832 Mt<sub>CO2</sub> eq/a**) betragen!

# Deutscher Primärenergieverbrauch, 2008

Energieflussbild 2008  
für die Bundesrepublik Deutschland  
in Petajoule ( $10^{15}$  J)



**Verluste 28.6 %!**

$$\text{Energieeffizienz } \epsilon = \frac{\text{Endenergie}}{\text{Endenergie} + \text{Verluste}} = 0.69$$

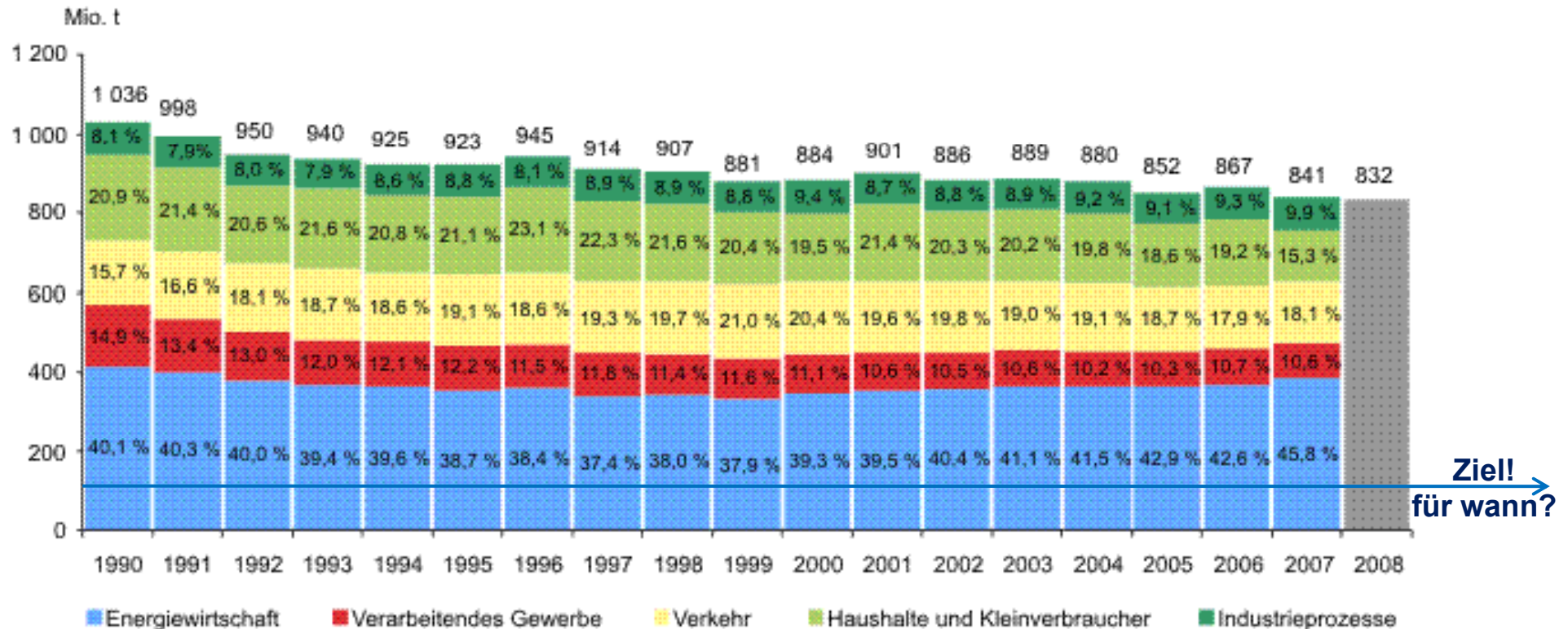
**Beispiele:**

- Isoliert stehende (Strom-)kraftwerke:  $\epsilon = 0.35 - 0.44$
- Auto:  $\epsilon = 0.3 - 0.35$

Der Anteil der erneuerbaren Energieträger am Primärenergieverbrauch liegt bei 8,7 %.  
\* Alle Zahlen vorläufig/geschätzt.  
29,308 Petajoule (PJ)  $\hat{=}$  1 Mio. t SKE  
Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 09/2009

**Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, 2009**

# Deutsche CO<sub>2</sub> Emissionen nach Quellkategorie



**Kohlendioxidemissionen:** ohne Landnutzung, Landnutzungsänderung und Forstwirtschaft

**2008:** Vorläufige Angabe auf Grundlage vereinfachter Berechnungen

**Verkehr:** ohne land- und forstwirtschaftlichen Verkehr

**Haushalte und Kleinverbraucher:** mit land- und forstwirtschaftlichem Verkehr sowie Militär

**Lösemittel und andere Produktverwendung:** Die Emissionen dieser Quellgruppe können in der Grafik nicht ausgewiesen werden und machen 0,2 % bis 0,3 % aus

**Quelle:** Umweltbundesamt, Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen seit 1990, Emissionsentwicklung 1990-2007 (Endstand 12.11.2008) und Presseinformation 16/2009 vom 29.03.2009

**Quelle: Bundesumweltamt, 2009**

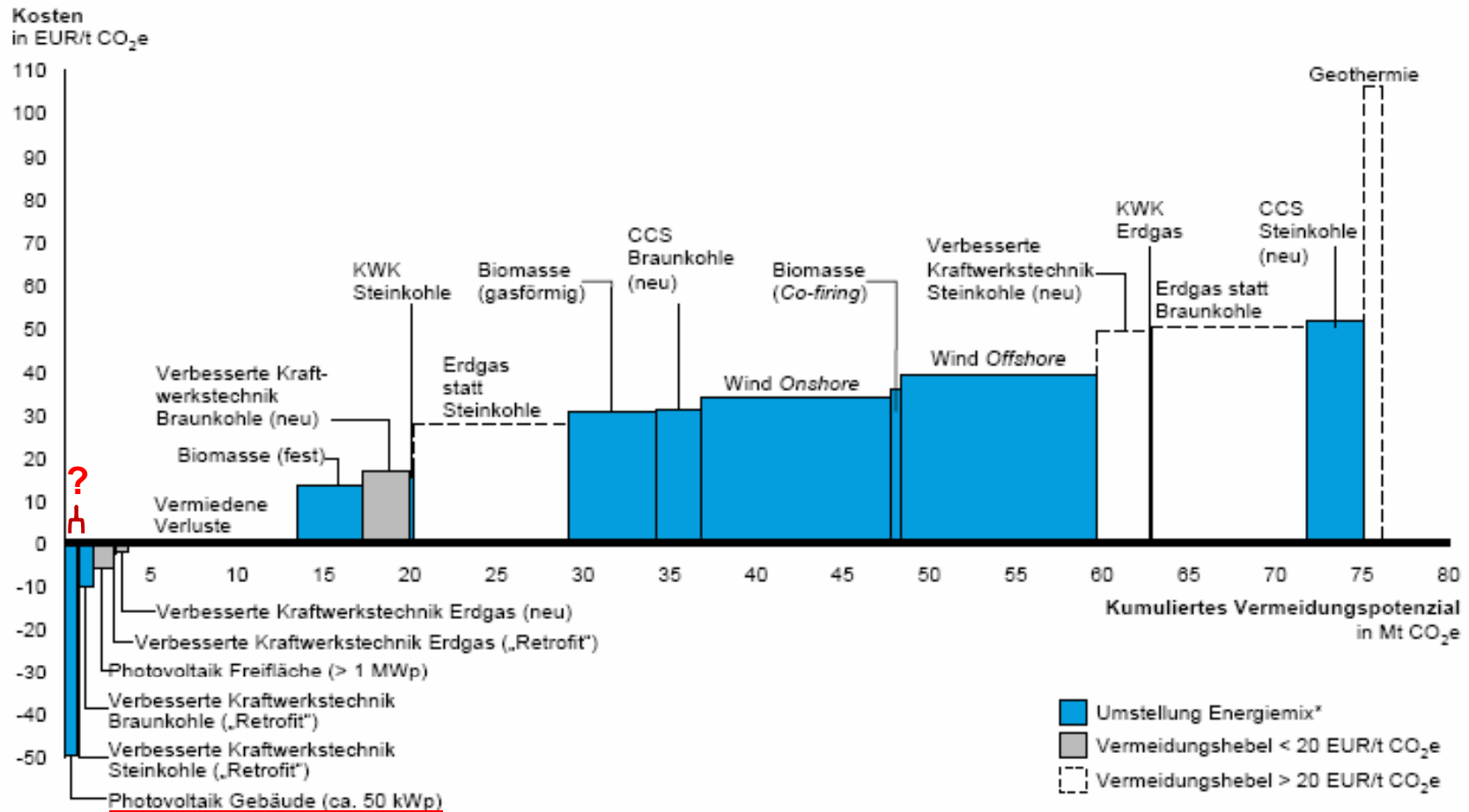
## Wie hoch sind die CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten nach Quellkategorie?

