



Bewertung der Stromerzeugung mit Kernenergie

Rainer Friedrich

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung
Universität Stuttgart

DPG-AKE

5. Mai 2011 in Bad Honnef



Entscheidungen erforderlich über:

- *Investitionen* (*Investor = Stromerzeugungsunternehmen*)
- *Entwicklungsziele* (*Hersteller, Anbieter*)
- *Subventionen, Vergabe von
Forschungsmitteln, Lenkungssteuern, Verbote*
(*öffentliche Hand*)
- *Umweltvorschriften* (*öffentliche Hand*)



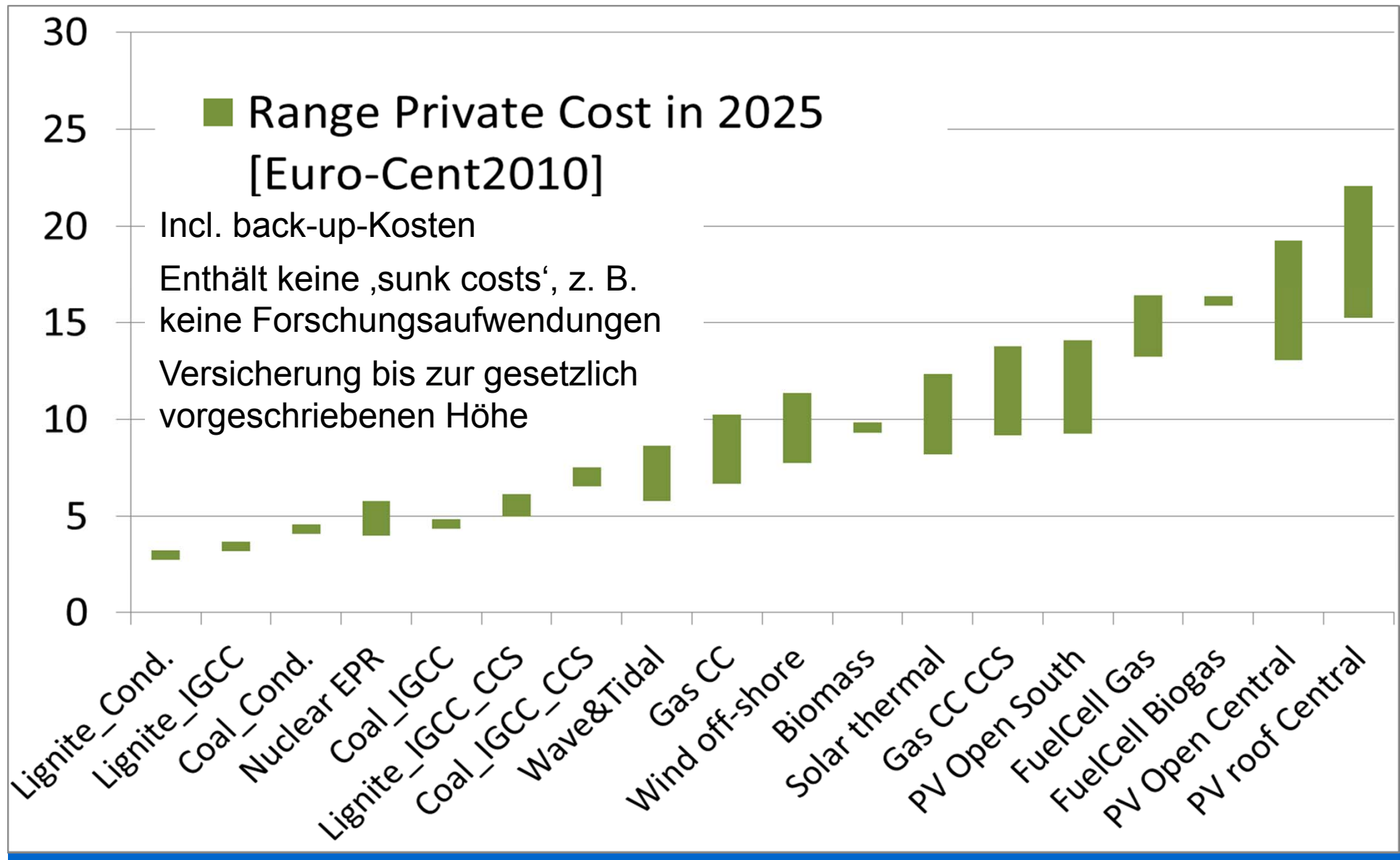
Stromerzeugungstechniken verursachen unterschiedliche

