



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)

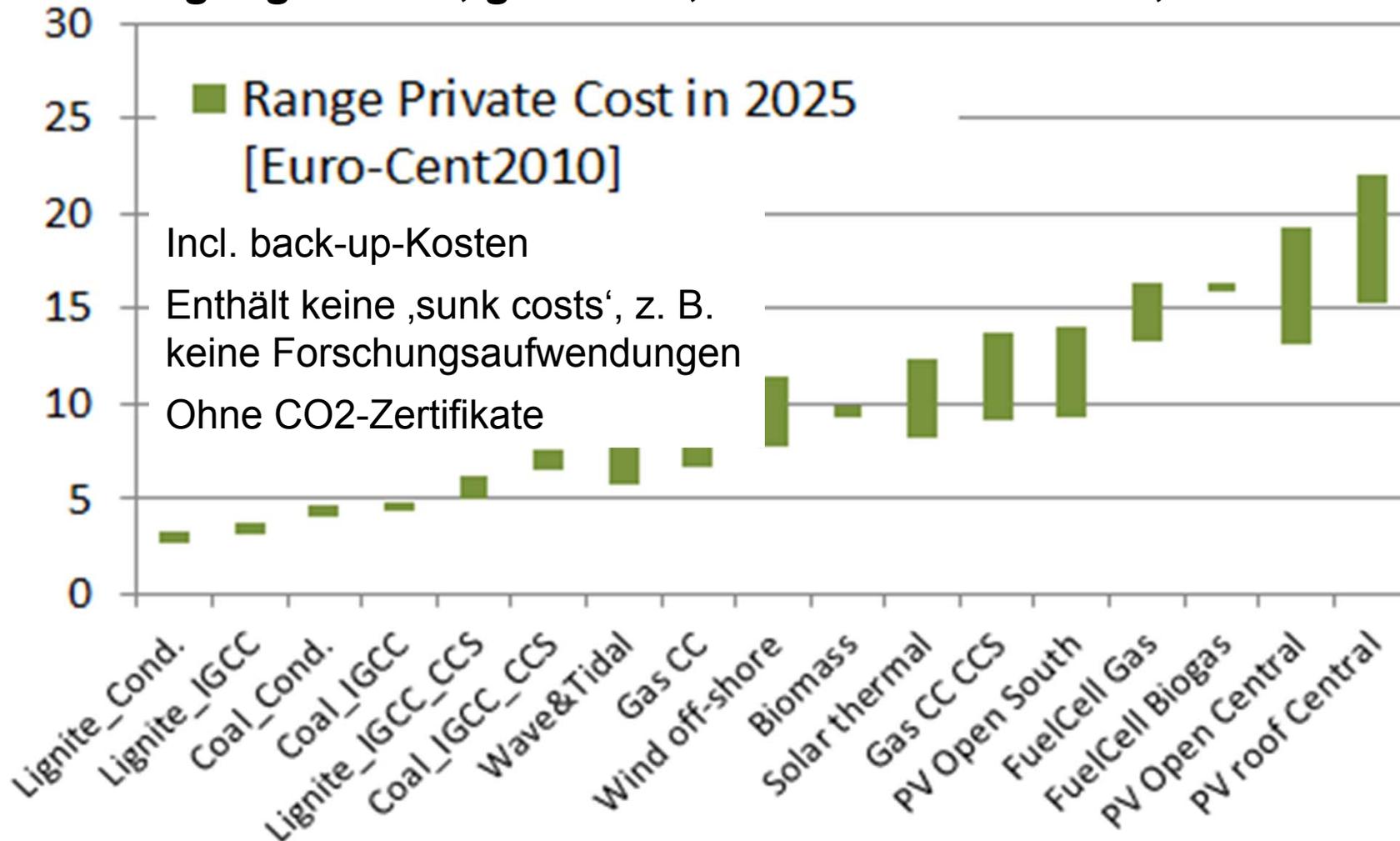


„Private“ Kosten = Stromerzeugungskosten

- **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,



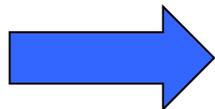


Grundprinzipien der ‚ExternE‘-Methode

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



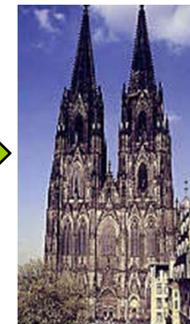
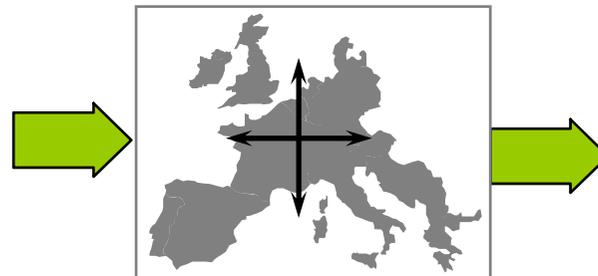
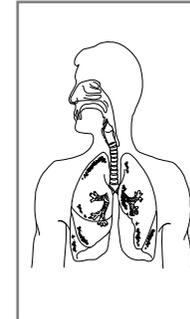
Wirkungspfadanalyse Teil I