- (1) Energieversorgung (Stromwirtschaft)**
- (2) Industrie**
- (3) Gebäuden&Haushalt**
- (4) Transport**

# CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten der Energieversorgung

## Energiesektor: Vermeidungskostenkurve – Deutschland 2020\*

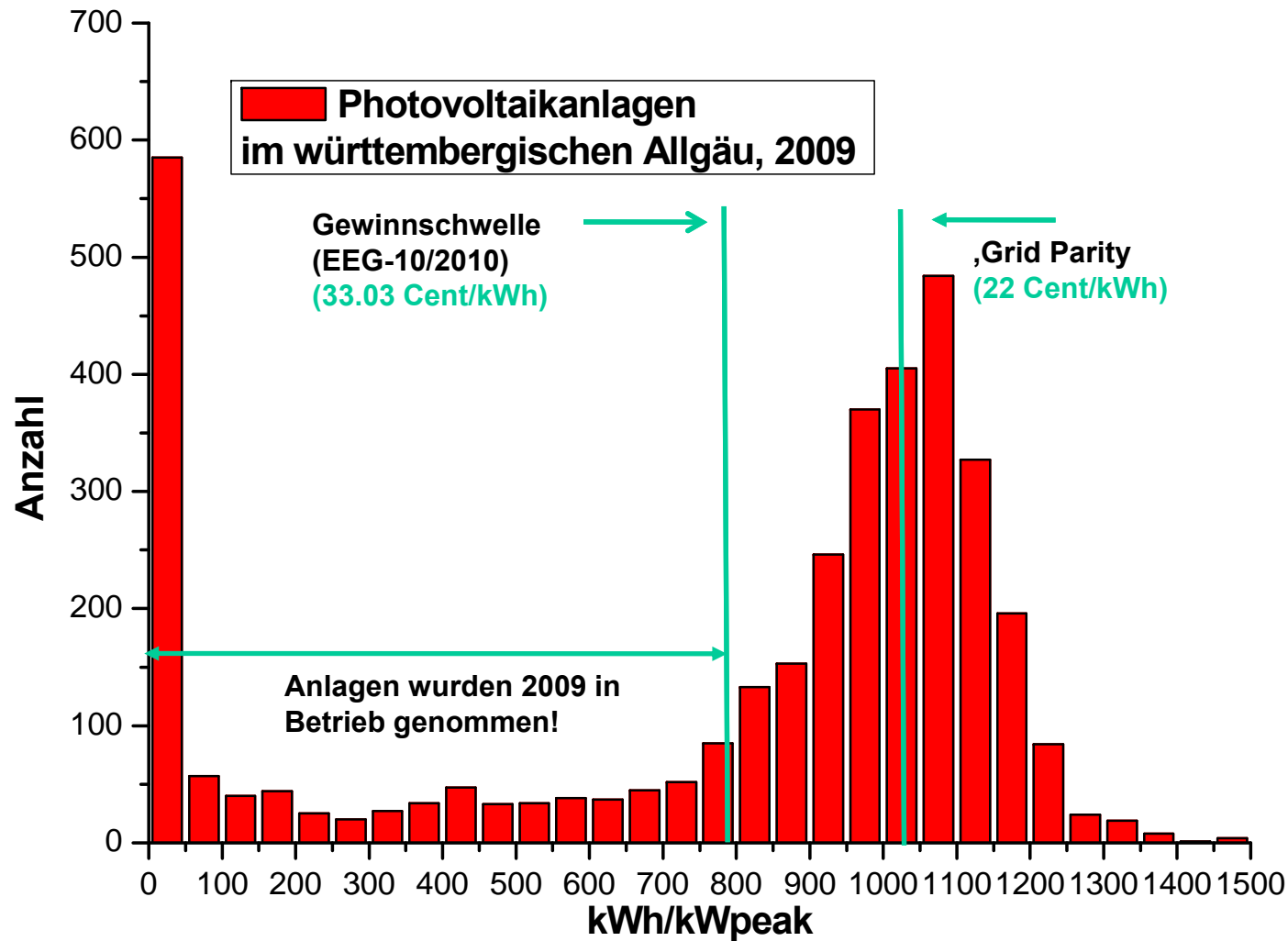
ENTSCHEIDER-  
PERSPEKTIVE  
BASISSZENARIO 2020



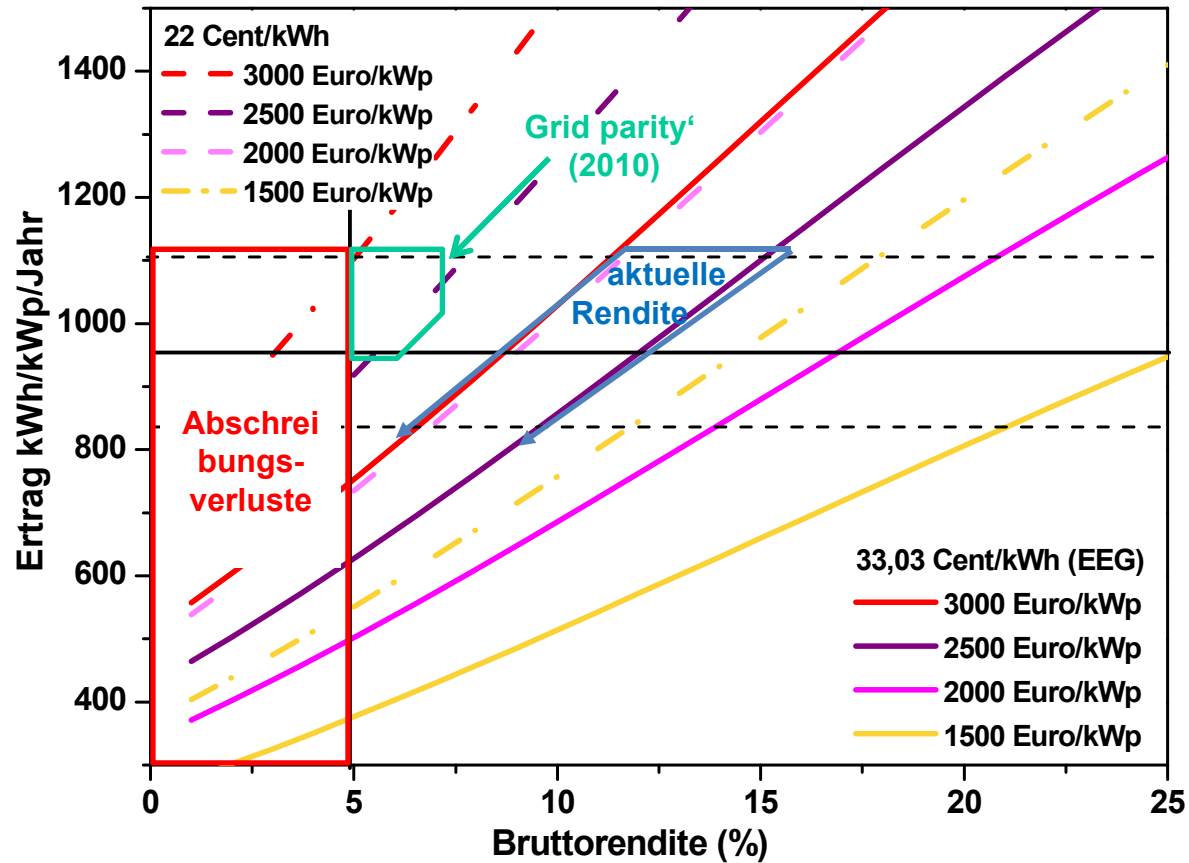
\* Bei Beibehaltung Kernkraftausstieg und unter Berücksichtigung von Fördermitteln für erneuerbare Energien (EEG)

Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Energie

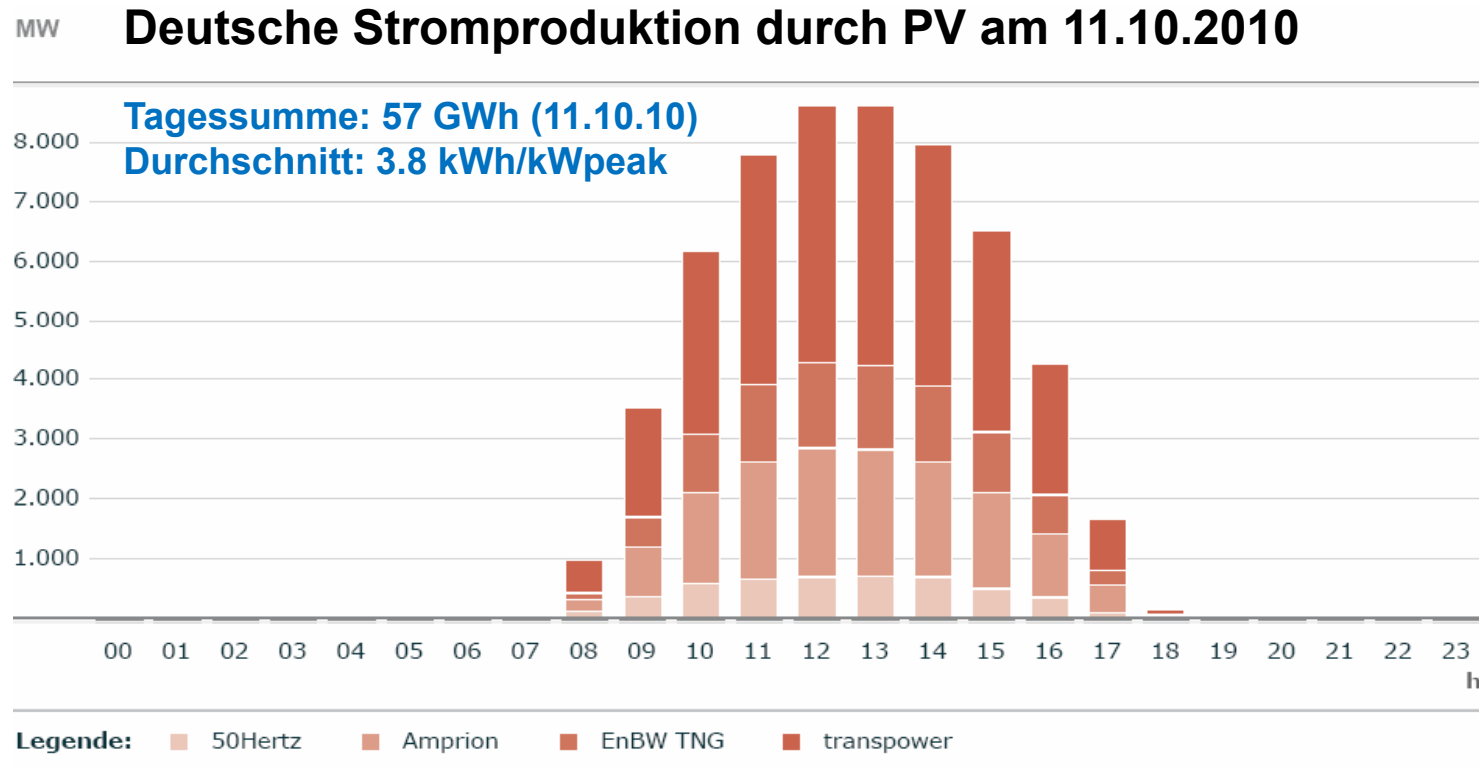
# CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten durch PV Anlagen: Spezifische Jahresproduktion