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

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



Stromerzeugungungskosten, Inbetriebnahme 2025,





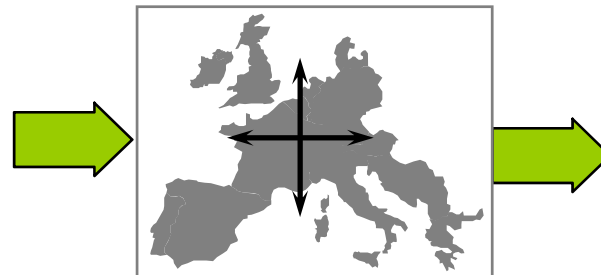
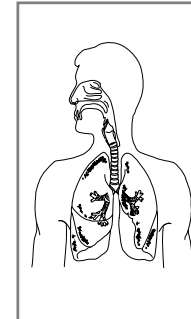
Wirkungspfadanalyse Teil I

**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**

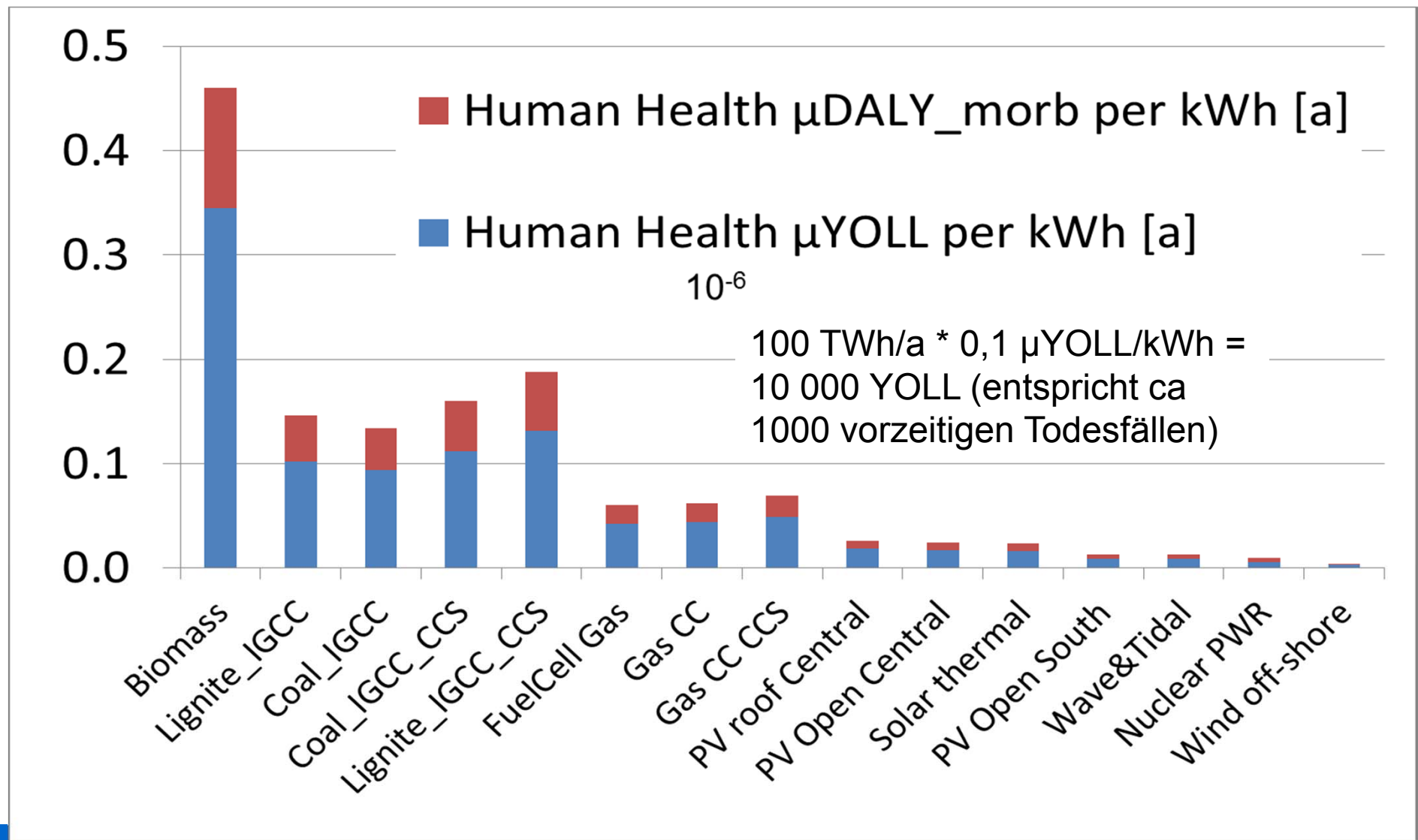


Beispiele für Konzentrations-Wirkungs-Beziehungen (für PM2.5)

Health effect	Relative Risk	Age Group	Population	Impact Function
PM2.5				
Mortality (all cause)	6% (95% CI: 2%, 11%) change per 1 µg/m ³ PM2.5	Adults 30 years and older	General Population	235 years of life lost per µg/m ³ increase in PM2.5 per 100,000 people aged >30
Work loss days (WLDs)	4.6% (95% CI: 3.9%, 5.3%) increase per 10 µg/m ³ PM2.5	15-64 Years	General Population	20,700 (95% CI: 17,600, 23,800) additional work lost days per 10 µg/m ³ increase in PM2.5 per 100,000 people aged 15-64 in the general population per year
Minor Restricted Activity Days (MRADs)	7.4% (95% CI: 6.0%, 8.8%) change per 10 µg/m ³ PM2.5	18-64 Years	General Population	57,700 (95% CI: 46,800, 68,600) additional MRADs per 10 µg/m ³ increase in PM2.5 per 100,000 adults aged 18-64 (general population) per year
Restricted activity days (RADs)	4.75% (95% CI: 4.17%, 5.33%) change per 10 µg/m ³ PM2.5	18-64 Years	General Population	90,200 (95% CI: 79,200, 101,300) additional RADs per 10 µg/m ³ increase in PM2.5 per 100,000 adults aged 18-64 (general population) per year