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



Mit der Wirkungspfadanalyse betrachtete Wirkungspfade

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



Mit der Wirkungspfadanalyse betrachtete Wirkungspfade

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

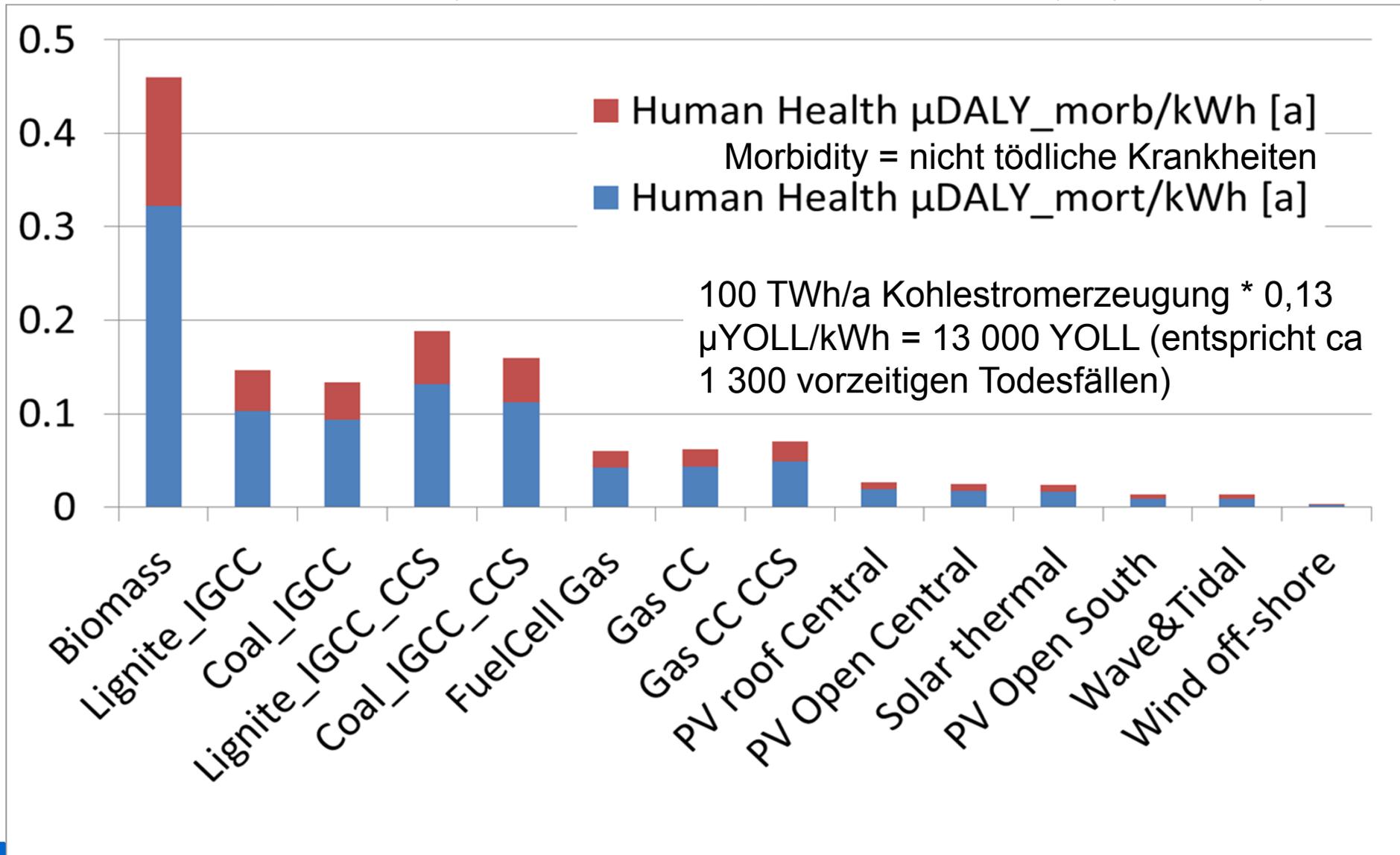


Mit der Wirkungspfadanalyse betrachtete Wirkungspfade

Wirkungs- kategorie	Schadstoff (primär und sekundär)	Schaden
Landwirt- schaftliche Ertrags- verluste	SO₂ Ozon Saure Deposition Deposition von N, S	Ertragsänderungen bei Weizen, Gerste, Roggen, Hafer, Kartoffeln, Zuckerrüben Ertragsänderungen bei Weizen, Gerste, Roggen, Hafer, Reis, Tabak, Sonnenblumen Zusätzliche Kalkung von Böden Düngeeffekte
Material- schäden	SO₂, Saure Deposition Ruß, Verbrennungspartikel	Korrosion von Stahl, Kalkstein, Mörtel, Sandstein, Lack, Putz, Zink. Verschmutzung von Gebäuden
Belästigung	Lärm	Belästigungswirkung