# Stromproduktion durch PV Anlagen: Rentabilität aus Entscheiderperspektive



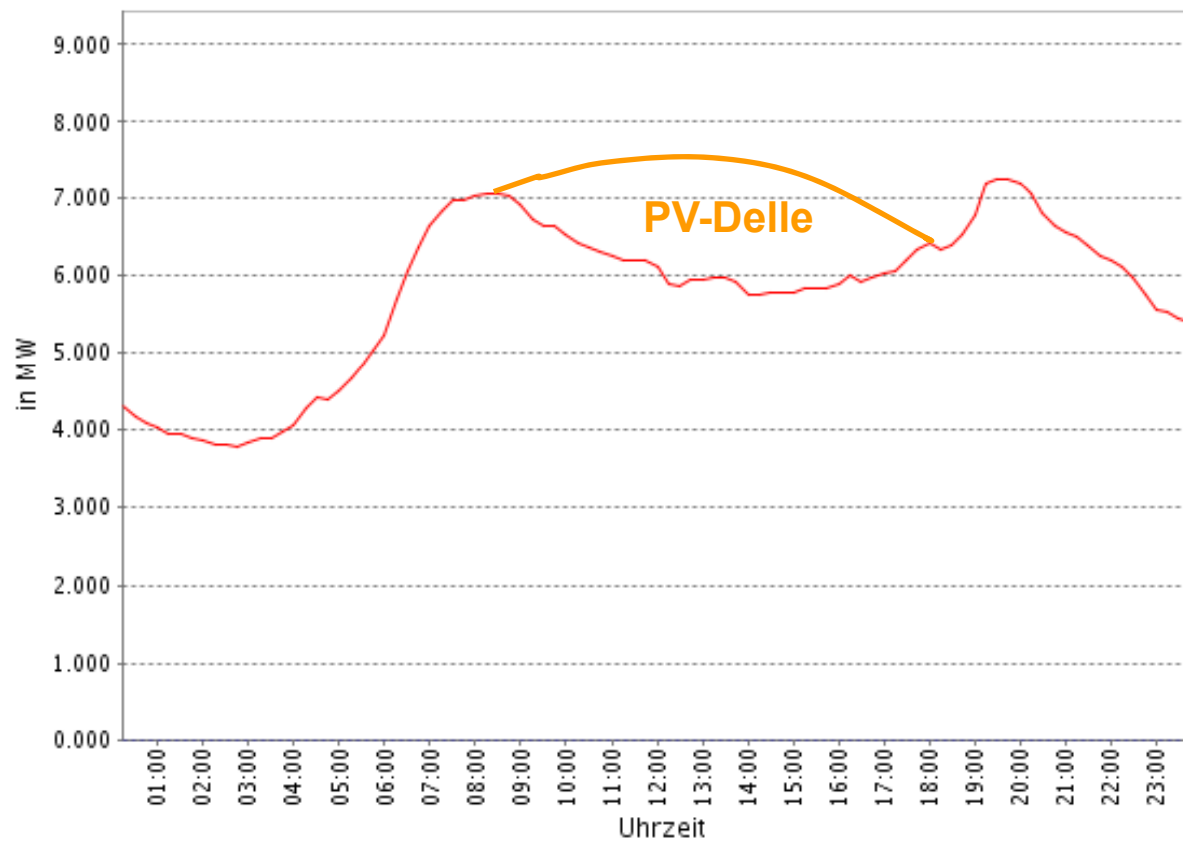
## Stromproduktion durch PV Anlagen: CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten



- PV Produktion (2009): 6.578 TWh (1.2%)
  - Erwartete PV Produktion (2010): 10.8 TWh (1.9%)
  - Nettoerstattung (2009): 2419 M € (0.36 €/kWh)
  - Vermiedene CO<sub>2</sub> Emissionen (2009): 3.68 Millionen tCO<sub>2</sub>
- CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten: ~ 657 €/tCO<sub>2</sub> (Schnitt über alle Altanlagen bis Ende 2009)
- CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten in Süddeutschland bei heutigen PV Preisen: ~ 194 €/tCO<sub>2</sub>  
(Diplomarbeit Derya N. Erol zusammen mit dem KIT-Ka)

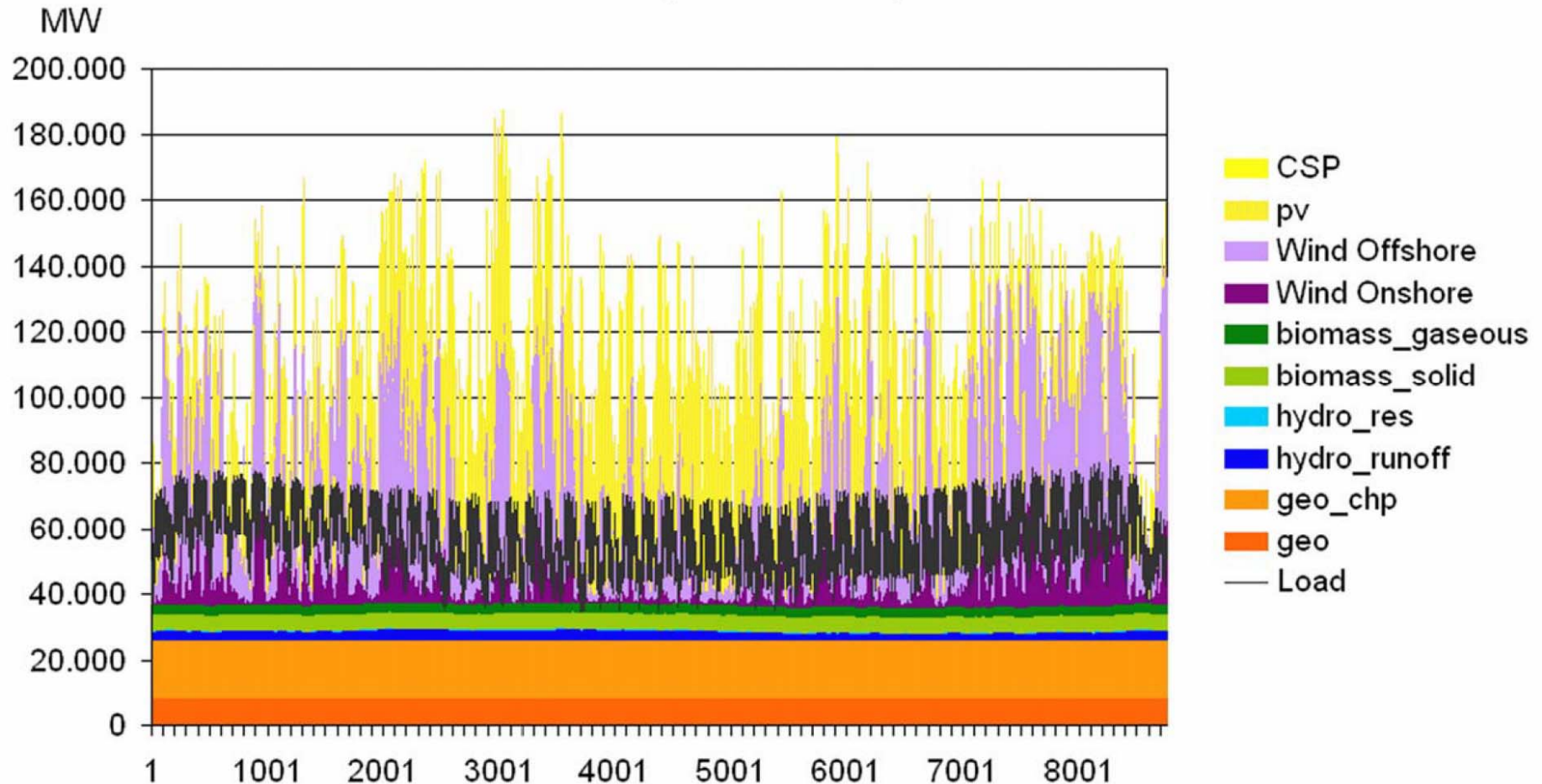
# Stromproduktion durch PV Anlagen: Variable vertikale Netzlast