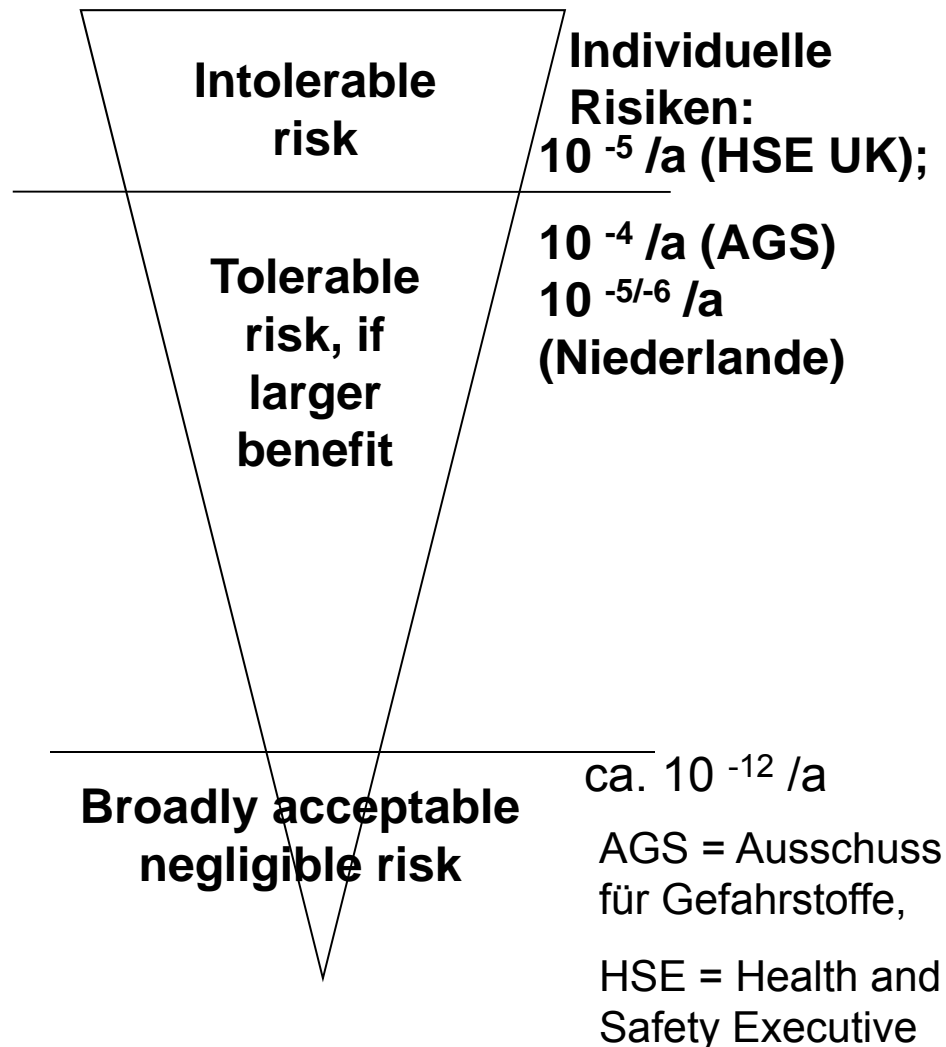


Gesundheitsschäden pro erzeugter kWh für 2025 in Betrieb gehende Kraftwerke, in μ YOLL (10^{-6} years of life lost) und μ DALYs (10^{-6} disability adjusted life years)





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 – siehe jedoch Diskussion über Damokles-Risiken.

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



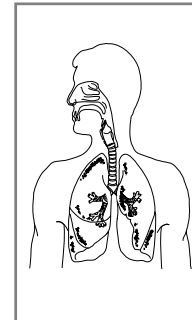
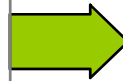
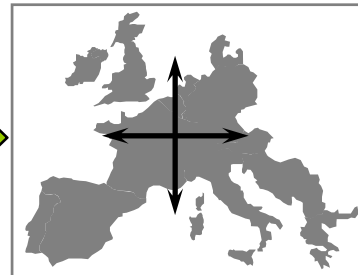
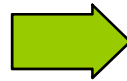
Wirkungspfadanalyse Teil II