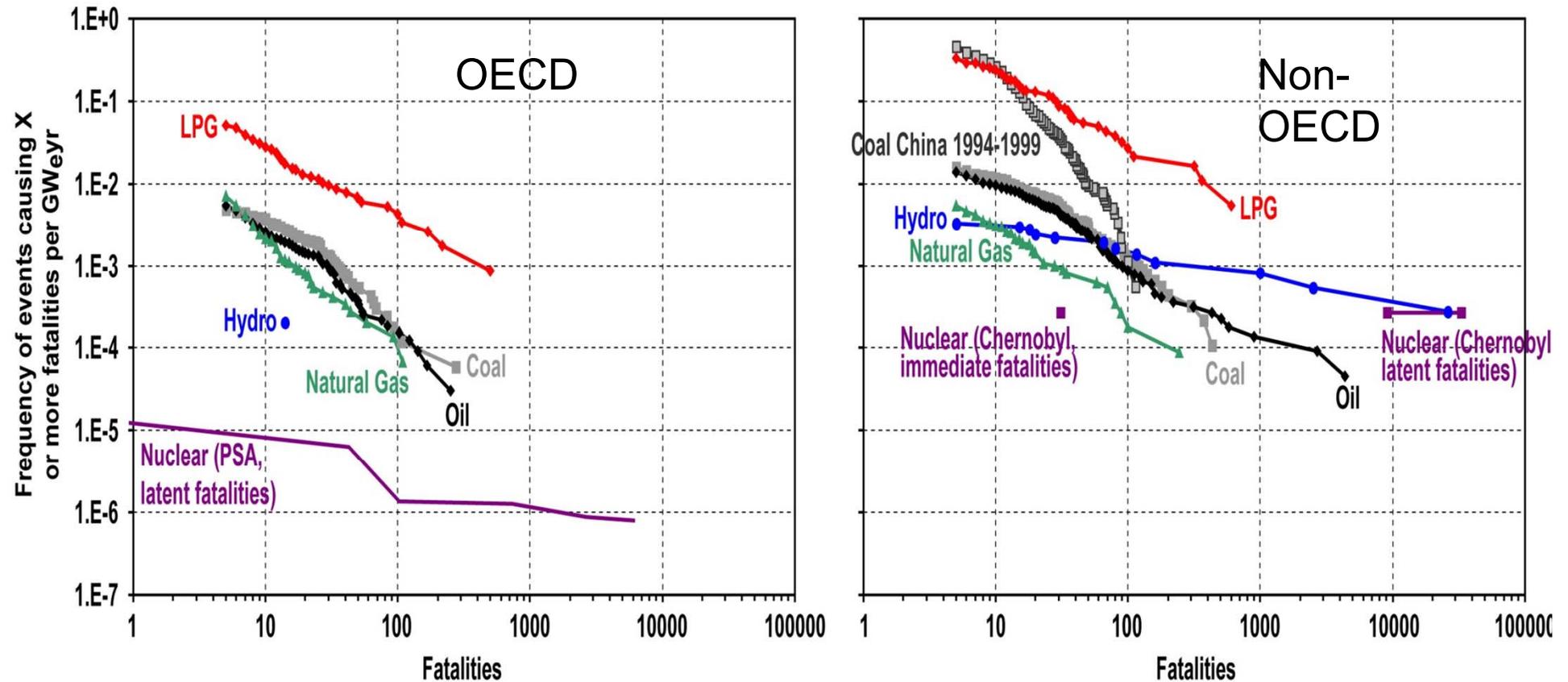


Gesundheitsschäden pro erzeugter kWh für 2025 in Betrieb gehende Kraftwerke, in μ YOLL (10^{-6} years of life lost) und μ DALYs (10^{-6} disability adjusted life years)





Häufigkeiten und Schäden durch große Unfälle (1970-2005)

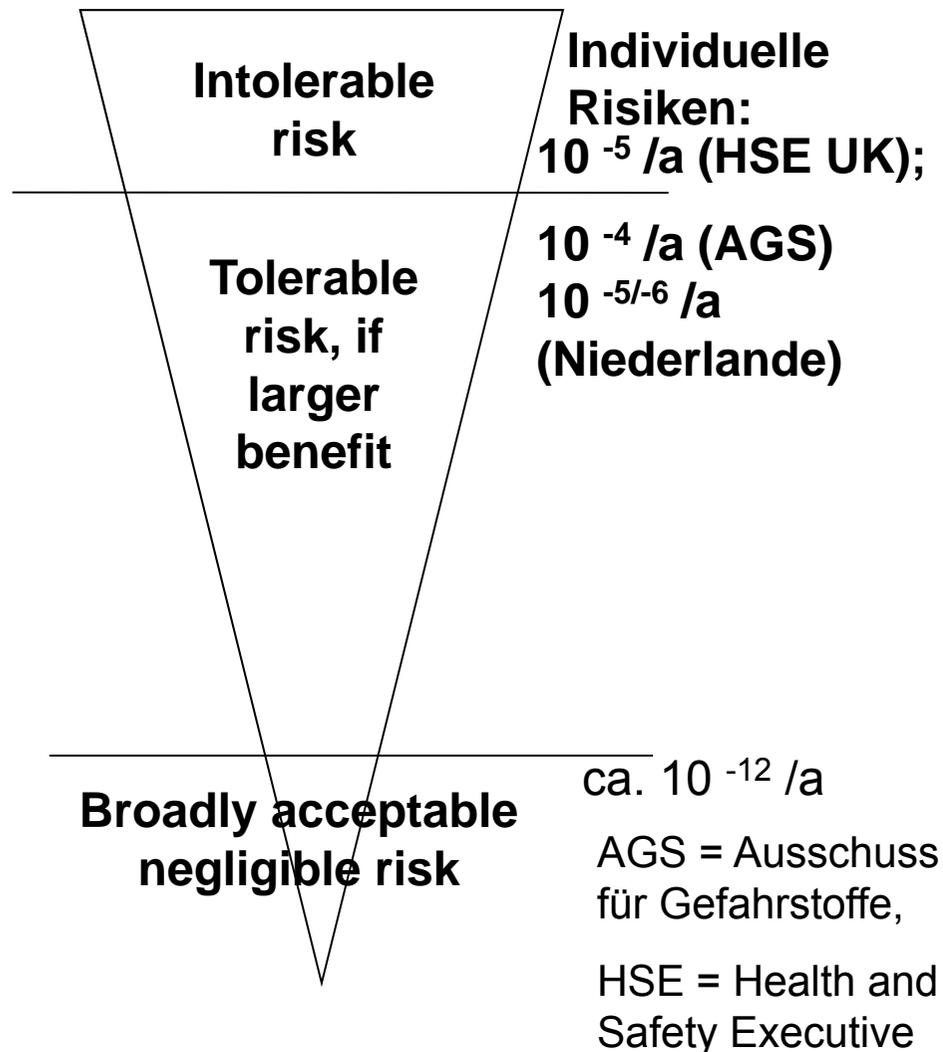


- Hohe Unfallwahrscheinlichkeit bei LPG (liquid petrol gas) und bei Kohleminen in China.
- Dammbürche in Entwicklungsländern können Tausende Tote verursachen; letzter Dammbürch in OECD Ländern > 1000 Tote in Vaiont, Italien; 1917 Tote).

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.