## Vertikale Netzlast der EnBW am 11.10.2010



# Energie- bzw. Stromversorgung: Versorgungssicherheit

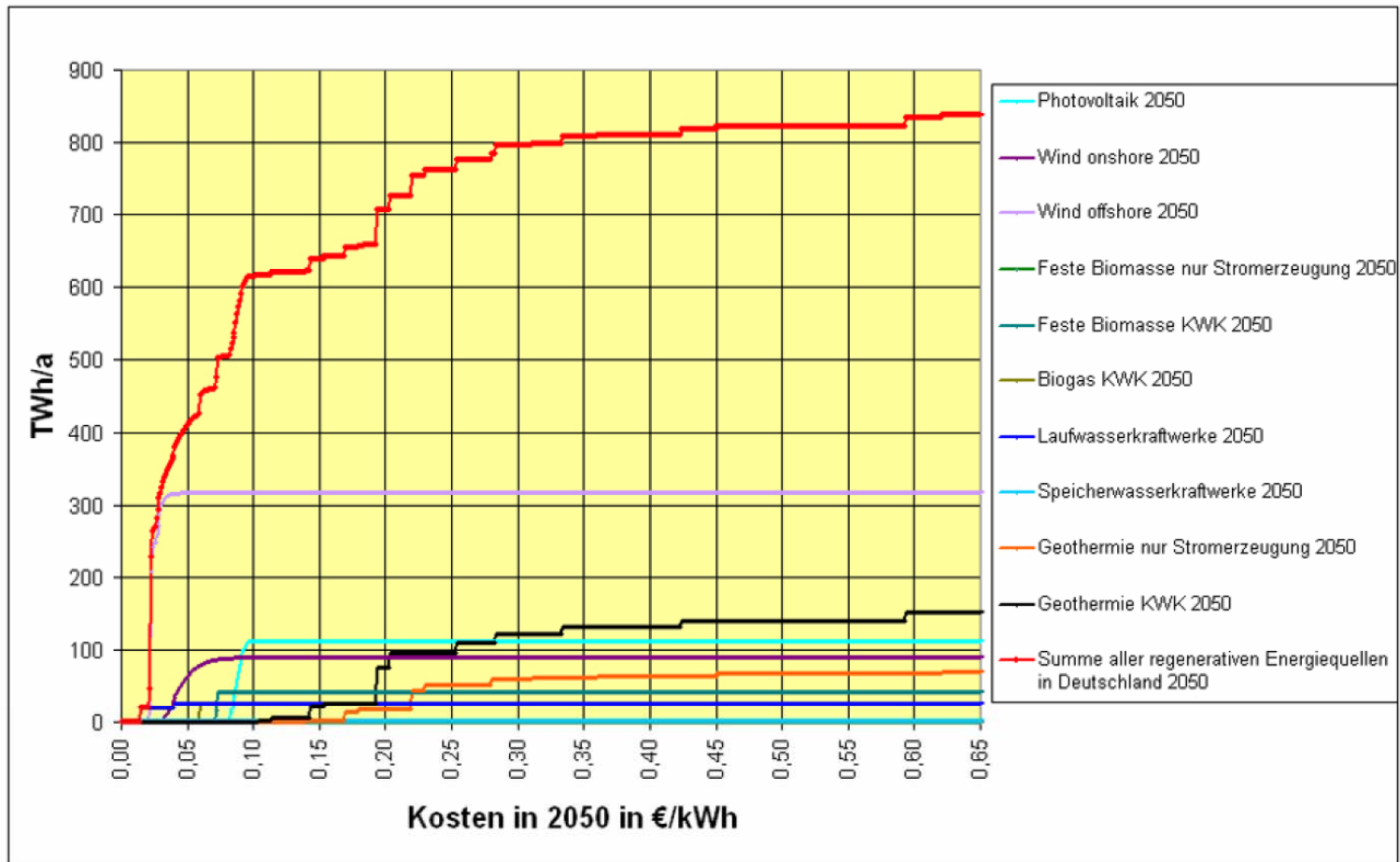
Lastverlauf und stündliches regeneratives Erzeugungspotenzial in MW  
(DE bei 500 TWh/a)



Quelle: SRU Sachverständigenrat Umweltfragen, 100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar, 15-2010

# Regenerative Energie- bzw. Stromversorgung: Spezifische Kosten

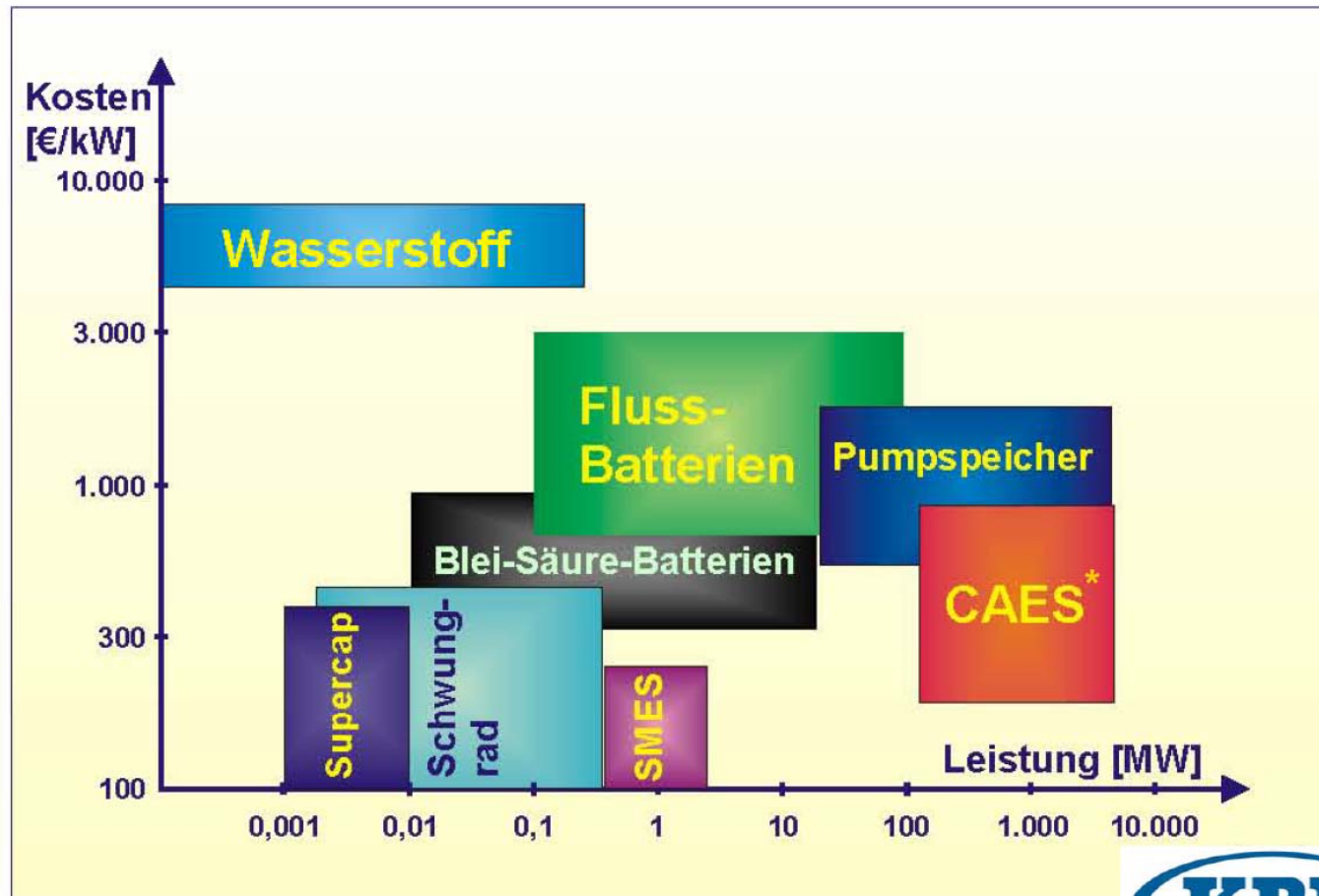
Potenzial der Elektrizitätserzeugung  
aus regenerativen Energiequellen in Deutschland in TWh/a  
als Funktion der Kosten pro kWh



Quelle: SRU Sachverständigenrat Umweltfragen, 100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar, 15-2010