Differenz der Schäden

Emission von
Stoffen, Lärm



Transport und
Chemische
Umwandlung;
Lärmausbreitung



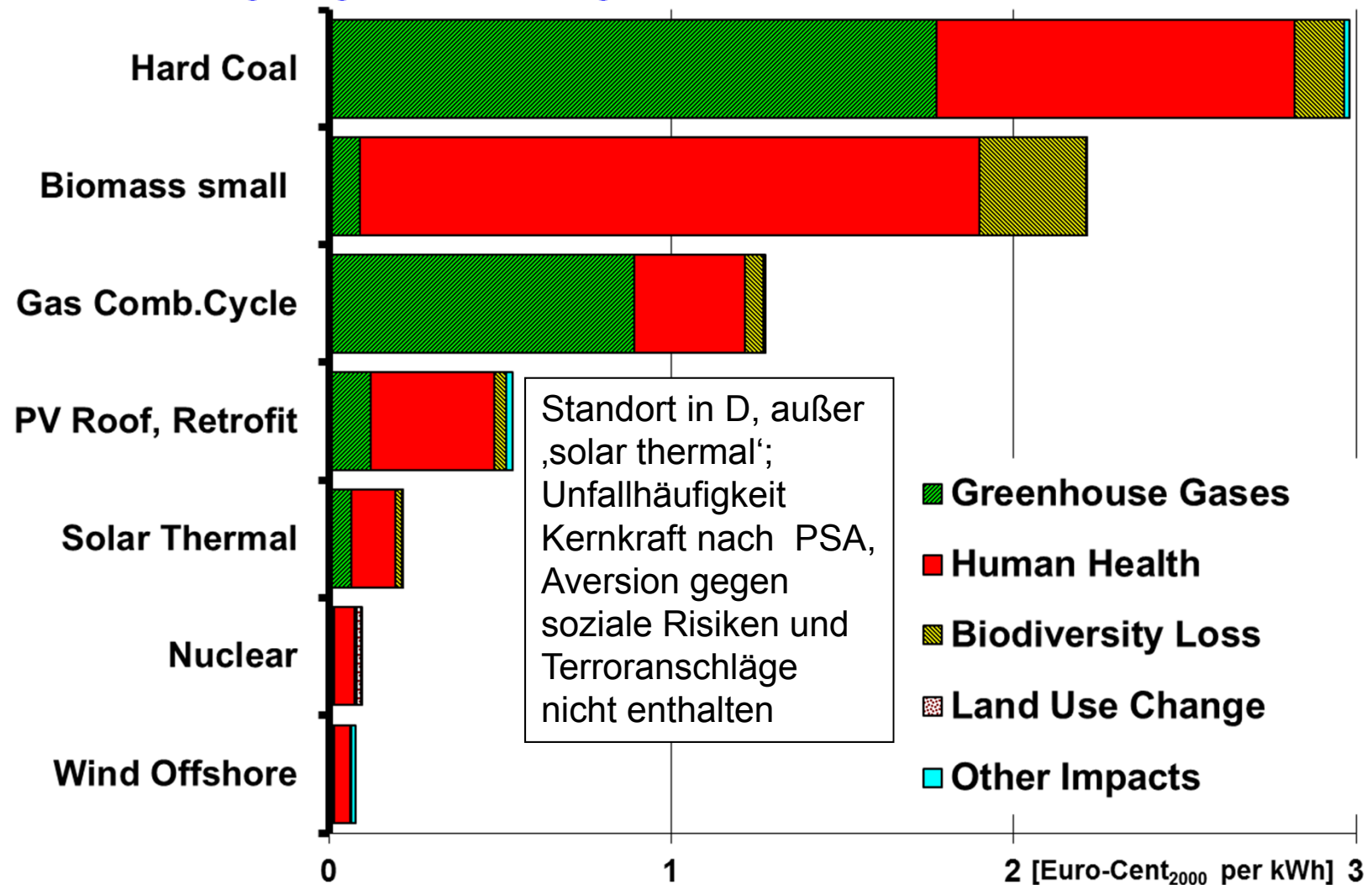
Monetäre Bewertung



