



# Optionen zur Stromerzeugung und ihre Bewertung

Rainer Friedrich

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung  
Universität Stuttgart

DPG-AKE, 21.11.2011, Bad Honnef

Nach Kernenergieausstieg und unter Berücksichtigung der  
ehrgeizigen Klimaschutzziele:

Welche Stromerzeugungstechniken sollen wir fördern/ zubauen?



*Stromerzeugungstechniken verursachen unterschiedliche*

- *Kosten;*
  - *„Back-up“-Kosten;*
  - *Bedarf an Emissionsrechten;*
  - *Gesundheitsrisiken (im Normalbetrieb und durch Unfälle);*
  - *Klimaänderungen durch Treibhausgasemissionen;*
  - *Schäden an Ökosystemen, Reduzierung der Biodiversität;*
  - *Schäden an Materialien, Verringerung von Ernteerträgen*
  - *Risiken durch Versorgungsengpässe, Verknappung*
  - *Verteilung der Kosten*
- private Kosten**
- größtenteils externe Effekte**

*Alle diese Effekte sollten – aus gesellschaftlicher Sicht – bei Entscheidungen berücksichtigt werden.*



## **Zusammengefasste Kriterien:**

**Niedrige Faktorkosten (ohne Steuern) incl. Speicher-, back-up-Kosten**

**Niedrige Umweltbelastungen zur Vermeidung von Gesundheits- und Ökosystemrisiken**

**Geringe Folgen des Klimawandels**



## Welche Effekte sind nicht berücksichtigt ?

**Weil sie nicht als externe Effekte gelten:**

- **Beschäftigungswirkungen**
- **Verzehr nicht erneuerbarer Ressourcen (Indium, Gallium, Silizium, Kupfer, Öl, Gas, ...)**
- **Bereits ausgegebene Gelder für Forschung und Entwicklung (sunk costs)**
- **Einkommensverteilung**
- **Lokale Schäden an naturnahen Ökosystemen (bei der Umweltverträglichkeitsprüfung geprüft und durch Maßnahmen kompensiert)**

**Außerdem: mögliche Risiken bei on-shore CCS (zu wenige Erkenntnisse, Risikoanalyse steht noch aus);**

**Versorgungssicherheit bei Erdgas (keine geeignete Methode entwickelt)**

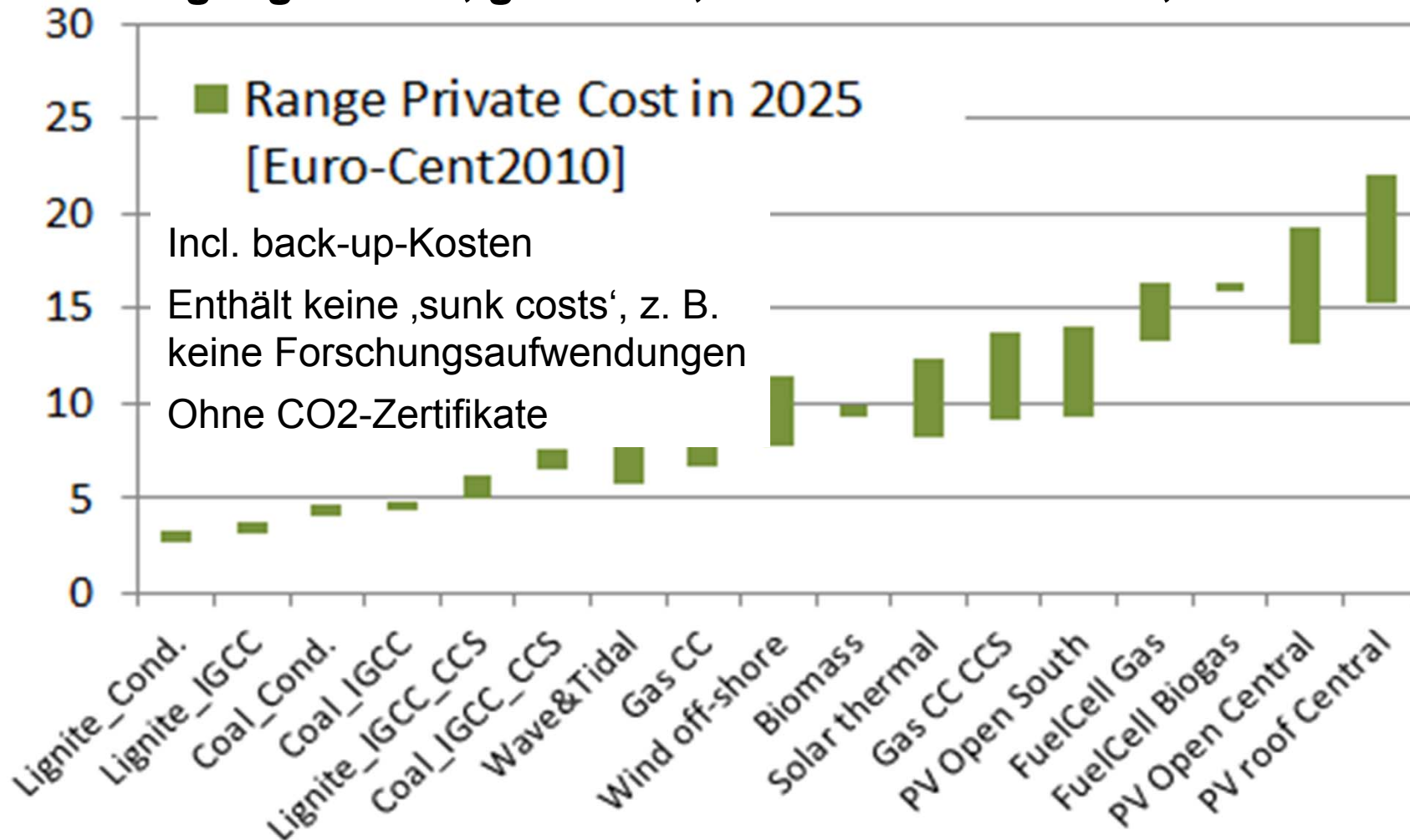


# **„Private“ Kosten = Stromerzeugungungskosten**

- **private Kosten = alle Kosten pro kWh, die das Stromerzeugungsunternehmen trägt, aber ohne Steuern (MWSt) und Subventionen**
- **Enthält alle Kosten des Lebenszyklus: Investment, Betrieb, Wartung und Reparatur, Brennstoff, Abriss, Abfallbeseitigung**
- **Enthält back-up Kosten (Bereitstellung von Reservekapazität) errechnet durch Vergleich von Energieerzeugungssystemen mit gleicher Versorgungssicherheit**
- **Projektion der Kosten für 2025: Kombination aus technischer und Trendanalyse; und grobe Schätzung für 2050.**



## Stromerzeugungungskosten, geschätzt, Inbetriebnahme 2025,



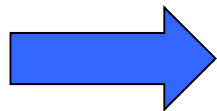


# Grundprinzipien der ‚ExternE‘-Methode

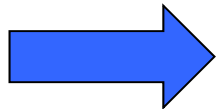
Entwicklung finanziert von der Europäischen Kommission im Rahmen der ExternE (= External costs of Energy) Projektserie

**Umwelteinwirkungen ermittelbar, aber nicht bewertbar:**

**Bewertet werden können Nutzenverluste bzw. Risiken (z. B. Gesundheitsrisiken), nicht die Umwelteinwirkung (z.B. Emissionen)**



**Umwelteinwirkungen sollen in Auswirkungen (Gesundheitsrisiken, Biodiversitätsverluste, Materialschäden) umgerechnet werden**