## Regenerative Energie- bzw. Stromversorgung: Speicher

# Spezifische Investitions-Kosten



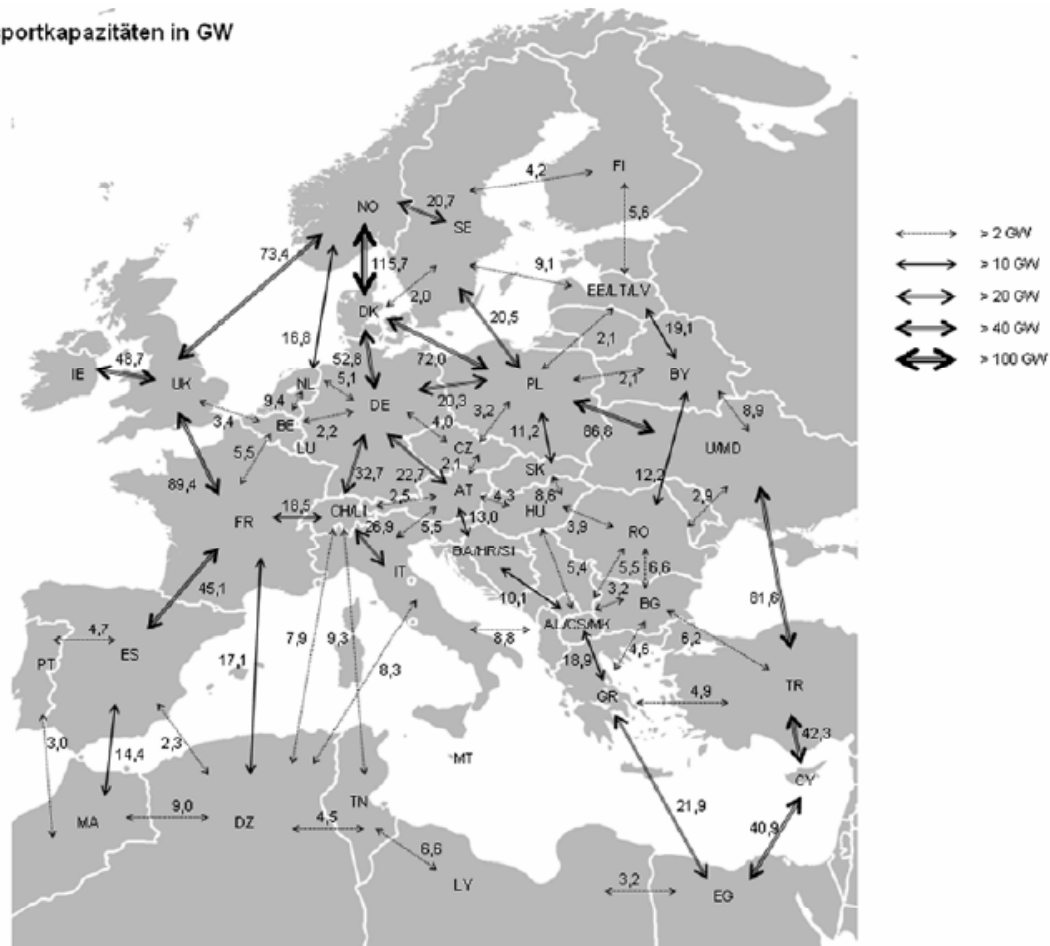
07 Juni 2005  
Universität Hannover

\* konventionelle Ausfüll



# Regenerative Energie- bzw. Stromversorgung: Netze

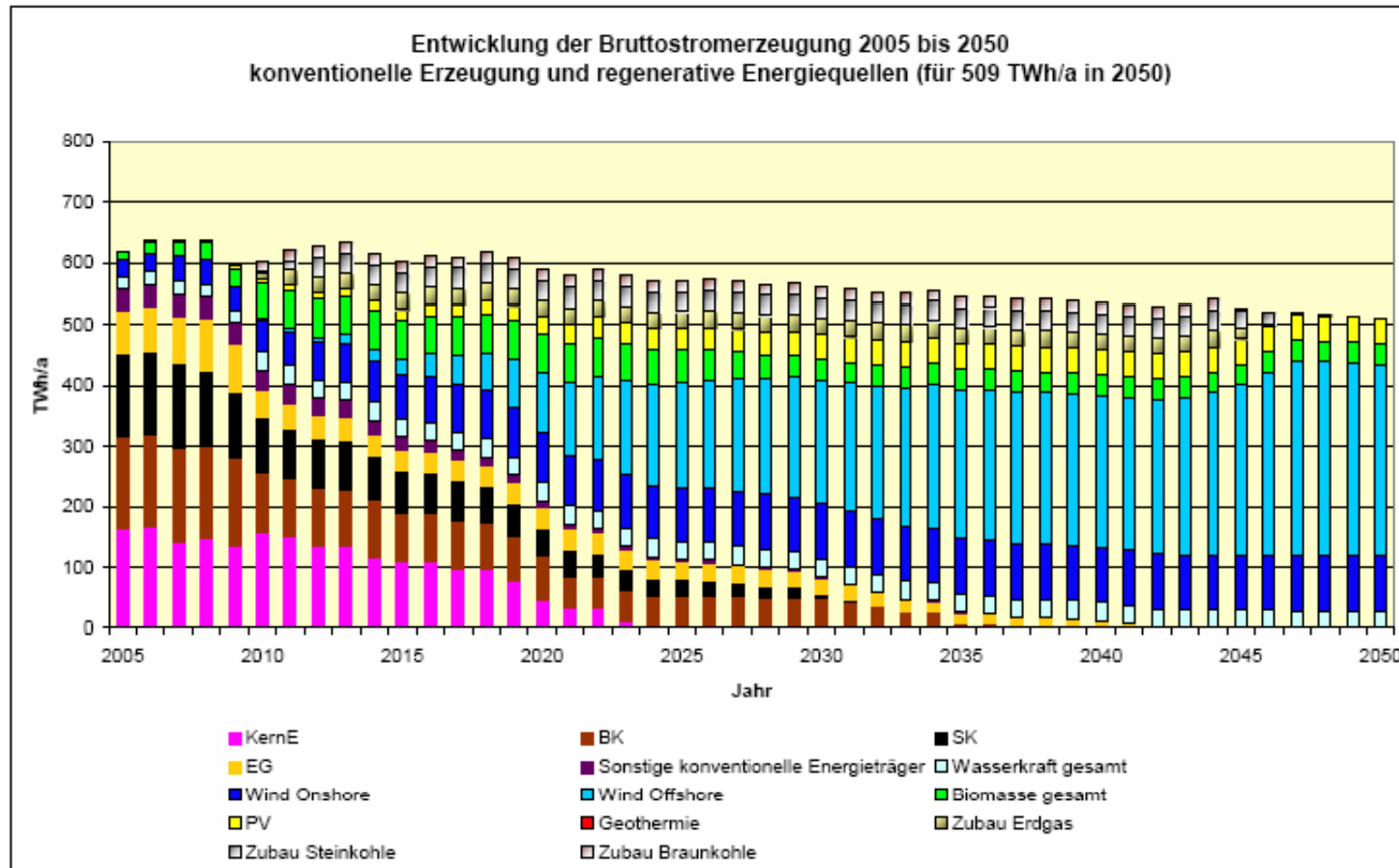
Maximale Transportkapazitäten in GW  
(Szenario 3a)



SRU/Stellungnahme Nr. 15-2010/Abb. 4-22; Datenquelle: DLR 2010b

**Quelle: SRU Sachverständigenrat Umweltfragen, 100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar, 15-2010**

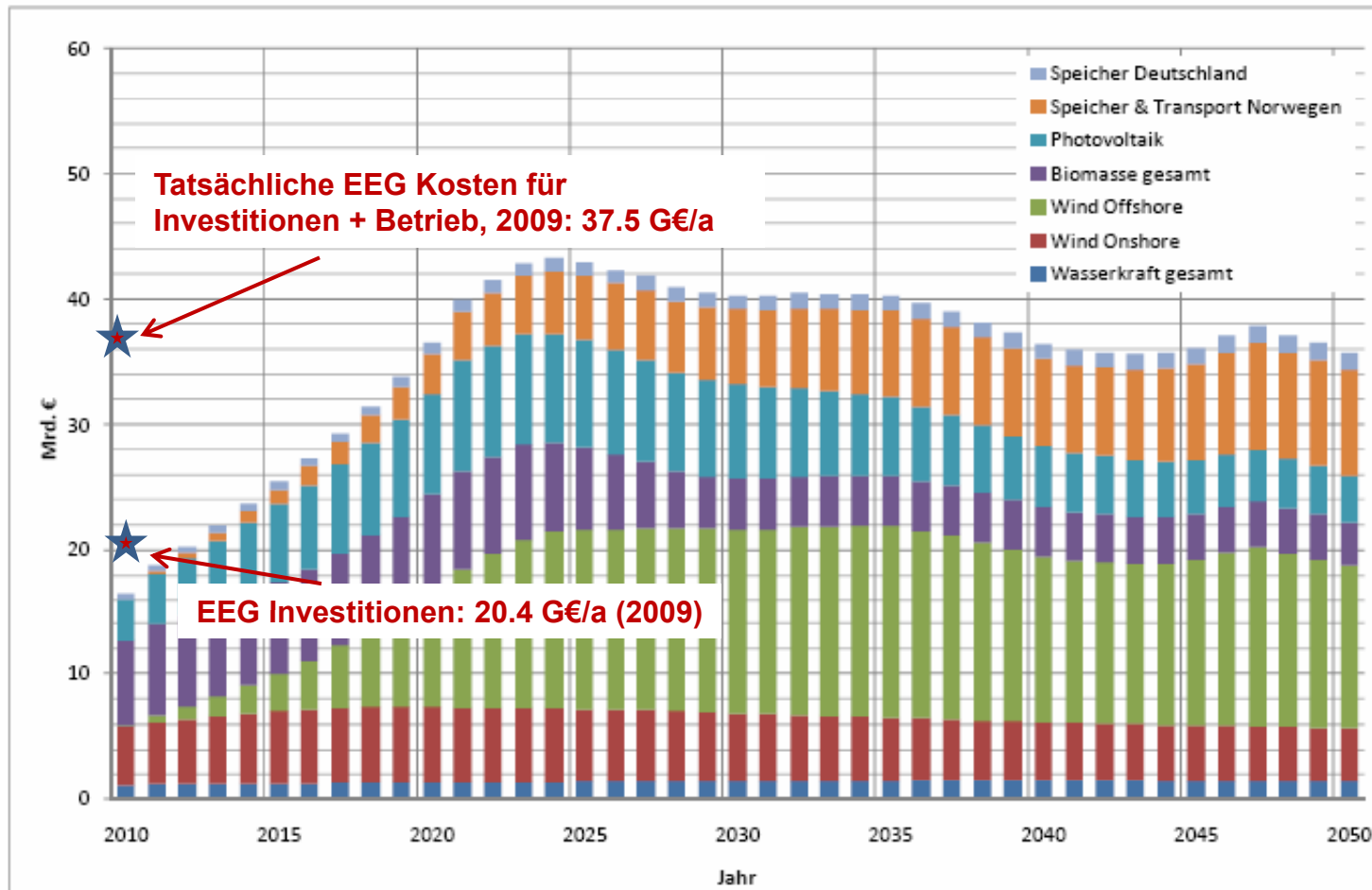
# Regenerative Energie- bzw. Stromversorgung: Erzeugungsportfolio