Berechnung
zweimal:
Mit und ohne
Projekt



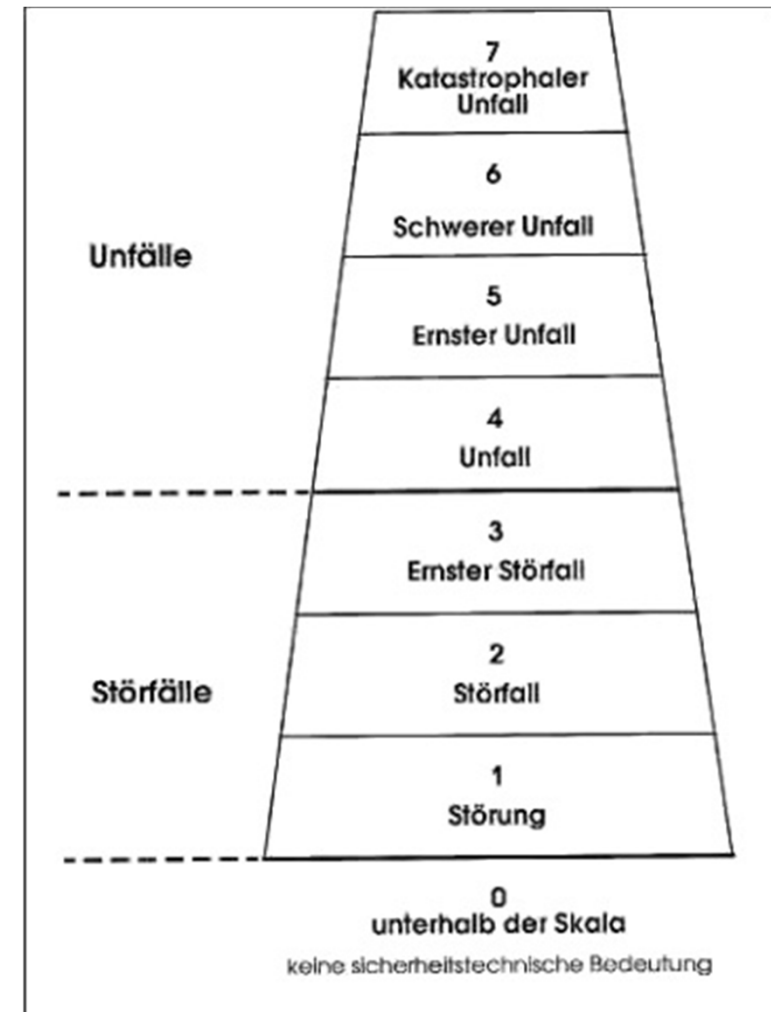
Quantifizierbare externe Kosten von Stromerzeugungstechnologien, Inbetriebnahme ca. 2009