**Umweltauswirkungen hängen auch von Ort und Zeit der Einwirkung ab**



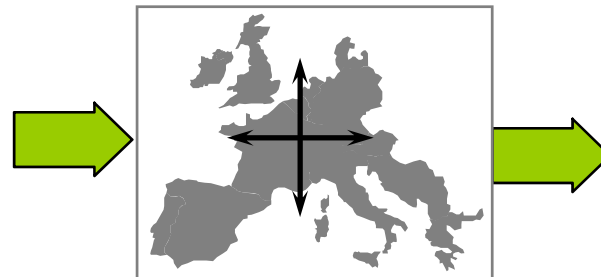
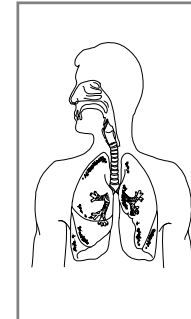
# Wirkungspfadanalyse Teil I

**Aktivitäten und Emission von Stoffen, Lärm**



**Differenz der Risiken und Schäden**

**Transport und Chemische Umwandlung; Lärmausbreitung**



Berechnung zweimal:  
Mit und ohne Projekt

**Für die Bewertung müssen Umwelteinwirkungen (z. B. Emissionen) in Schäden (an Gesundheit, Ökosystemen, Materialien) umgerechnet werden**





## Beispiele für Konzentrations-Wirkungs-Beziehungen

Endpunkt	CRF (95% CI)	Einheiten
<b>Chronische Mortalität PM2.5</b>		
Reduktion der Lebenserwartung (Altersgruppe über 30 Jahre alt)	651 (127; 1194)	YOLL per 10 µg/m <sup>3</sup> per 100 000 Menschen
<b>Morbidität PM10</b>		
Neue Fälle chronischer Bronchitis (Altersgruppe über 18 Jahre alt)	86 (8; 150)	Jährlich, per 10 µg/m <sup>3</sup> , per 100 000 Erwachsene über 18
Krankenhausaufnahmen wegen Erkrankungen der Atemwege	5,6 (4,3;6,2)	Jährlich, per 10 µg/m <sup>3</sup> , per 100 000 Menschen
Krankenhausaufnahmen wegen Herzerkrankungen	4.3 (2.2; 6.5)	Jährlich, per 10 µg/m <sup>3</sup> , per 100 000 Menschen



## Mit der Wirkungspfadanalyse betrachtete Wirkungspfade

<b>Wirkungs- kategorie</b>	<b>Schadstoff</b> (primär und sekundär)	<b>Schaden</b>
<b>Gesundheit: Mortalität</b>	<b>PM10</b>  <b>SO2, Benzol, Benzo-a- Pyren, 1,3- Butadien, Dieselpart., HM, andere kanzerogene Subst., Lärm</b> <b>Unfallrisiken</b>	<b>Verminderte Lebenserwartung durch Kurz- und Langzeitexposition</b> <b>Verminderte Lebenserwartung durch Langzeitexposition</b>  <b>Mortalitätsrisiken durch Verkehrs- und Arbeitsunfälle</b>
<b>Gesundheit: Morbidity</b>	<b>PM10, Ozon, SO2</b>  <b>PM10, Ozon</b> <b>PM10, CO</b> <b>Benzol, Benzo-a-Pyren, 1,3- Butadien, Dieselpart., HM, andere kanzerogene Subst,</b>	<b>Krankenhausaufenthalte wegen Atemwegserkrankungen</b> <b>Tage mit eingeschränkter Aktivität</b> <b>Krankenhausaufnahmen wg. Herzkrankungen</b> <b>Risiko von nicht tödlichen Herzkrankungen</b>



## Mit der Wirkungspfadanalyse betrachtete Wirkungspfade

<b>Wirkungs- kategorie</b>	<b>Schadstoff (primär und sekundär)</b>	<b>Schaden</b>
<b>Gesundheit: Morbidity</b>	<b>PM10</b>  <b>Ozon</b> <b>Lärm</b>  <b>Blei, Quecksilber</b>	<b>Krankenhausaufnahmen wegen cerebro-vascularer Erkrankungen, chronische Bronchitis, chronischer Husten bei Kindern, Hustentage bei Asthmatikern, Atemwegssymptome</b> <b>Asthmaanfälle, Tage mit Atemwegssymptomen</b> <b>Herzinfarkt, Angina pectoris, Bluthochdruck, Schlafstörungen</b> <b>IQ-Verlust bei Kleinkindern</b>
<b>Änderung der Biodiversität</b>	<b>Saure Deposition, Stickstoffdeposition</b>	<b>PDF (potentially disappeared fraction of species) durch Versauerung und Eutrophierung</b>
<b>Treibhaus- effekt</b>	<b>CO2, CH4, N2O, FCKW</b>	<b>Weltweite Änderungen von Mortalität, Morbidity, Effekte auf Küstenschutz, landwirtschaftliche Produktion, Energiebedarf, ...;</b>