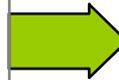
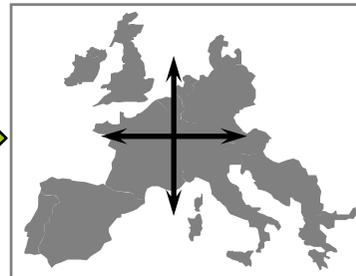
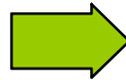
Wirkungspfadanalyse Teil II

Differenz der Schäden

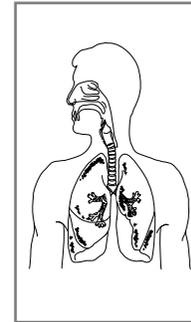
Emission von
Stoffen, Lärm



Transport und
Chemische
Umwandlung;
Lärmausbreitung



Berechnung
zweimal:
Mit und ohne
Projekt



Monetäre Bewertung



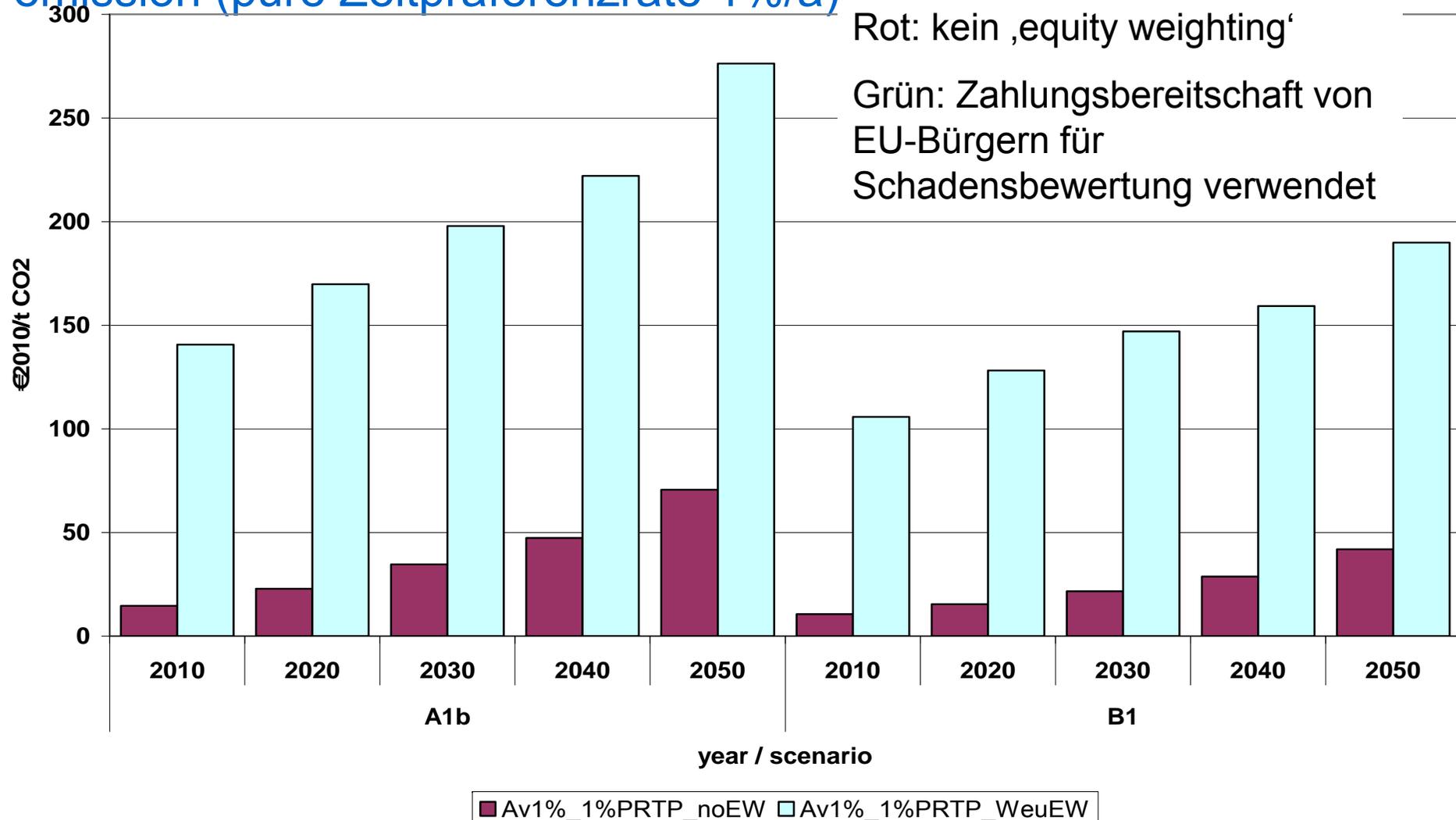


Beispiele für monetäre Werte für Gesundheitsrisiken (EUR 2010)