Quelle: SRU Sachverständigenrat Umweltfragen, 100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar, 15-2010

# Regenerative Energie- bzw. Stromversorgung: Kosten

Entwicklung der Gesamtkosten für regenerative Stromerzeugung (Szenario 2.1.a)



Quelle: SRU Sachverständigenrat Umweltfragen, 100% erneuerbare Stromversorgung bis 2050: klimaverträglich, sicher, bezahlbar, 15-2010

## Regenerative Energie- bzw. Stromversorgung: Probleme&Schlußfolgerung

- (1) Ausreichendes regeneratives Energiepotential ist vorhanden (SRU, Studie 15-2010)**
- (2) Kosten (SRU, Studie 15-2010):**
  - 10 cent/kWh bei 620 TWh/a
  - 60 cent/kWh bei 850 TWh/a
- (3) Lastgang & Versorgungssicherheit**
  - (1) Eine Überkapazität der Energieerzeugungsanlagen ist erforderlich (i.e. Faktor 2 bis 4 der mittleren Leistung von 63 GW in D, je nach Szenario)**
  - (2) Strom- und Energiespeicher (Größe abhängig vom Szenario, u.a. besitzt Deutschland eine Pumpspeicherkapazität von 0.04 TWh, aber z.B. Norwegen eine Kapazität von 84 TWh)**
  - (3) Smart Grid, bzw. Preistransparenz beim Kunden u.a. durch Mitteilung des variablen Strompreises über Funk; geschätztes Regel- (~ 6 GW), bzw. Speicherpotential 0.5-1 TWh (zum Vergleich Akku's bei Elektromobilität 0.6-0.8TWh)**

### Schlußfolgerung:

**Der verstärkte Nutzung regenerativer Energien erfordert**

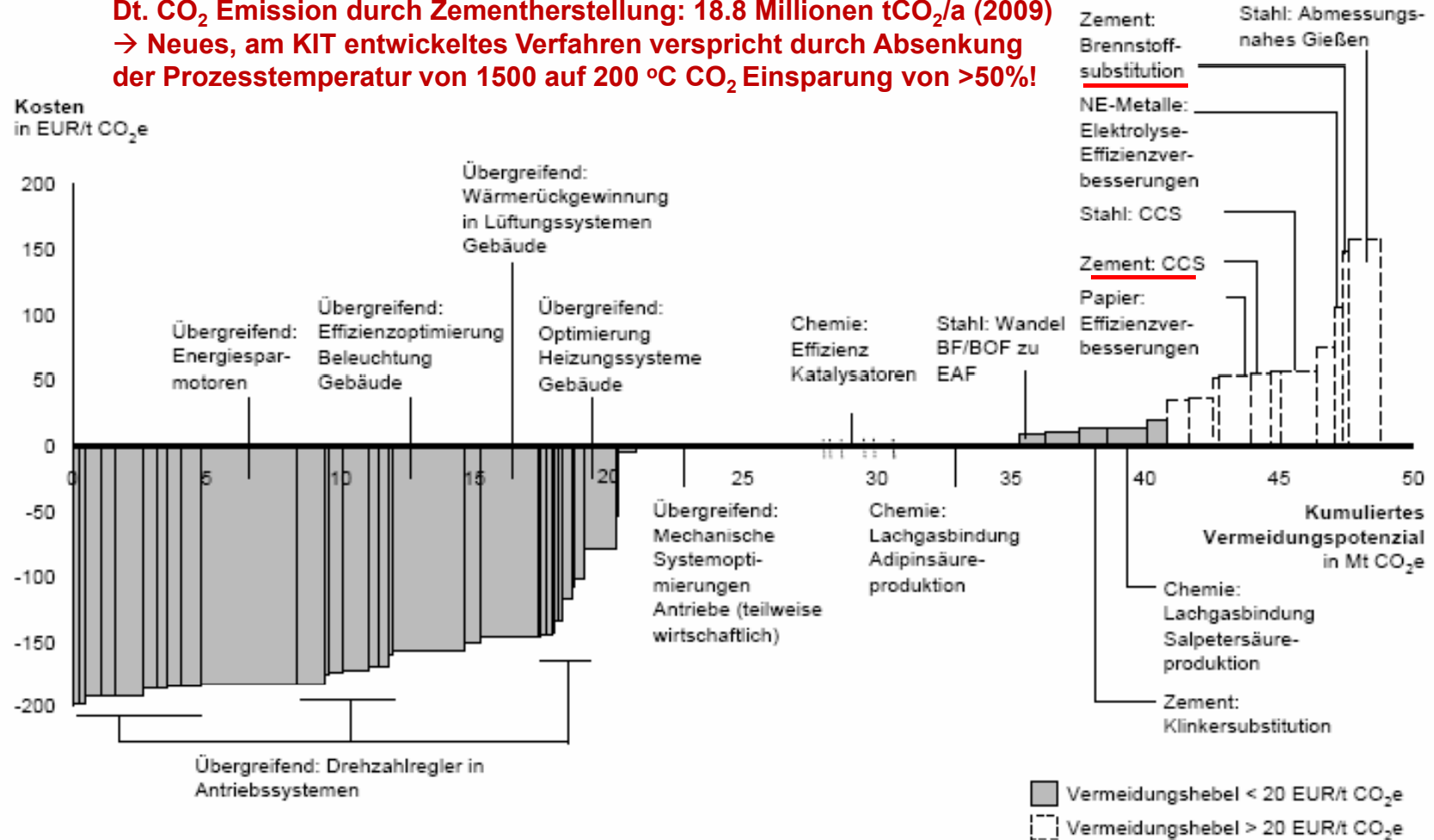
- **Ausbau neuer Energieerzeugungsanlagen**
- **bessere Regelung, u.a. Anpassung des Verbrauches an die Produktion**
- **Strom-/Energiespeicher (Pumpspeicher, CAES, ..)**
- **Ausbau der Netze, u.a. eines europäischen Gleichstromnetzes**

# CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten der Industrie

## Industriesektor: Vermeidungskostenkurve – Deutschland 2020

ENTSCHEIDER-PERSPEKTIVE

**Dt. CO<sub>2</sub> Emission durch Zementherstellung: 18.8 Millionen tCO<sub>2</sub>/a (2009)  
 → Neues, am KIT entwickeltes Verfahren verspricht durch Absenkung der Prozesstemperatur von 1500 auf 200 °C CO<sub>2</sub> Einsparung von >50%!**