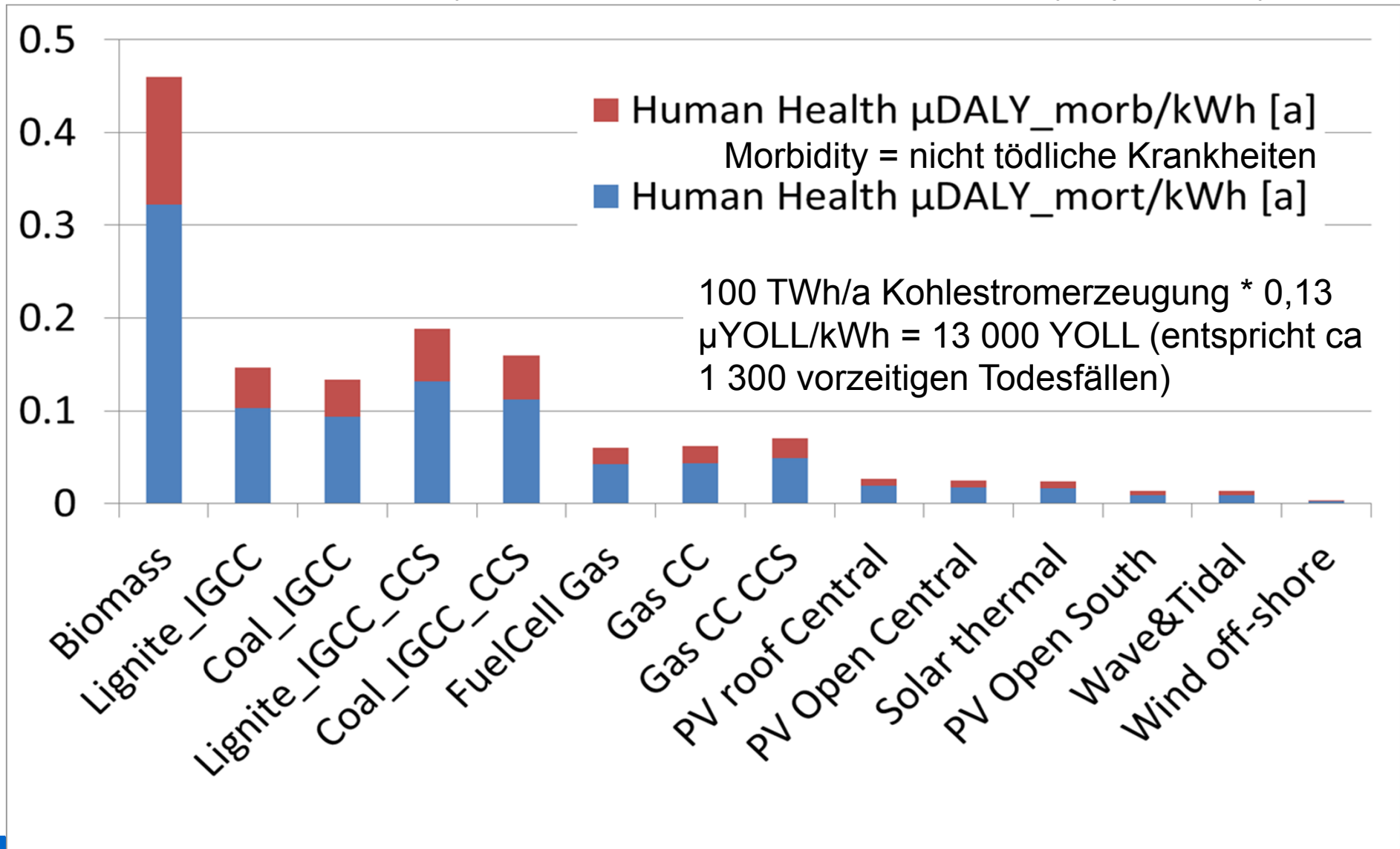


## Mit der Wirkungspfadanalyse betrachtete Wirkungspfade

<b>Wirkungskategorie</b>	<b>Schadstoff (primär und sekundär)</b>	<b>Schaden</b>
<b>Landwirtschaftliche Ertragsverluste</b>	<b>SO<sub>2</sub></b> <b>Ozon</b> <b>Saure Deposition</b> <b>Deposition von N, S</b>	<b>Ertragsänderungen bei Weizen, Gerste, Roggen, Hafer, Kartoffeln, Zuckerrüben</b> <b>Ertragsänderungen bei Weizen, Gerste, Roggen, Hafer, Reis, Tabak, Sonnenblumen</b> <b>Zusätzliche Kalkung von Böden</b> <b>Düngeeffekte</b>
<b>Materialschäden</b>	<b>SO<sub>2</sub>, Saure Deposition</b> <b>Ruß,</b> <b>Verbrennungspartikel</b>	<b>Korrosion von Stahl, Kalkstein, Mörtel, Sandstein, Lack, Putz, Zink.</b> <b>Verschmutzung von Gebäuden</b>
<b>Belästigung</b>	<b>Lärm</b>	<b>Belästigungswirkung</b>

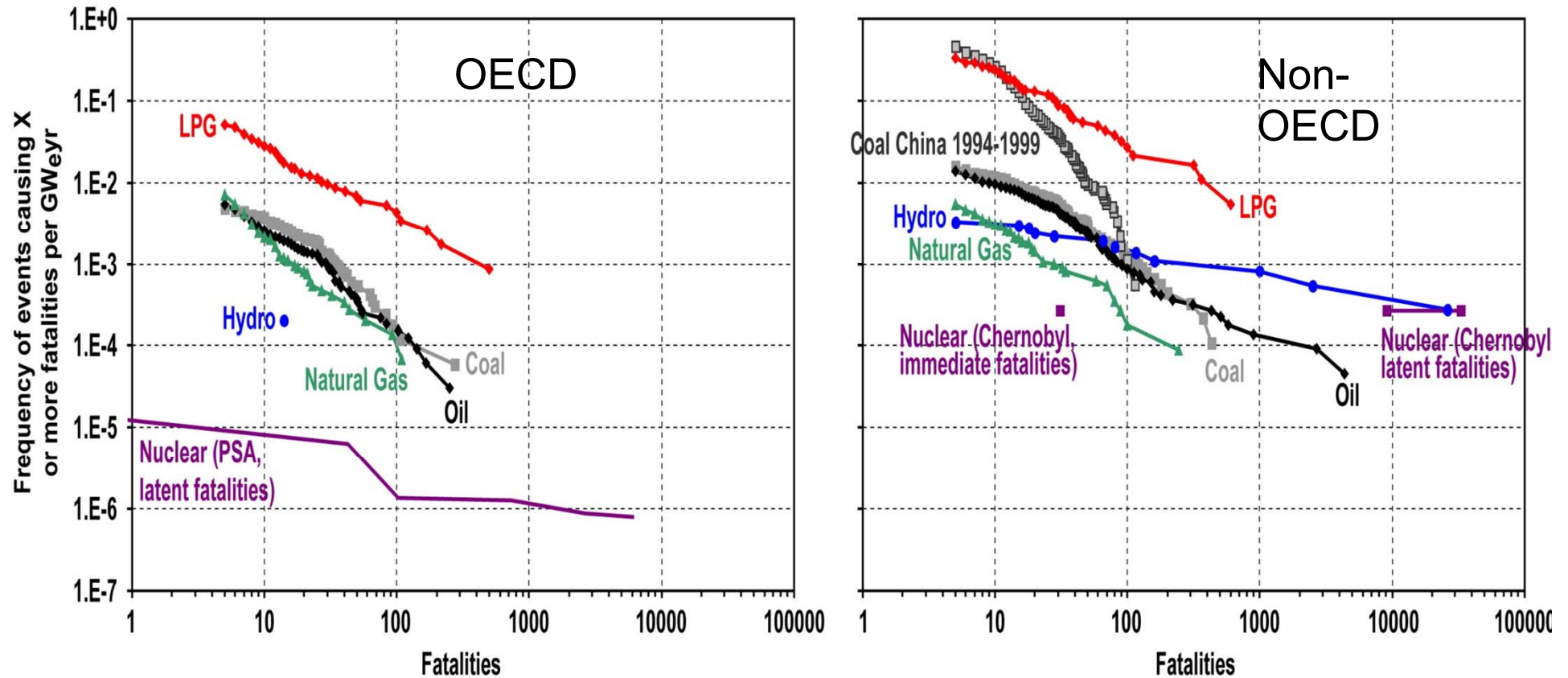


## Gesundheitsschäden pro erzeugter kWh für 2025 in Betrieb gehende Kraftwerke, in $\mu$ YOLL ( $10^{-6}$ years of life lost) und $\mu$ DALYs ( $10^{-6}$ disability adjusted life years)