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

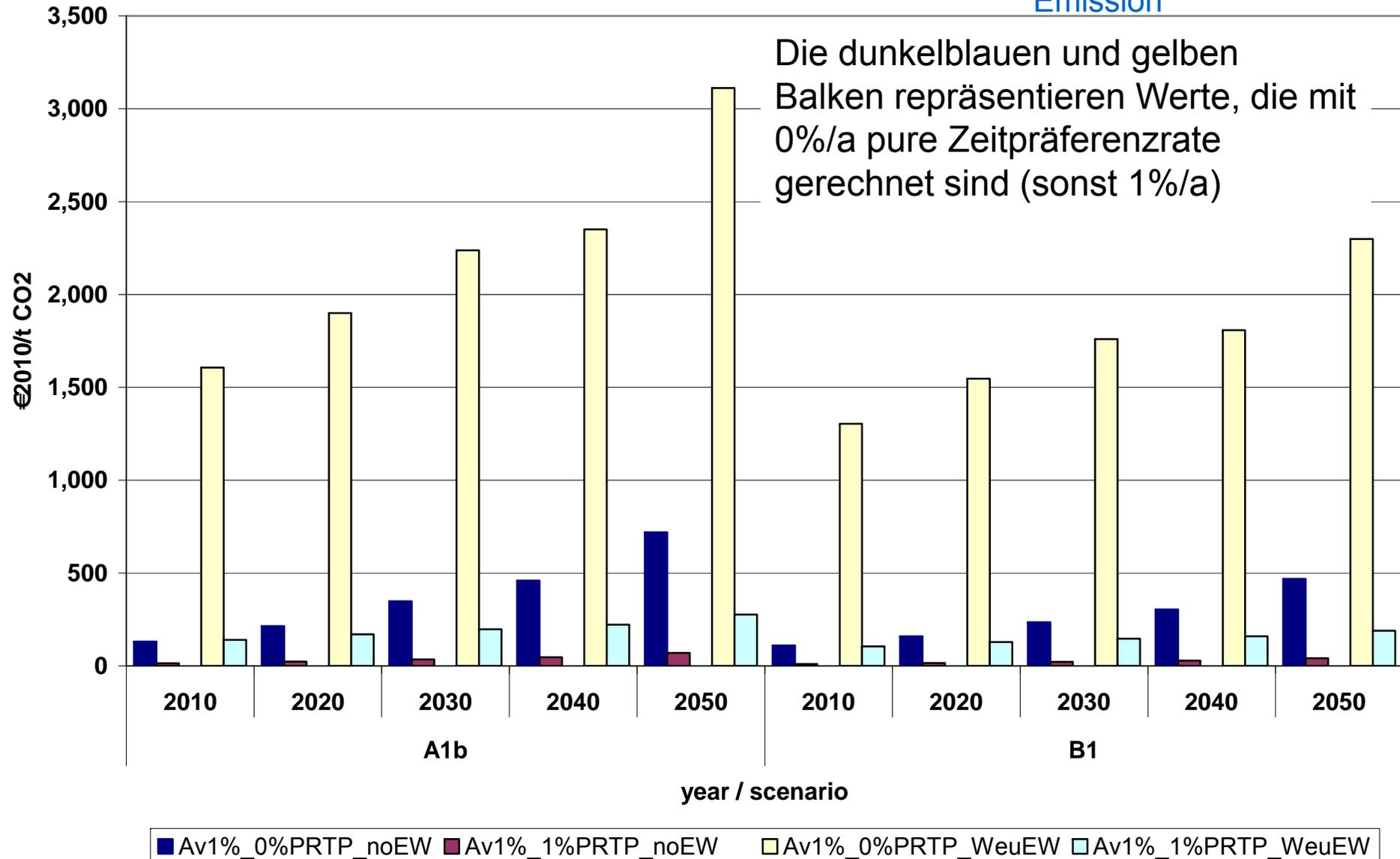


Bewertung der Emissionen von Treibhausgasen: marginale Schadenskosten berechnet mit FUND (Tol) in €₂₀₁₀/t CO₂ in year of emission (pure Zeitpräferenzrate 1%/a)





Marginale Schadenskosten (FUND) €₂₀₁₀/t CO₂ abgezinst auf Jahr der Emission





Bewertung von Treibhausgasemissionen mit Vermeidungskosten

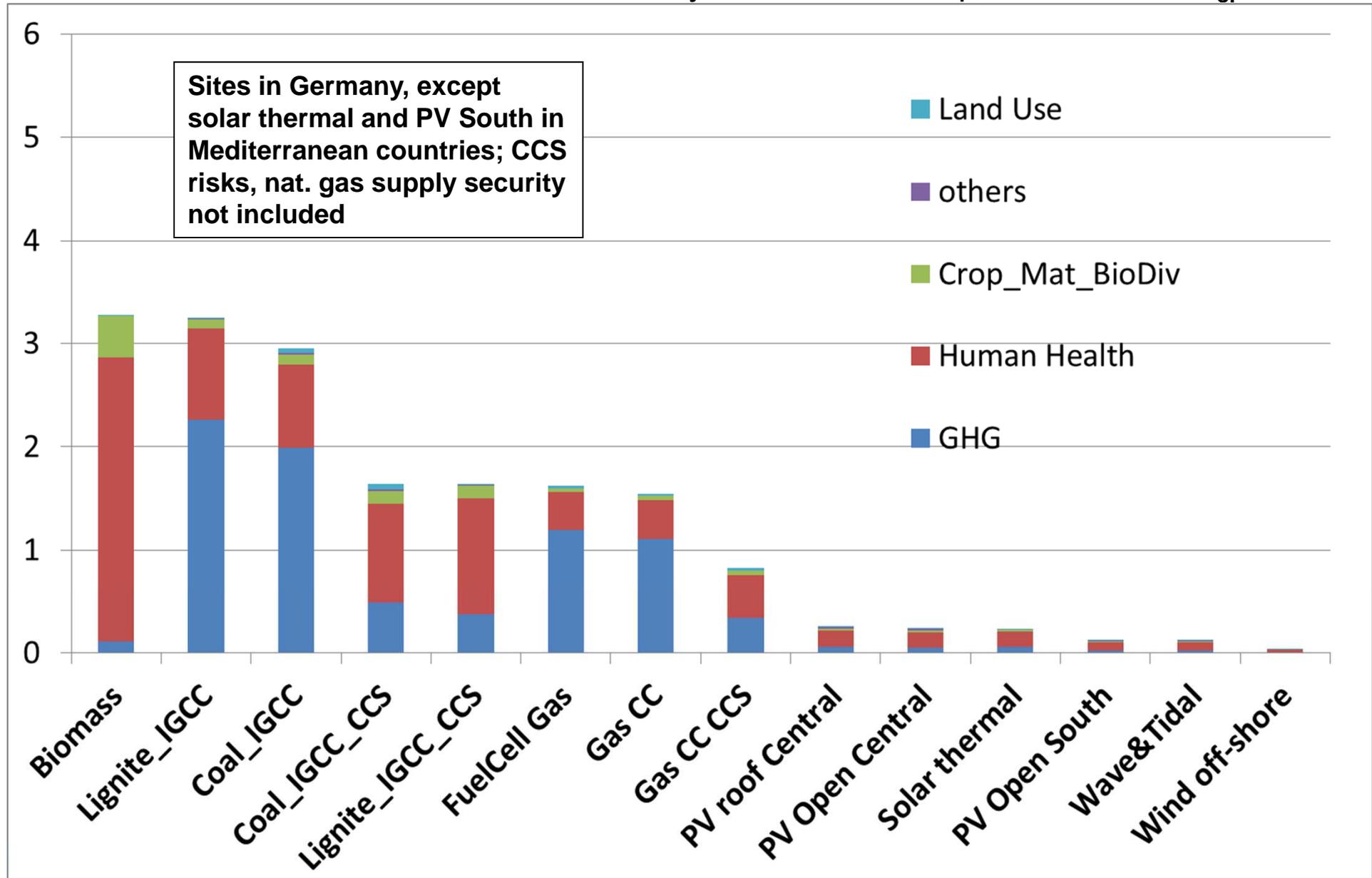
[Euro 2010 per tonne CO ₂ eq]	2010	2015	2025	2035	2045	2050
Kyoto/20%+	26	30	36	42	74	87
2° max	36	46	73	119	194	250

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.