Unfälle Charakterisierung nach INES (international nuclear event scale)

INES Stufe	Freisetzung
7 major accident (Tschernobyl, Fukushima)	Erhebliche Freisetzung (Äquivalent von > einigen 10.000 TBq)
6 serious accident	Erhebliche Freisetzung (einige 1.000 bis einige 10.000 TBq)
5 accident with wider consequences	Begrenzte Freisetzung (einige 100 bis einige 1.000 TBq)
4 accident with local consequences	Geringe Freisetzung (einige 10 bis einige 100 TBq)





Berechnung des Schadensausmaßes

**Inventar, Anteil der Freisetzung (release class, source term),
Wetterverhältnisse, betrachteter Rezeptorraum (Abstand zum Kraftwerk),
Reaktionszeit (early vs. late release) und Möglichkeiten zu Gegenmaßnahmen
Berücksichtigte Rezeptoren & Schadenskategorien:**

- **Menschliche Gesundheit: Unmittelbare Todesfälle, latent tödliche Krebsfälle, nicht-tödliche Krebsfälle (z.B. Schilddrüsenkrebs), Erbgutschädigung.**
- **Evakuierung und Langzeitumsiedlung – Verlust von Lebensraum und Wirtschaftsfläche.**

Evakuierung ab 100 mSv/Woche, Umsiedlung ab 100 mSv/Jahr, Dosis von 100 mSv entspricht Häufigkeit von 0,005, an Krebs zu erkranken

Vergleich mit Braunkohlerevier : Entschädigung der EWR Power für ein EFH ca. 270,000.

Wirtschaftsgüter: Produktionsstätten, Infrastruktur, ...

- **Psychologische Effekte (Angst, Ungewissheit über Gesundheit und toxische Stoffe in Lebensmitteln, etc)**



Abschätzung der Folgen eines schweren Kernkraftwerksunfalls: Kumulative Freisetzungssanteile für verschiedene Unfallkategorien, bezogen auf das Kerninventar, nach Deutsche Risikostudie Phase B

Unfallkategorie	Freigesetzter Anteil des Kerninventars						
	Edelgase	Iod	Alkalische Metalle	Tellur-Gruppe	Seltene Erden	Edelmetalle	Metalloxide
Großflächiges Sicherheitsbehälterversagen (DRSB 1)	1		(0,5 bis 0,9)		$3,6 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$
Primärkreisleck im Ringraum (DRSB 2)	1	$3,7 \cdot 10^{-1}$	$3,7 \cdot 10^{-1}$	$2,3 \cdot 10^{-1}$	$1,4 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$
Dampferzeuger-Heizrohrleck ohne Wasservorlage im defekten Dampferzeuger (DRSB 3)	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$1,5 \cdot 10^{-1}$	$5,0 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-4}$	$8,8 \cdot 10^{-8}$	$2,1 \cdot 10^{-9}$
Dampferzeuger-Heizrohrleck mit Wasservorlage im defekten Dampferzeuger (DRSB 4)	$1,7 \cdot 10^{-1}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$1,5 \cdot 10^{-2}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-8}$	$3,8 \cdot 10^{-10}$
Erhöhte Leckage des Sicherheitsbehälters über Ringraum und Hilfsanlagengebäude (DRSB 5)	1	$7,8 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$2,1 \cdot 10^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,6 \cdot 10^{-7}$	$1,1 \cdot 10^{-5}$
Gezielte Druckentlastung bei 0,6 MPa und Freisetzung über Kamin (DRSB6)	$9 \cdot 10^{-1}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-7}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$	$1,9 \cdot 10^{-7}$	$6,4 \cdot 10^{-10}$	$3,3 \cdot 10^{-8}$