## Häufigkeiten und Schäden durch große Unfälle (1970-2005)

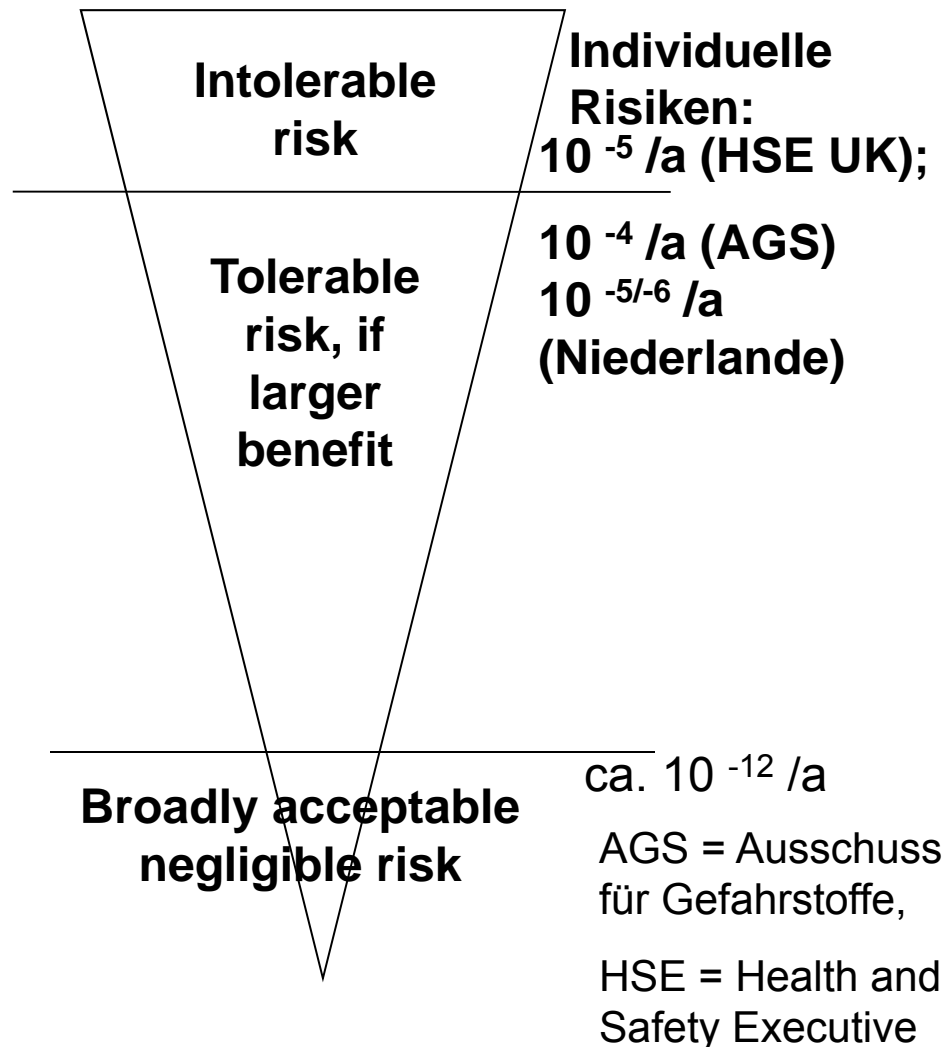


- Hohe Unfallwahrscheinlichkeit bei LPG (liquid petrol gas) und bei Kohleminen in China.
- Dammbürche in Entwicklungsländern können Tausende Tote verursachen; letzter Dammbürch in OECD Ländern > 1000 Tote in Vaiont, Italien; 1917 Tote).

Quelle: Hirschberg, PSI



## Bewertung von Schäden



**Schritt 1: Inakzeptable, nicht tolerierbare Schäden müssen auf jeden Fall vermieden werden, z. B. durch Grenzwerte oder Verbote.**

**Kleinere Risiken (mit einer Häufigkeit kleiner  $10^{-5}$  /a ), die nur mit unverhältnismäßigem Aufwand weiter reduziert werden können, werden toleriert, wenn sie durch einen Nutzen kompensiert werden.**

**Schritt 2: Die Bewertung der tolerierbaren Risiken erfolgt durch Messung der Präferenzen der betroffenen informierten Personen ( z. B. durch Zahlungsbereitschaftsanalysen.**





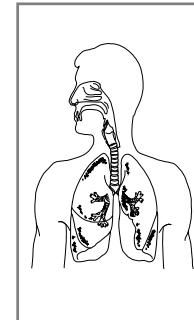
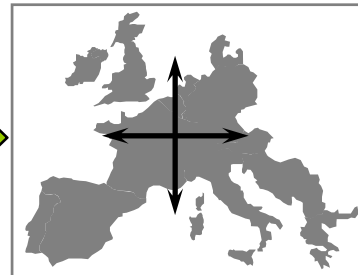
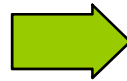
# Wirkungspfadanalyse Teil II