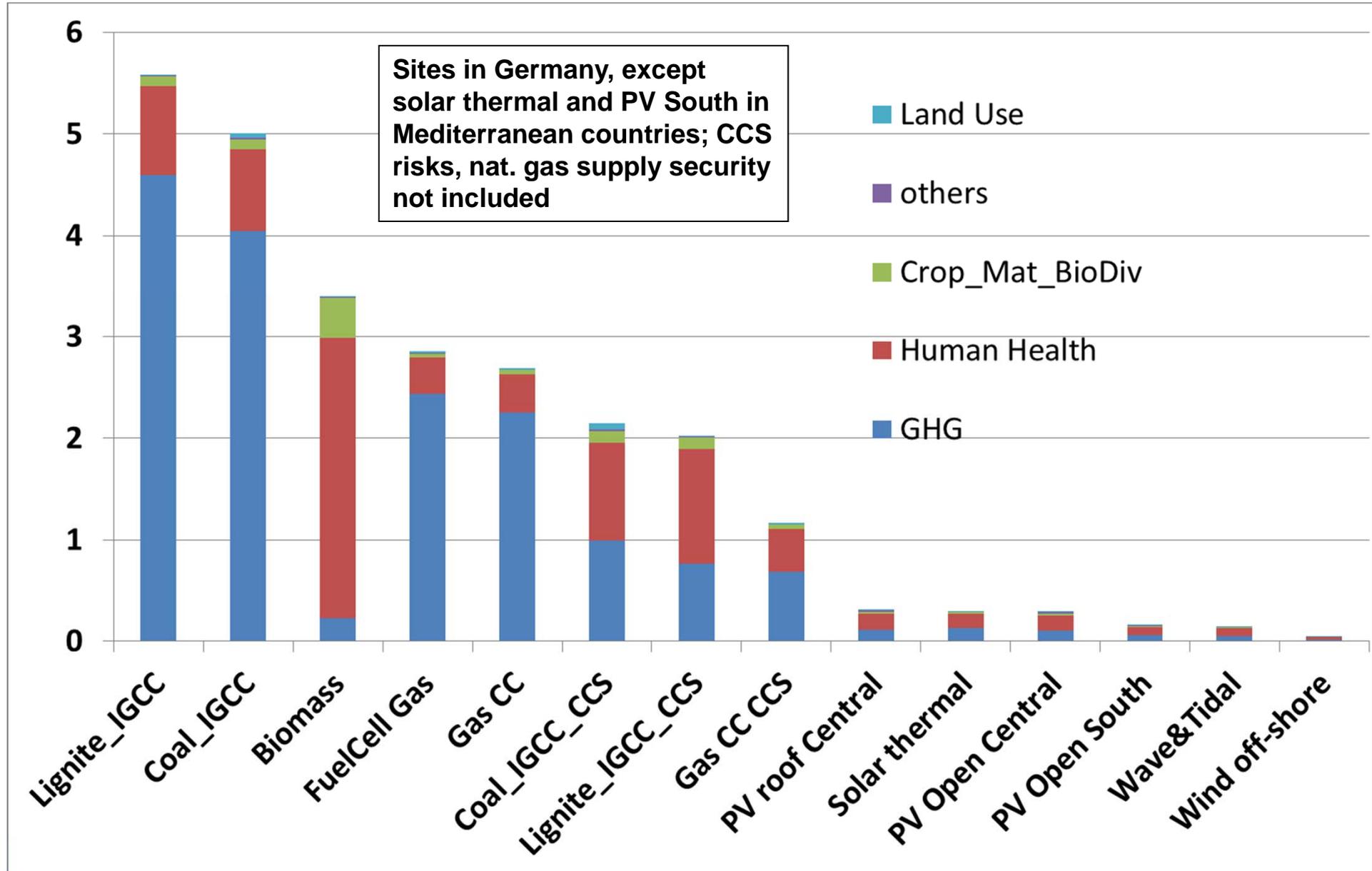


External Costs 2025 Scenario Kyoto+ 36€/tCO₂eq , in €cent/kWh_{el}

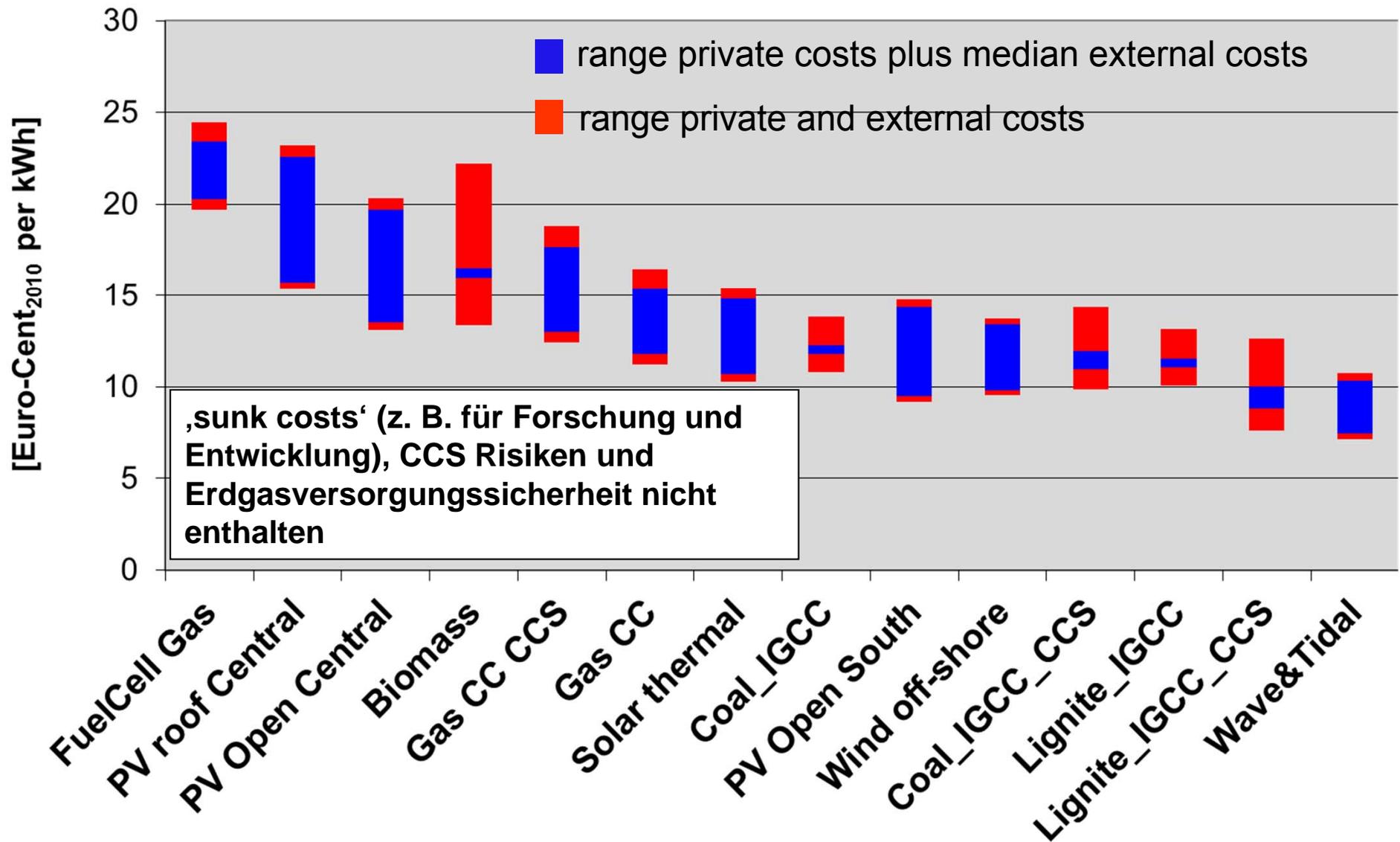