Abschätzung der Folgen eines schweren Kernkraftwerksunfalls

Modellrechnungen für ein hypothetisches Kraftwerk im südwestdeutschen Raum; Freisetzung nach Deutsche Risikostudie B; betrachteter Zeitraum: bis 200 Jahre nach dem Unfall

Unfallkategorie	Früh-schäden	Spätschäden (stochastisch)			
	Todesfälle	Kollektivdosis [Pers.Sv]	tödliche Krebsfälle	nicht-tödliche Krebsfälle	genetische Effekte
DRSB 1	164	$1,04 \cdot 10^6$	52 000	124 800	10 400
DRSB 2	63	$6,4 \cdot 10^5$	32 000	76 800	6 400
DRSB 3	-	$1,7 \cdot 10^5$	8 500	20 400	1 700
DRSB 4	-	$6,1 \cdot 10^4$	3 050	7 320	610
DRSB 5	-	$6,8 \cdot 10^3$	340	816	68
DRSB 6	-	$6,8 \cdot 10^2$	34	82	7

Zum Vergleich: insges. 22 Mio Krebstote (alle Ursachen) in Deutschland in 100 Jahren



Evakuierungs- und Umsiedlungsfläche bei einer großen Freisetzung

(berechnet mit RODOS, Quelle: Bundestagsdrucksache 17/2871)

Wettersituation Wind: Richtung: Niederschl.	Evakuierungsfläche km²	Entspricht Kreis mit Radius km	Fläche für langfristige Umsiedlung km²	Entspricht Radius km
stark wechselnd trocken	110	6	80	5
stark konstant trocken	500	13	400	11
mäßig wechselnd trocken	270	9	160	7
mäßig konstant trocken	900	17	1200	20
schwach wechselnd trocken	500	13	350	11
schwach konstant trocken	800	16	700	15
stark wechselnd 1 mm/h	4800	39	22900	85
stark konstant 1 mm/h	5800	43	9900	56
mäßig wechselnd 1 mm/h	4500	38	15600	71
mäßig konstant 1 mm/h	3000	31	6200	44
schwach wechselnd 1 mm/h	4300	37	10100	57
schwach konstant 1 mm/h	1500	22	2700	29



Bevölkerung in der Umgebung von Kernkraftwerken (in 1000 Personen)

Radius	10 km	20 km	30 km	40 km
Biblis A	126	568	1580	2724
Gundremmingen B	43	196	514	1092

Gesamtschaden ca. 250 Mrd. € bis 2 000 Mrd. € pro Unfall mit großer Freisetzung von Radioaktivität, bei Mittelung über Wettersituationen ca. 450 – 1 000 Mrd. € - es handelt sich um Zahlungsbereitschaften, Entschädigungsforderungen sind geringer

Zum Vergleich: BIP (Bruttoinlandsprodukt) Deutschland: 2 500 Mrd. €/a;

Schätzung von Entschädigungsforderungen an TEPCO laut Presseberichten: 25 – 90 Mrd. €