## Differenz der Schäden

Emission von  
Stoffen, Lärm



Transport und  
Chemische  
Umwandlung;  
Lärmausbreitung



Monetäre Bewertung



Berechnung  
zweimal:  
Mit und ohne  
Projekt





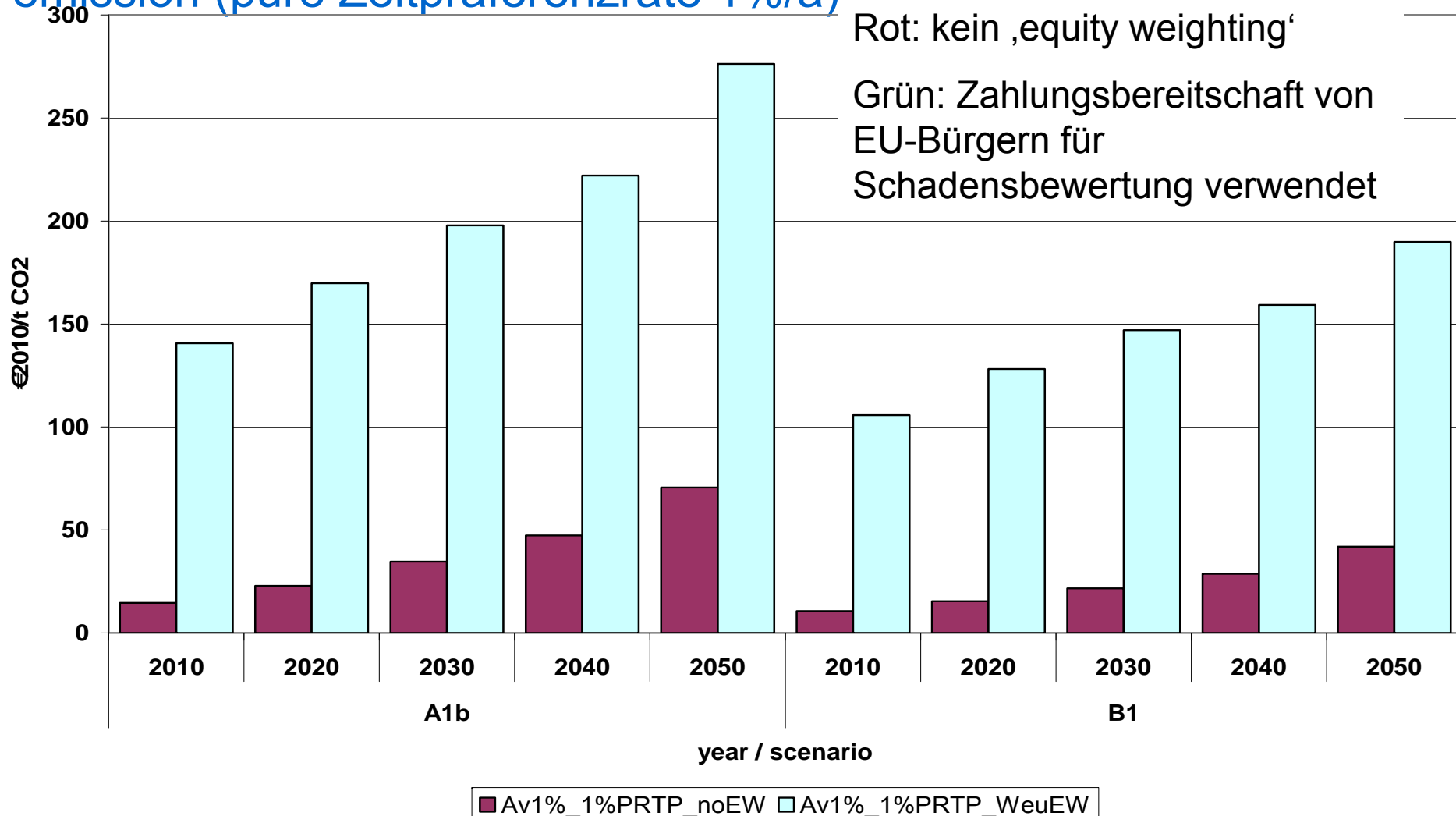


## Beispiele für monetäre Werte für Gesundheitsrisiken (EUR 2010)

Health End-Point	Low	Central	High	
Increased mortality risk – VSLacute (value of a statistical life)	1,121,433	1,121,433	5,607,164	Euro/VSL
Life expectancy reduction - Value of Life Years chronic	37,500	60,000	215,000	Euro/YOLL
Increased mortality risk - infants	1,120,000	2,475,000	11,200,000	Euro/case
Sleep disturbance	480	1,240	1,570	Euro/year
Hypertension	880	950	1,110	Euro/year
Acute myocardial infarction	4,675	86,200	436,200	Euro/case
Lung cancer	69,080	719,212	4,187,879	Euro/case
Leukaemia	2,045,493	3,974,358	7,114,370	Euro/case
Neuro-development disorders	4,486	14,952	32,895	Euro/case
Skin cancer	10,953	13,906	26,765	Euro/case
Osteoporosis	2,990	5,682	8,074	Euro/case
Renal dysfunction	22,788	30,406	40,977	Euro/case
Anaemia	748	748	748	Euro/case

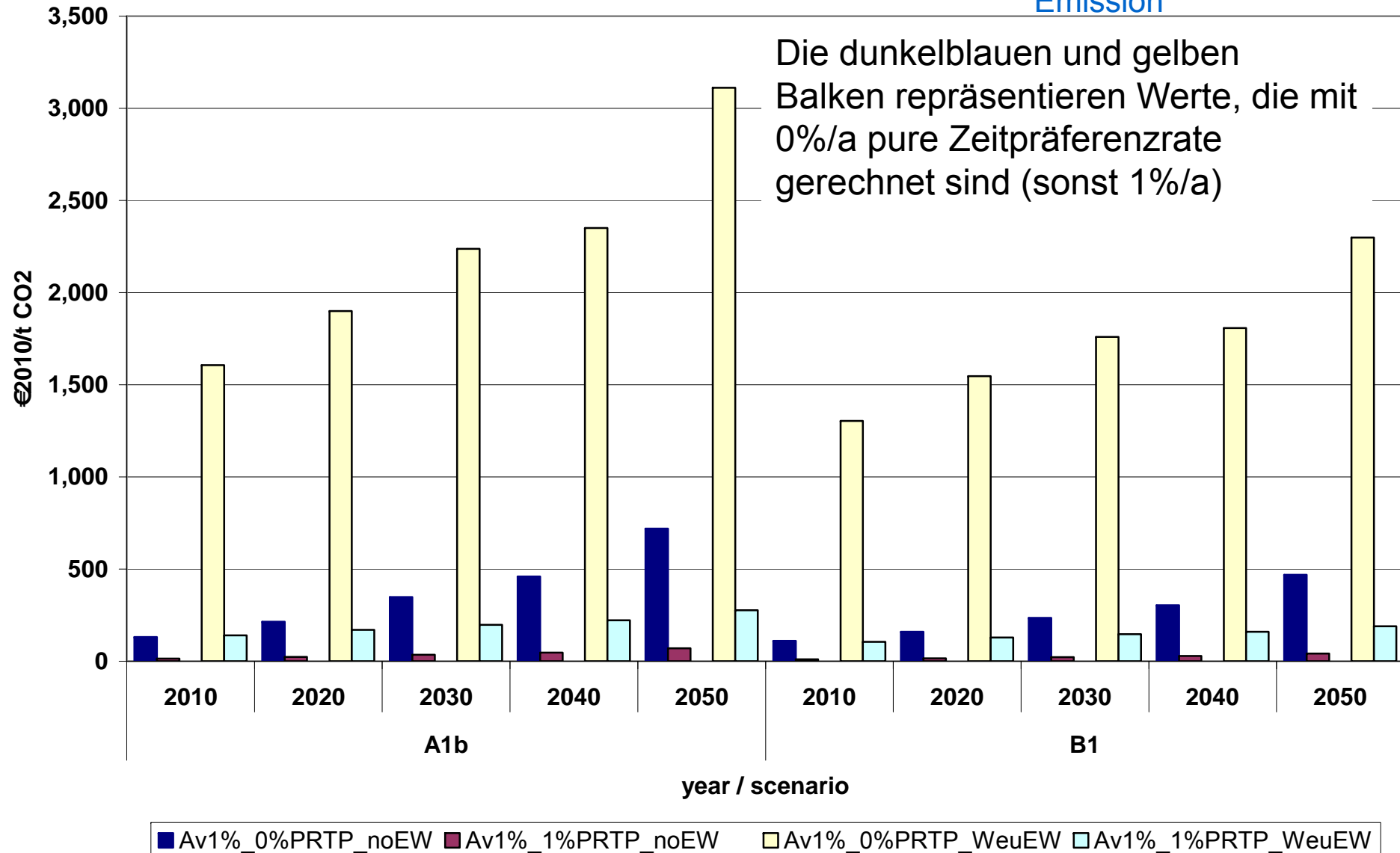


## Bewertung der Emissionen von Treibhausgasen: marginale Schadenskosten berechnet mit FUND (Tol) in €<sub>2010</sub>/t CO<sub>2</sub> in year of emission (pure Zeitpräferenzrate 1%/a)