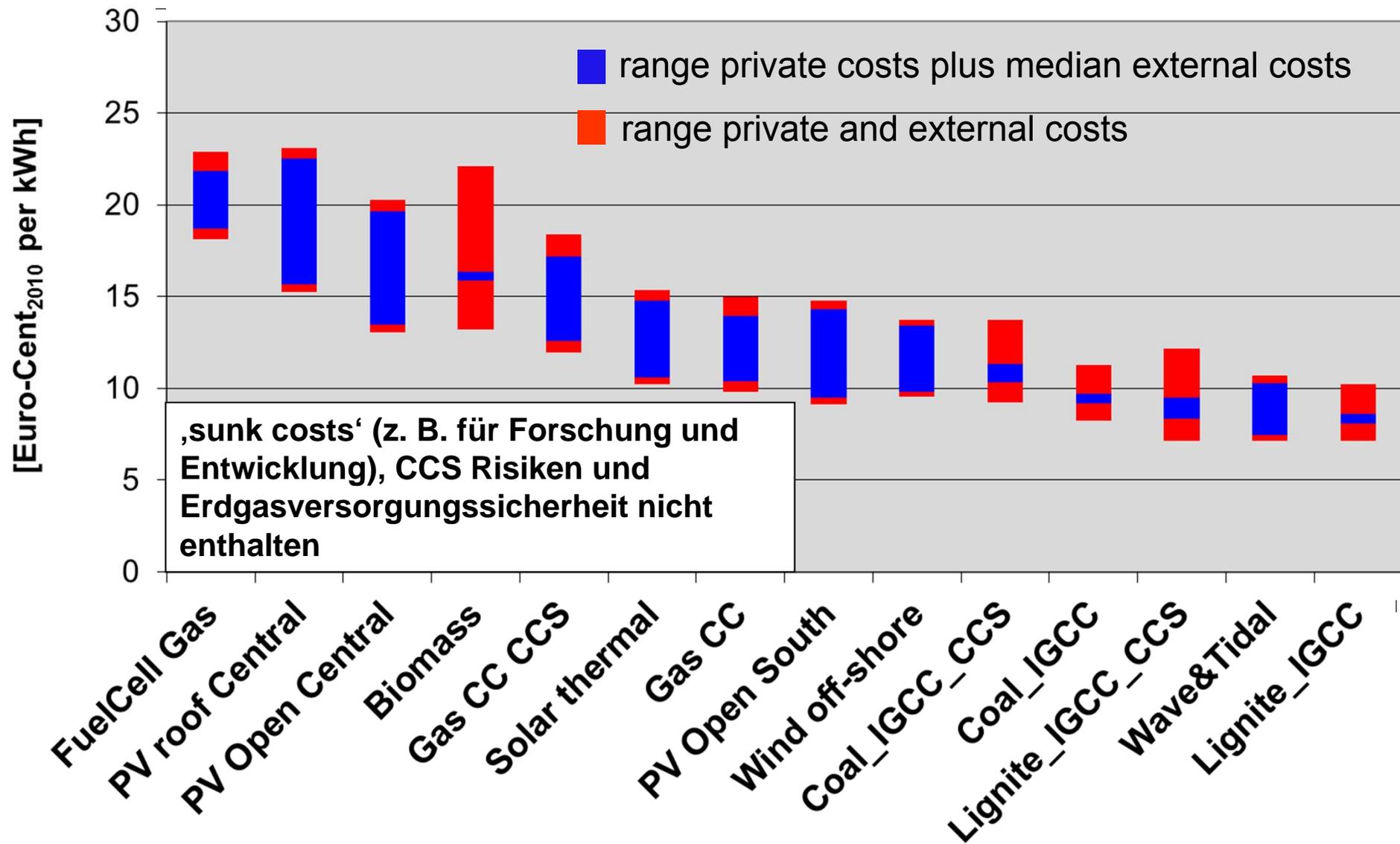
External Costs 2025 Scenario 2° max, ca. 73€/tCO₂eq, in €cent/kWh_{el}