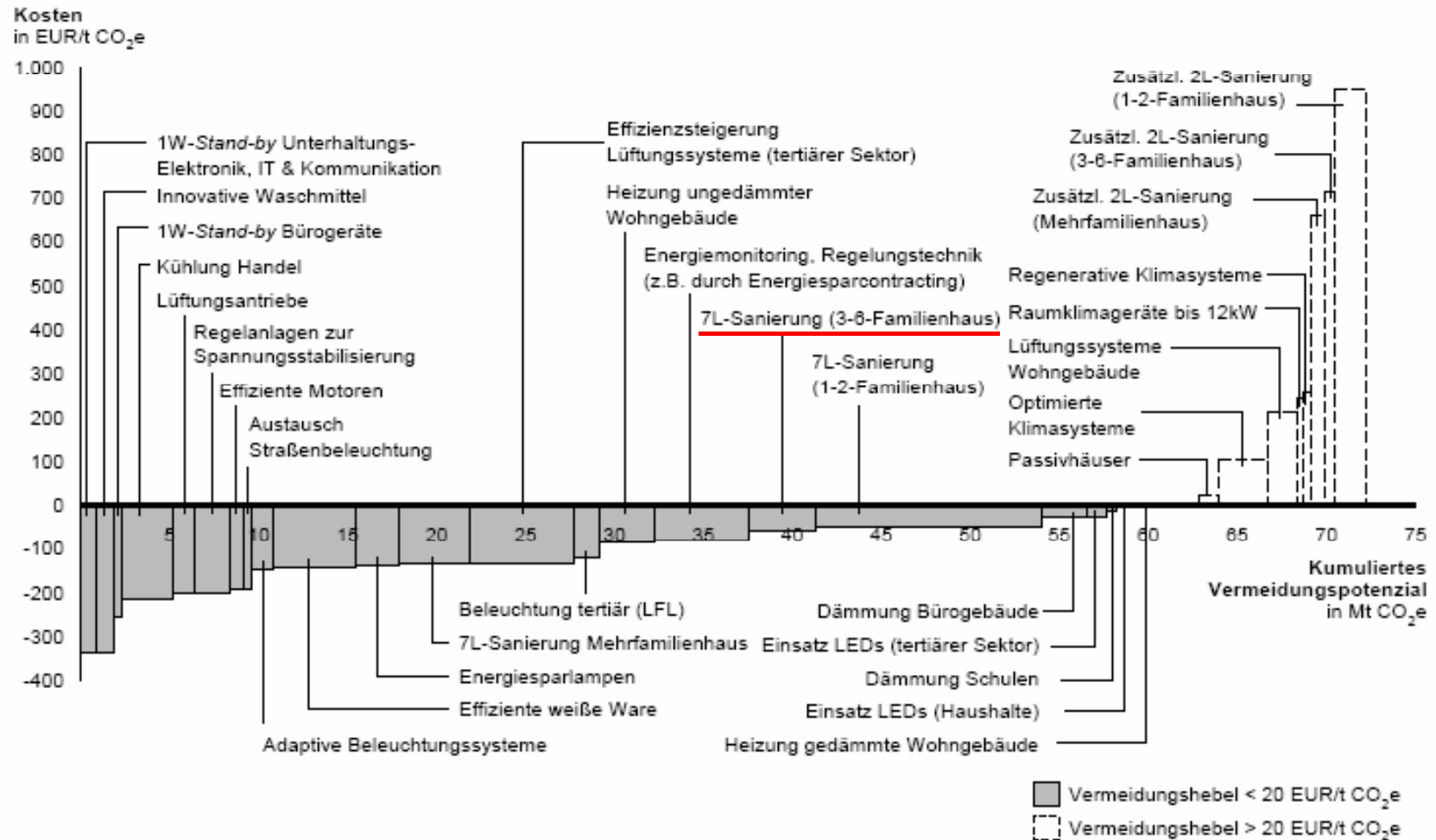


Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Industrie

# CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten bei Gebäuden&Haushalt

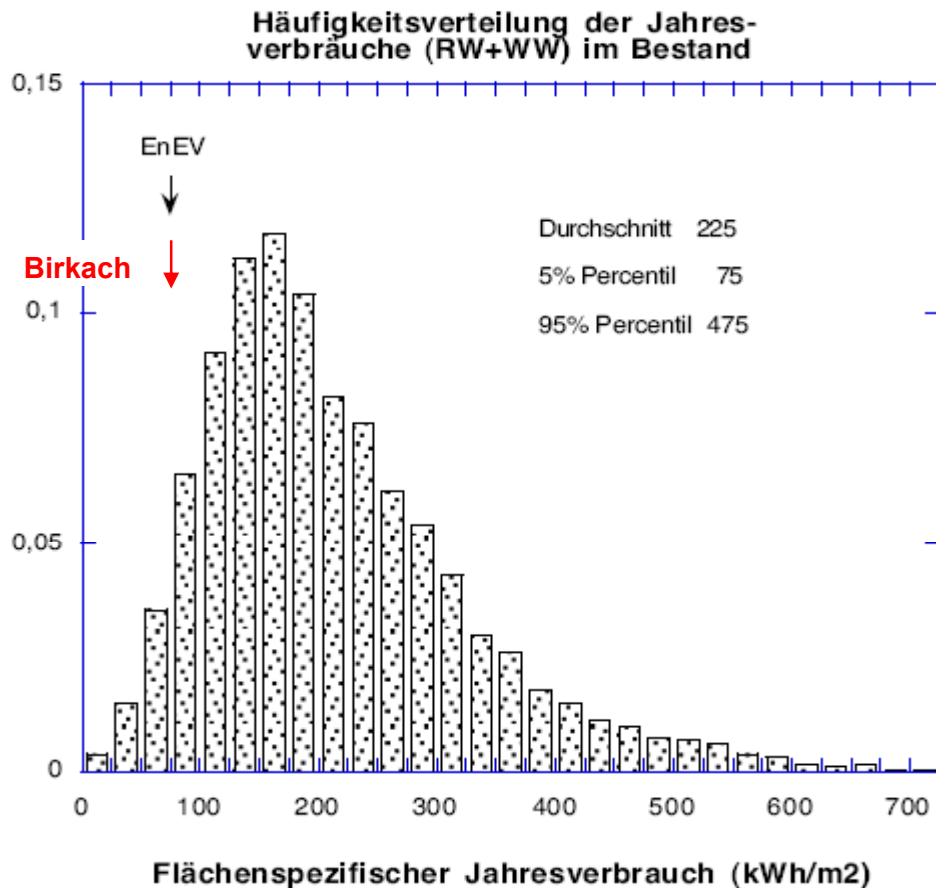
## Gebäudesektor: Vermeidungskostenkurve – Deutschland 2020

ENTSCHEIDER-PERSPEKTIVE



Quelle: Studie „Kosten und Potenziale der Vermeidung von Treibhausgasemissionen in Deutschland“ von McKinsey & Company, Inc. im Auftrag von „BDI initiativ – Wirtschaft für Klimaschutz“ – AG Gebäude

# CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten bei Gebäuden



*aus Klimaschutz und Energieversorgung in Deutschland 1990 – 2020 Studie; Eine Studie der DPG e. V., siehe auch M. Kleemann, FZ Jülich, Aktuelle Einschätzung der CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale im Gebäudebereich, Gutachten im Auftrag von Dena und BMWA, Jülich, Nov. 2003.*

## Energieeinsatz für ein san. 4 Fam. Haus (398 m<sup>2</sup>) in Birkach /Allgäu

- Gas: 27980 kWh/a
- Solar: 6800 kWh/a
- Holz: 7000 kWh/a

## Wärmeenergieverbrauch: 41780 kWh/a

- spez. Energieverbrauch: 105.5 kWh/m<sup>2</sup>/a
- fossile Quellen: 70.65 kWh/m<sup>2</sup>/a (66.96%)
- reg. Quellen: 34.85 kWh/m<sup>2</sup>/a (33.04%)
- EnEV: Niedrigenergiehäuser: 70 kWh/m<sup>2</sup>/a

## Nettostromverbrauch: 433 kWh/a

- Stromverbrauch: 7368 kWh/a
- Stromproduktion (PV): 6935 kWh/a

## CO<sub>2</sub> Emissionen:

- Wärme: 5,18 t /Jahr bzw. 130 kg/m<sup>2</sup>/a
- Strom: 242 kg/a

→ 0.8 t/Bewohner/a:

→ dt. Durchschnitt: 2.3t/EW/a

## CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten bei Gebäuden: Fakten&Schlußfolgerung

### (1) Wärmeversorgung (größter Posten im Energiebedarf):

- deutscher Durchschnitt ist heute ~ 215 kWh/qm/a (21.5 l/qm/a)
- Stand der Technik bei Altbauten ist < 70 kWh/qm/a (7l/qm/a)
- bei Neubauten ist Passivhausstandard notwendig 30 kWh/qm/a (3 l/qm/a)
- verstärkter Einsatz von KWK, Solarthermie und fester Biomasse (Holz)
- CO<sub>2</sub> Einsparpotential 57 Millionen tCO<sub>2</sub>/a (-6.8%) (mit negativen Kosten)

### Problem:

- derzeit sinkt der Energieeinsatz im deutschen Gebäudebestand um nur **1.2%/a**, notwendig wären aber **3%/a**!

### (2) Stromversorgung:

- Selbstversorgung mit Strom ist heute für Wohngebäude mit PV (oft) möglich (Energieplushaus)
- Stromverbrauch im Wärmesektor (Warmwasser, Kühlanlagen, Heizung mit Wärmepumpe, ...) muß (wg. Netzstabilität) und kann (wg. potentieller Speicherung und ‚Smart Grid‘ Lösungen) der variablen Stromproduktion aus regenerativen Energien angepasst werden!



## CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten bei Transport: Schlußfolgerung

- (1) CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten im Verkehr sind ohne strukturellen Wandel teuer (i.a. einen Faktor 3 – 10 höher als in allen anderen Bereichen), bzw. fast wirkungslos!**
  
- (2) Elemente des strukturellen Wandels im Transport sind:**
  - Ausbau des öffentliche Verkehrs mit neuen (integrierten) Mobilitätskonzepten (z.B. Fahrrad, öffentlicher Verkehr, Elektromobilität, .....**
  - Umbau des Gütertransports (Straße → Schiene, Wasser, Pipeline ..)**
  - Elektromobilität für Individualverkehr**
  - Einsatz von Biokraftstoffen für lange Strecken (Pkw) bzw. große Leistungen bei Lkw-, Schiffs- und Flugverkehr**

## CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten bei Transport: Elektromobile

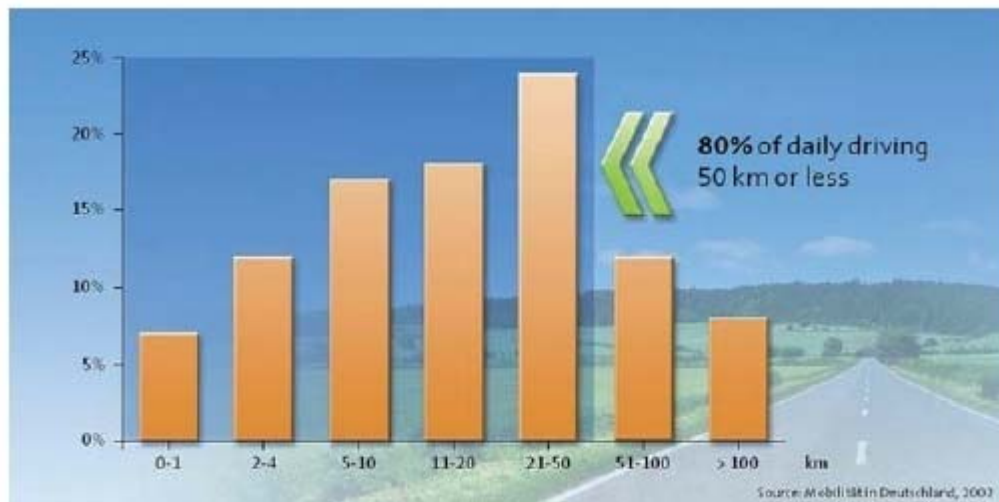


Fig. 4 Daily driving distances in Germany.

### Fakten:

- 90 % der Strecken bzw. 75 % Fahrleistung der PkWs sind kürzer als 100 km
- die jährliche Fahrleistung der 49.648.043 PkWs in D beträgt jeweils 13.400km
- konventionelle PkWs brauchen 7,35 l/100 km bzw. 73,5 kWh/100 km
- Elektromobile brauchen ~ 16 kWh/100 km

### Abschätzung des CO<sub>2</sub> Einsparpotential:

Energieeinsparpotential =  $0.75 \cdot 13400 \text{ km} \cdot (73.5 - 16) \text{ kWh}/100\text{km} \cdot 49.648.043$   
= 286 TWh = 1033 PJ

CO<sub>2</sub> Einsparpotential (-40%) = 60 Millionen tCO<sub>2</sub>/a

## Zusammenfassung&Schlußfolgerungen

- (1) Stabilisierung des menschengemachten Klimaantriebs erfordert bis 2050 u.a. eine Reduktion der deutschen CO<sub>2</sub> Emissionen von derzeit 830 Mt<sub>CO<sub>2</sub></sub>eq/a auf 90 - 135 Mt<sub>CO<sub>2</sub></sub>eq/a, also minus 695 - 740 Mt<sub>CO<sub>2</sub></sub>eq/a, also eine Reduktion von - 85 bis - 90 %.
- (2) Negative CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten haben derzeit ein Potential von 93 Mt<sub>CO<sub>2</sub></sub>/a (- 15%) und Vermeidungskosten < 20 \$ ein Potential ~ 139 Mt<sub>CO<sub>2</sub></sub>/a (- 21 %).
- (3) Weiteres Potential lässt sich nur durch höhere Kosten, bzw. einen strukturellen Wandel erzielen, vornehmlich
  - in der **Energieversorgung** durch Einsatz regenerativer Energien (Potential: ~ 350 Millionen t<sub>CO<sub>2</sub></sub>/a, also - 42%)
  - beim **Transport**, u.a. durch Elektromobilität, Massengüterverkehr und integrierte Verkehrskonzepte (Potential: 126 - 168 Mt<sub>CO<sub>2</sub></sub>/a, also - 15.1% bis - 20%)
  - im **Gebäudebereich** (Potential - 100 Mt<sub>CO<sub>2</sub></sub>/a, also - 12%)
  - in der **Industrie** (Potential < 20\$ 42 Mt<sub>CO<sub>2</sub></sub>/a, also - 5.1 %)

**Summe des Einsparpotentials: 74.1 – 79 % der CO<sub>2</sub> Emissionen**

## Beispiel: Kosten und Nutzen von PV Anlagen (Okt. 2010)

**Bezahler:**

**Stromkunde**

**39,11 cent/kWh**

**Nutznieser:**

**(1) Staat/Gesellschaft:**

**8.34 - 12.27 cent/kWh**

**(2) Anlagenbetreiber:**

**5.13 - 11.9 cent/kWh**

**(3) Anlagenproduzenten/  
E-Versorger/Kapitalgeber:**

**19 - 24 cent/kWh**

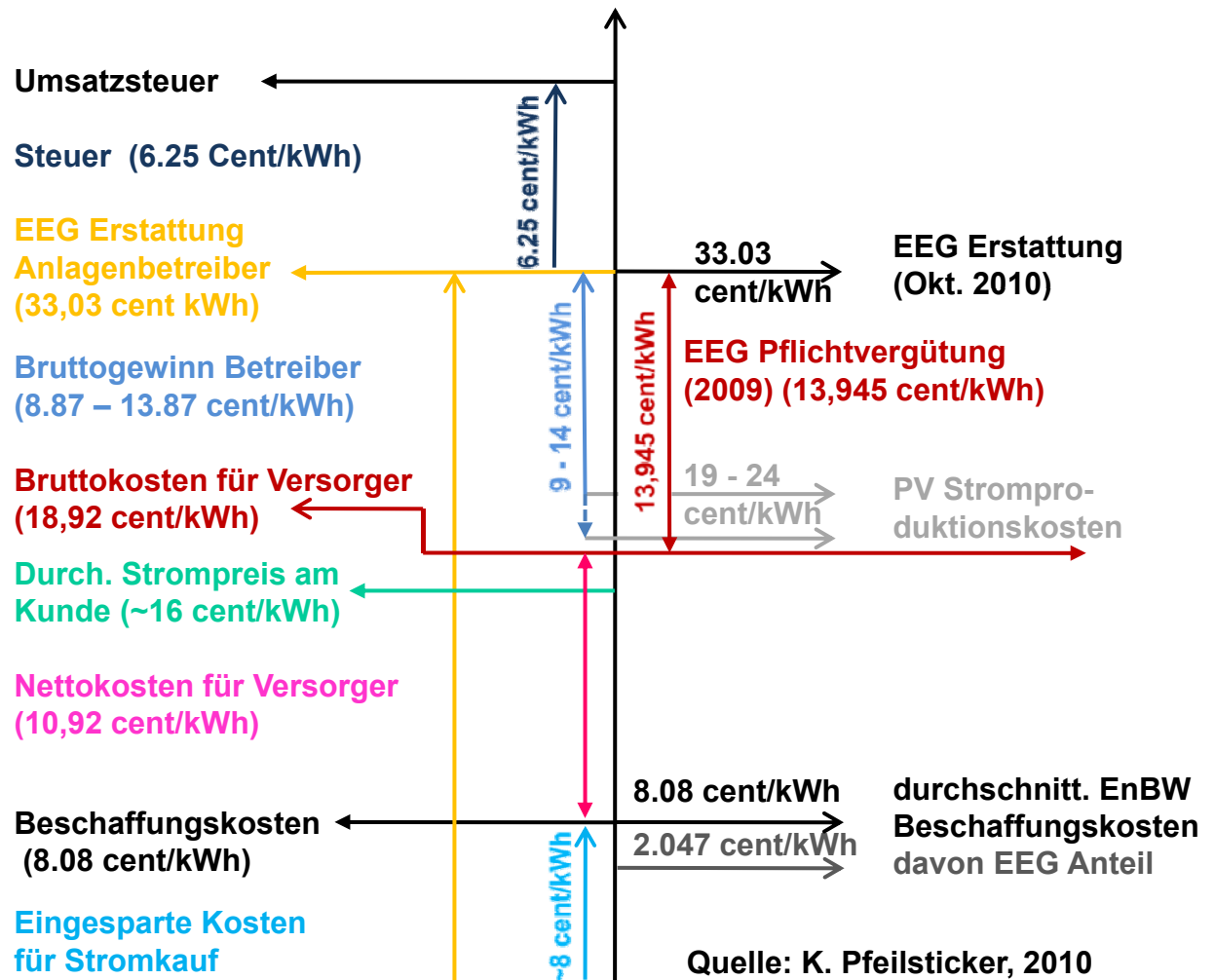
**(4) Umwelt und Klima:**

**1.12 cent/kWh**

**(mit derzeitigem CO<sub>2</sub>  
Emissionspreis)**

**Geldfluß**

**Kosten**



→ CO<sub>2</sub> Vermeidungskosten bei PV Preise heute: **194 Euro/tCO<sub>2</sub>**