# Marginale Schadenskosten (FUND) €<sub>2010</sub>/t CO<sub>2</sub> abgezinst auf Jahr der Emission





# Bewertung von Treibhausgasemissionen mit Vermeidungskosten

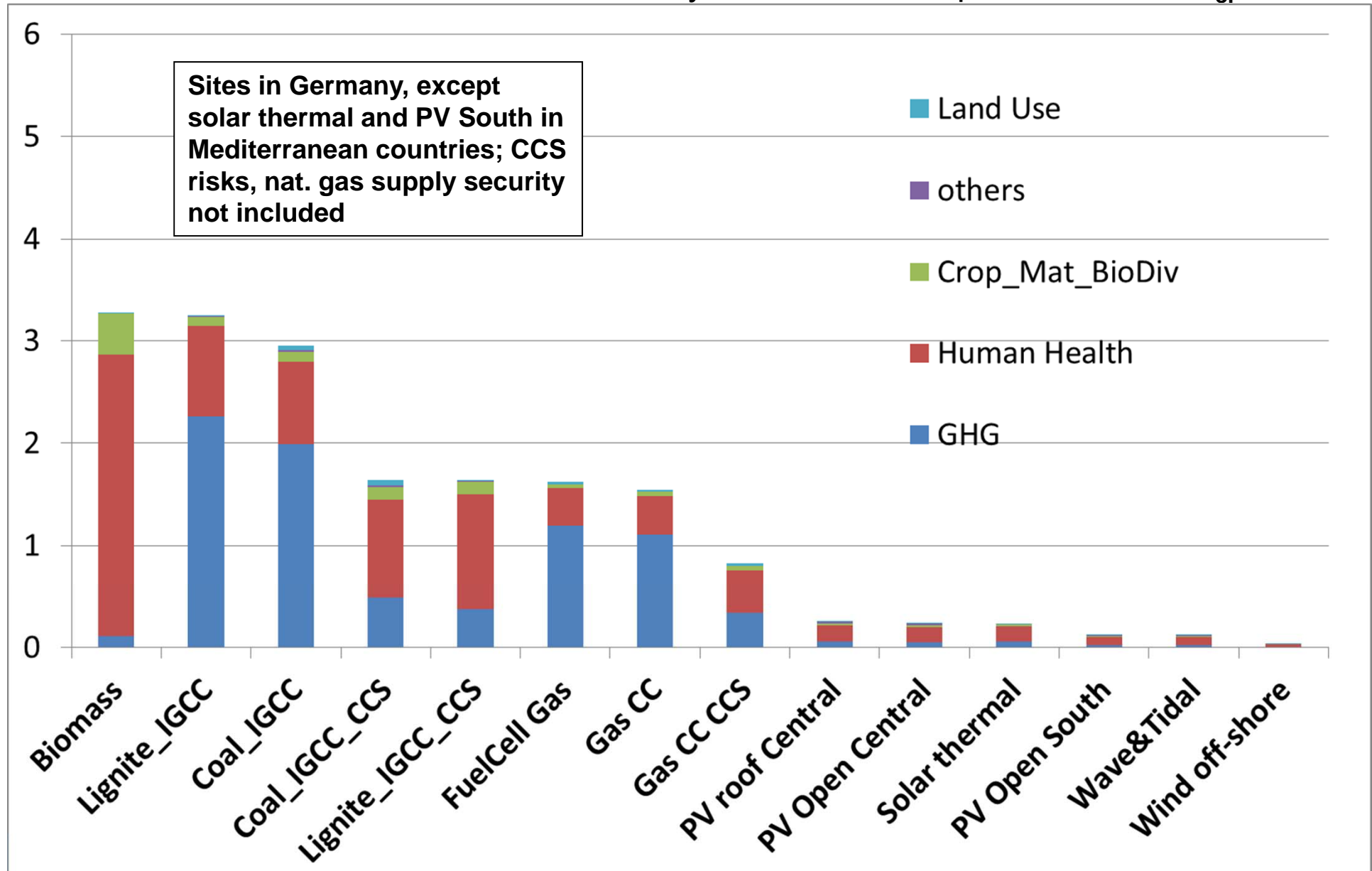
[Euro 2010 per tonne CO <sub>2</sub> eq]	2010	2015	2025	2035	2045	2050
<b>Kyoto/20%+</b>	<b>26</b>	<b>30</b>	<b>36</b>	<b>42</b>	<b>74</b>	<b>87</b>
<b>2° max</b>	<b>36</b>	<b>46</b>	<b>73</b>	<b>119</b>	<b>194</b>	<b>250</b>

**Kyoto/20%+ : marginale Vermeidungskosten, die zur Erfüllung der Kyotoziele, zur Minderung der Treibhausgase der EU um 20% 1990 – 2020 und zu darüberhinausgehenden Minderungen danach führen.**

**Max 2° : marginale Vermeidungskosten, die im Rahmen einer internationalen Strategie dazu führen, dass die Temperatur der Erdoberfläche um nicht mehr als 2° C ansteigt.**