Soziale Kosten von neuen Stromerzeugungsanlagen Inbetriebnahme 2025; Bewertung GHG: 73€/tCO₂eq



Soziale Kosten von neuen Stromerzeugungsanlagen Inbetriebnahme 2025; Bewertung GHG: 36 €/tCO₂eq



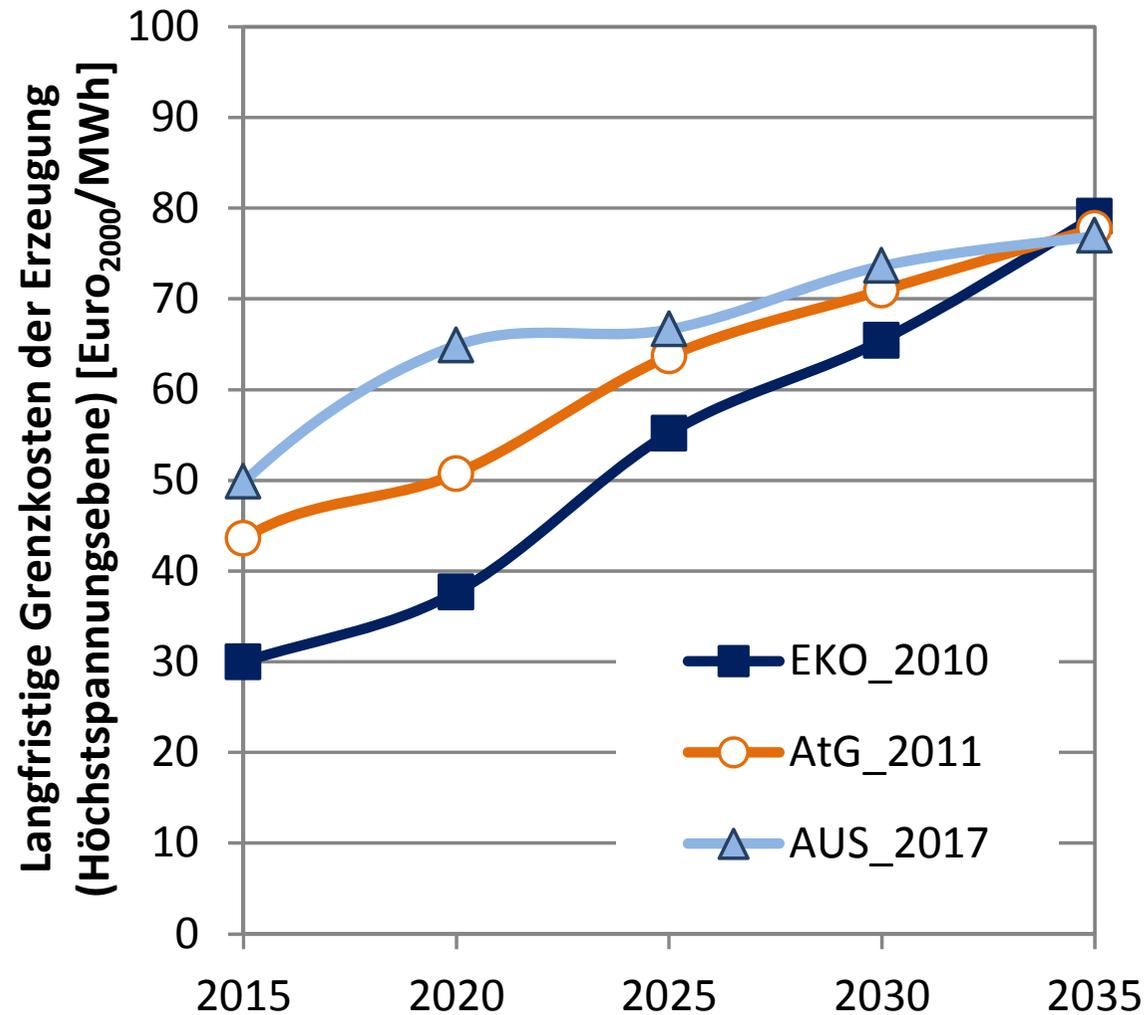


Szenariendefinition

Szenario	Kernenergienutzung	Anteil Erneuerbarer Energien am Bruttostromverbrauch	Klimaschutzziel (THG-Einsparung)
EKO_2010	<ul style="list-style-type: none">- Deutschland: 44 Jahre- Ausstieg in Spanien, Belgien- Sonstige EU-Staaten: Kapazitätshaltung bzw. Ausbau	Deutschland: 40% bis 2020 60% bis 2035 80% bis 2050	Deutschland: 40% bis 2020 62,5% bis 2035 85% bis 2050
AtG_2011	<ul style="list-style-type: none">- Ausstieg in Deutschland bis zum Jahr 2022- Übrige EU-Staaten wie in Szenario EKO_2010	EU-27: 30% bis 2020 45% bis 2035 60% bis 2050	EU-27: 30% bis 2020 52,5% bis 2035 75% bis 2050
AUS_2017	<ul style="list-style-type: none">- Ausstieg in Deutschland bis zum Jahr 2017- Übrige EU-Staaten wie in Szenario EKO_2010		(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. € ₂₀₀₀]	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 CO₂-Speicherkapazität begrenzt.**
- **Vor allem Braunkohle stellt sich daher als günstig heraus. Mit CCS, wenn**
 - **das '2°'-Klimaschutzziel erreicht werden soll**
 - **Kosten für CO₂-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 CO₂-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 ;**
- **Informationen zur Entwicklung von Stromerzeugungstechniken wurden im Projekt NEEDS erarbeitet: www.needs-project.org**