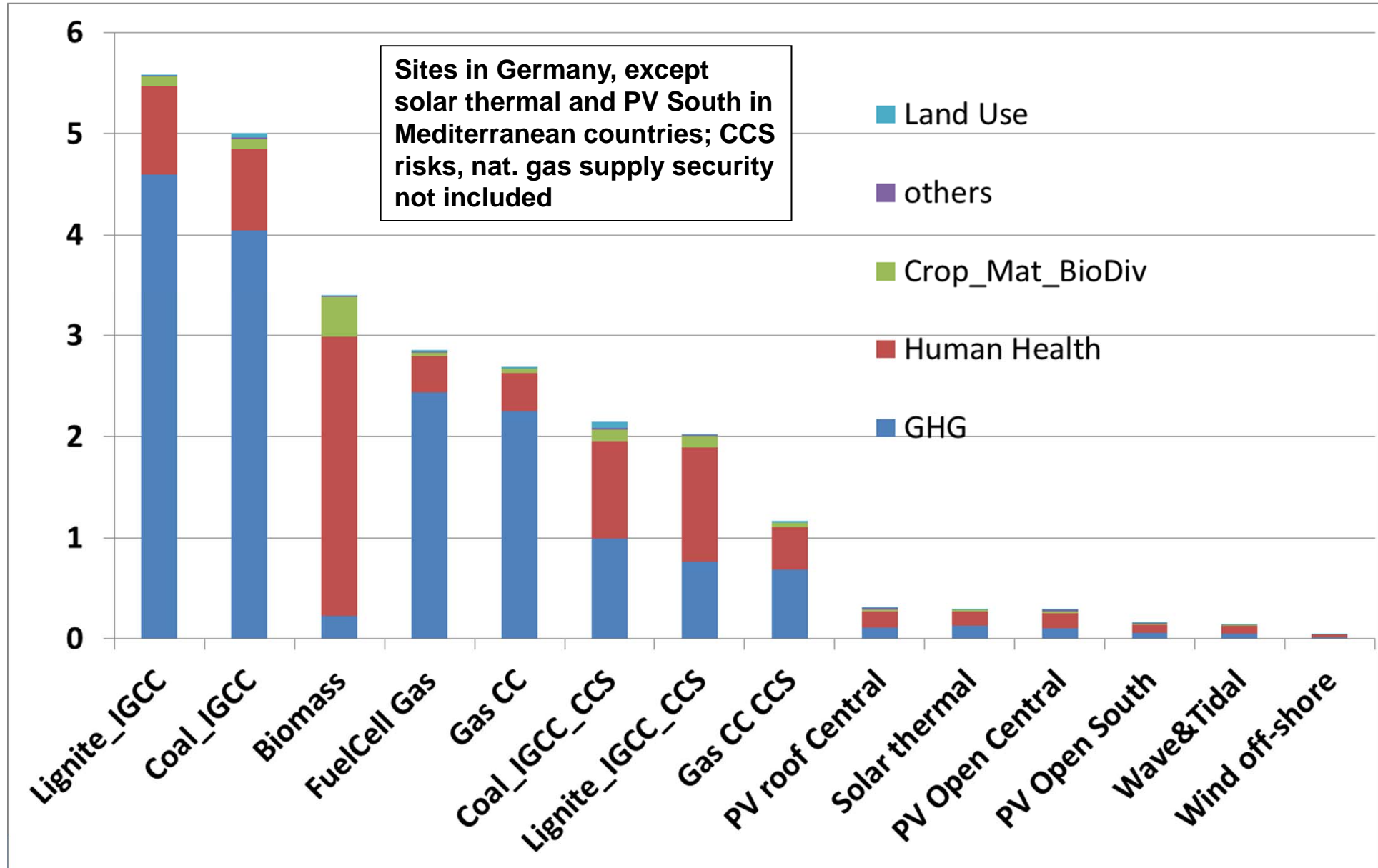


## External Costs 2025 Scenario Kyoto+ 36€/tCO<sub>2</sub>eq , in €cent/kWh<sub>el</sub>

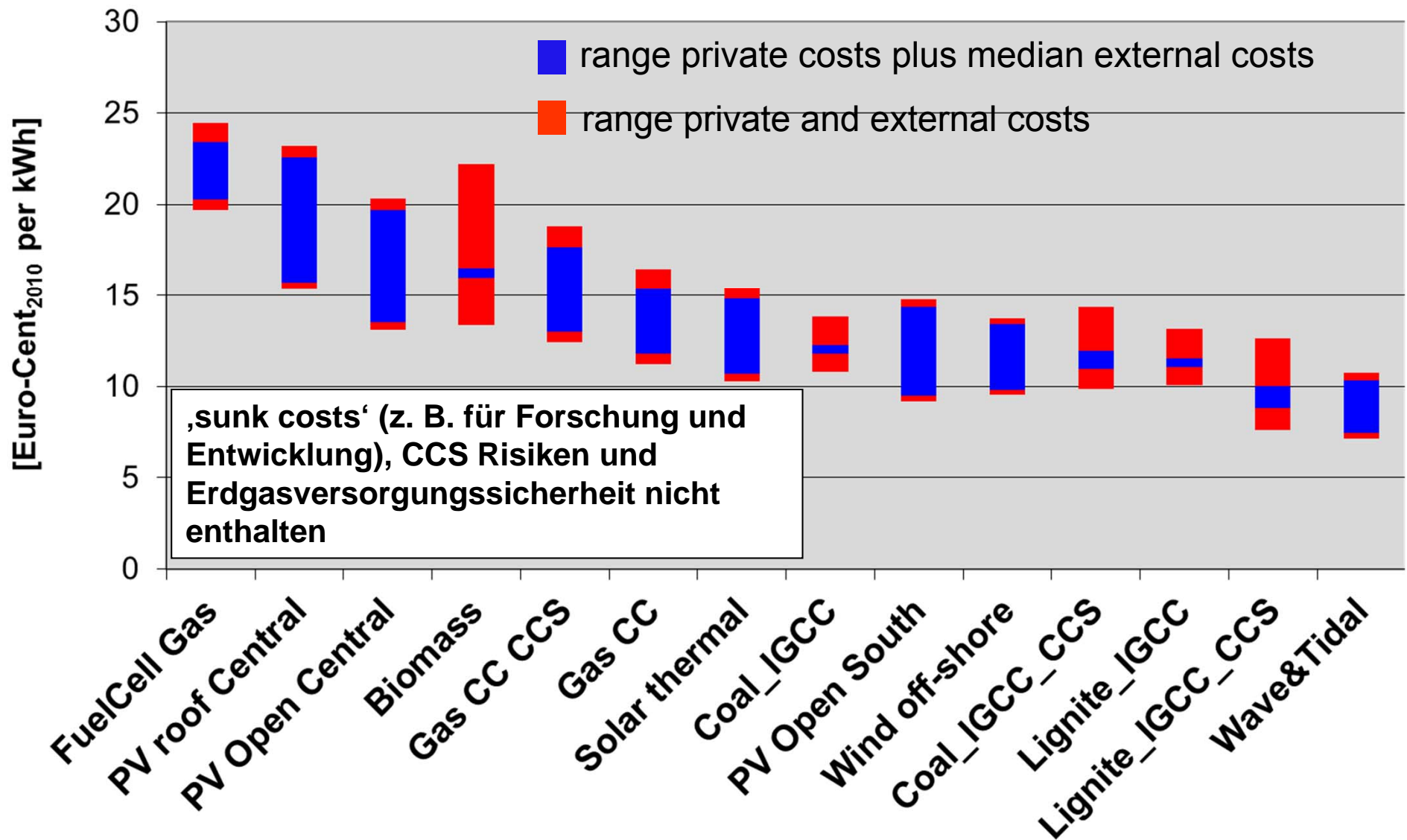




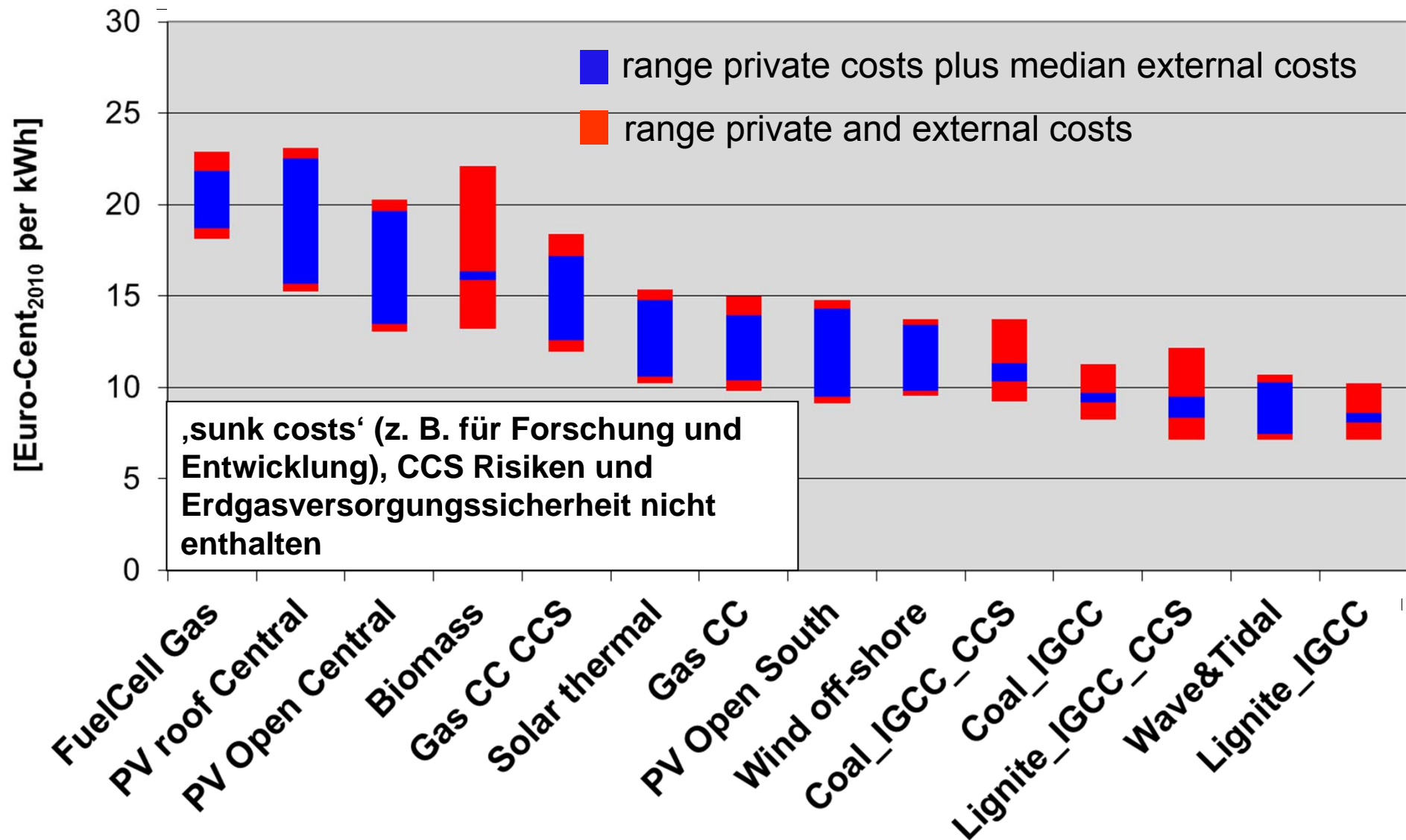
## External Costs 2025 Scenario 2° max, ca. 73€/tCO<sub>2</sub>eq, in €cent/kWh<sub>el</sub>



# Soziale Kosten von neuen Stromerzeugungsanlagen Inbetriebnahme 2025; Bewertung GHG: 73€/tCO<sub>2</sub>eq



# Soziale Kosten von neuen Stromerzeugungsanlagen Inbetriebnahme 2025; Bewertung GHG: 36 €/tCO<sub>2</sub>eq





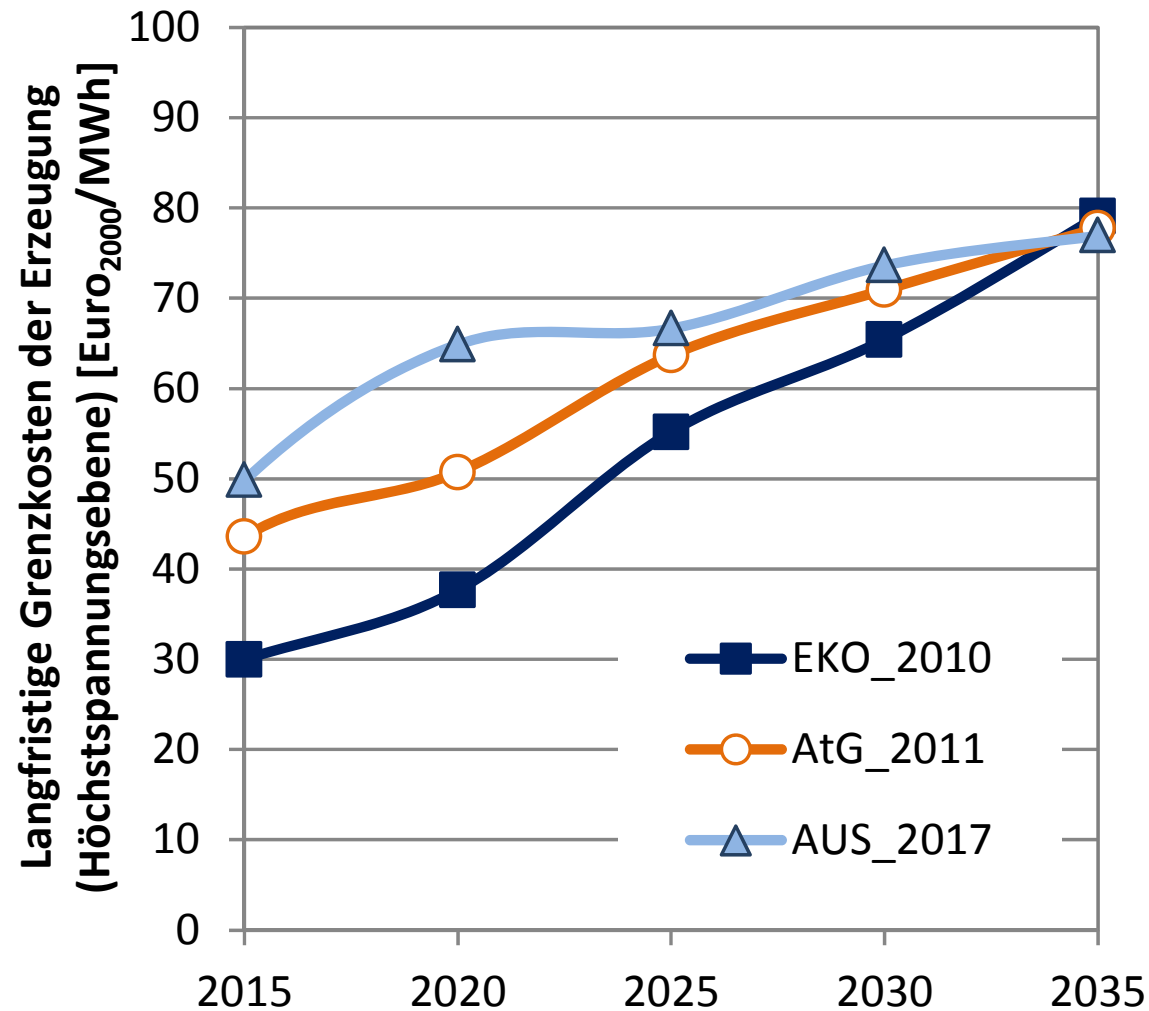


# Szenariendefinition

Szenario	Kernenergienutzung	Anteil Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch	Klimaschutzziel (THG-Einsparung)
<b>EKO_2010</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Deutschland: 44 Jahre</li><li>- Ausstieg in Spanien, Belgien</li><li>- Sonstige EU-Staaten: Kapazitätshaltung bzw. Ausbau</li></ul>	Deutschland: 40% bis 2020 60% bis 2035 80% bis 2050	Deutschland: 40% bis 2020 62,5% bis 2035 85% bis 2050
<b>AtG_2011</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ausstieg in Deutschland bis zum Jahr 2022</li><li>- Übrige EU-Staaten wie in Szenario EKO_2010</li></ul>	EU-27: 30% bis 2020 45% bis 2035 60% bis 2050	EU-27: 30% bis 2020 52,5% bis 2035 75% bis 2050
<b>AUS_2017</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>- Ausstieg in Deutschland bis zum Jahr 2017</li><li>- Übrige EU-Staaten wie in Szenario EKO_2010</li></ul>		(alle Werte bezogen auf die Kyotobasis)



# Langfristige Grenzkosten der Stromerzeugung in Deutschland



Source:  
Blesl,  
IER,  
2011



# Kumulierte energiebedingte Systemmehrkosten in Deutschland und

Kumulierte Systemmehrkosten ab 2010 gegenüber EKO_2010 [Mrd. € <sub>2000</sub> ]	bis 2025	bis 2035
AtG_2011	14,5	38,2



# Schlussfolgerungen I

- **Laufwasser, gefolgt von Braunkohle, Wind, evtl. Wellenenergie und Steinkohle sind die Optionen mit den niedrigsten sozialen Kosten. Aber: das Potential von Wind und Laufwasser ist begrenzt; Wind und Wellenenergie benötigen Reserve- oder Speicherkapazität, on-shore Wind ist nicht überall akzeptiert, bei Kohle ist ggf. die CO<sub>2</sub>-Speicherkapazität begrenzt.**
- **Vor allem Braunkohle stellt sich daher als günstig heraus. Mit CCS, wenn**
  - **das '2°'-Klimaschutzziel erreicht werden soll**
  - **Kosten für CO<sub>2</sub>-Transport und Speicherung den Erwartungen entsprechen und die technischen und Umweltrisiken gering sind.**

**Allerdings sind auch die günstigen CCS-Lagerstätten begrenzt. Soweit on-shore-CCS auf Akzeptanzprobleme stößt, käme u.U. eine off-shore Speicherung in frage.**



## Schlussfolgerungen II

- **Erdgas wird Kohle nur ersetzen, wenn die Erdgaspreise moderat bleiben; dann ggf. zunächst auch ohne CCS. Kleinere Erdgasanlagen mit Fernwärmeauskopplung**
- **Biomasseverbrennung in kleineren Anlagen hat relativ hohe externe und soziale Kosten. Am günstigsten ist noch die Verbrennung von Rest- und Abfallstoffen in großen Feuerungen. Zudem wird die Biomasse auch in anderen Sektoren (Verkehr) zur CO<sub>2</sub>-Minderung benötigt.**
- **Stromerzeugung mit Sonnenenergie in Deutschland weist mindestens bis 2030 mit die höchsten sozialen Kosten auf. Nach Kohle und Gas könnte die solare Stromerzeugung in Mittelmeerländern eine weitere Option sein; vor allem, wenn große Treibhausgasminderungen erreicht werden sollen und CCS nicht günstig oder sicher zur Verfügung steht.**



- **Mit ExterneE/ ECOSENSE und TIMES stehen Methoden und Modelle bereit, mit denen Informationen zur Unterstützung von Entscheidungen bei der Energiebereitstellung erarbeitet werden können.**
- **Mehr Informationen: [www.externe.info](http://www.externe.info) ;**
- **Informationen zur Entwicklung von Stromerzeugungstechniken wurden im Projekt NEEDS erarbeitet: [www.needs-project.org](http://www.needs-project.org)**