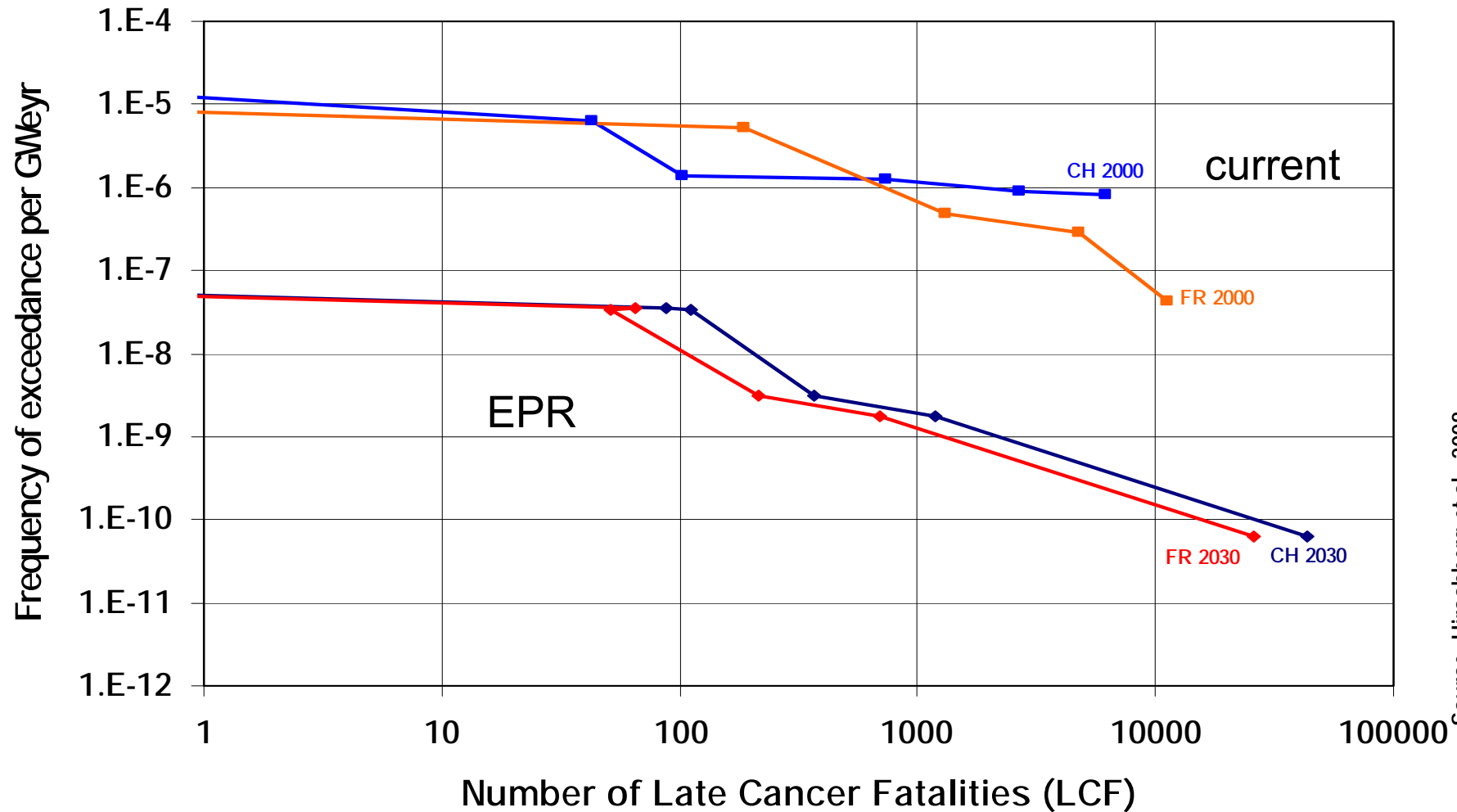
Ermittlung der Häufigkeit von Unfällen

- **Probabilistische Sicherheitsanalysen (PSA)** dienen dazu das ‚Restrisiko‘ zu quantifizieren.
- **Meist kein Bestandteil von Sicherheitsanalysen:**
Krieg, Sabotage, Terrorangriff, Meteoritenabsturz, nicht vorhergesehene Bedienungsfehler



Häufigkeit von Unfällen:

F-N Curves: Latent Cancer Fatalities (LCF) for current nuclear power plants and EPR (European Pressurized Reactor) source: Hirschberg, 2008



Source: Hirschberg et al., 2008



Häufigkeit von Unfällen nach PSA:

- **PSA Ergebnisse sind nicht im Detail veröffentlicht (außer Deutsche Risikostudie für Biblis B);**
- **Schätzungen (Quelle: Bundesamt für Strahlenschutz):**
Konvoireaktoren: ‚Gefährdungszustände‘ ca. 10^{-6} /a (nicht alle Gefährdungszustände führen zu Kernschäden);
Kernschadenshäufigkeit durch anlageninternen Notfallschutz ca Faktor 10 geringer (10^{-7} /a) , nach GRS-175, 2001 10^{-8} /a für große Freisetzung.
Vorkonvoi: Gefährdungshäufigkeit $4 \cdot 10^{-6}$ /a – $4 \cdot 10^{-5}$ /a,
Kernschadenshäufigkeit Faktor 3 bis 10 geringer



Statistische Analyse

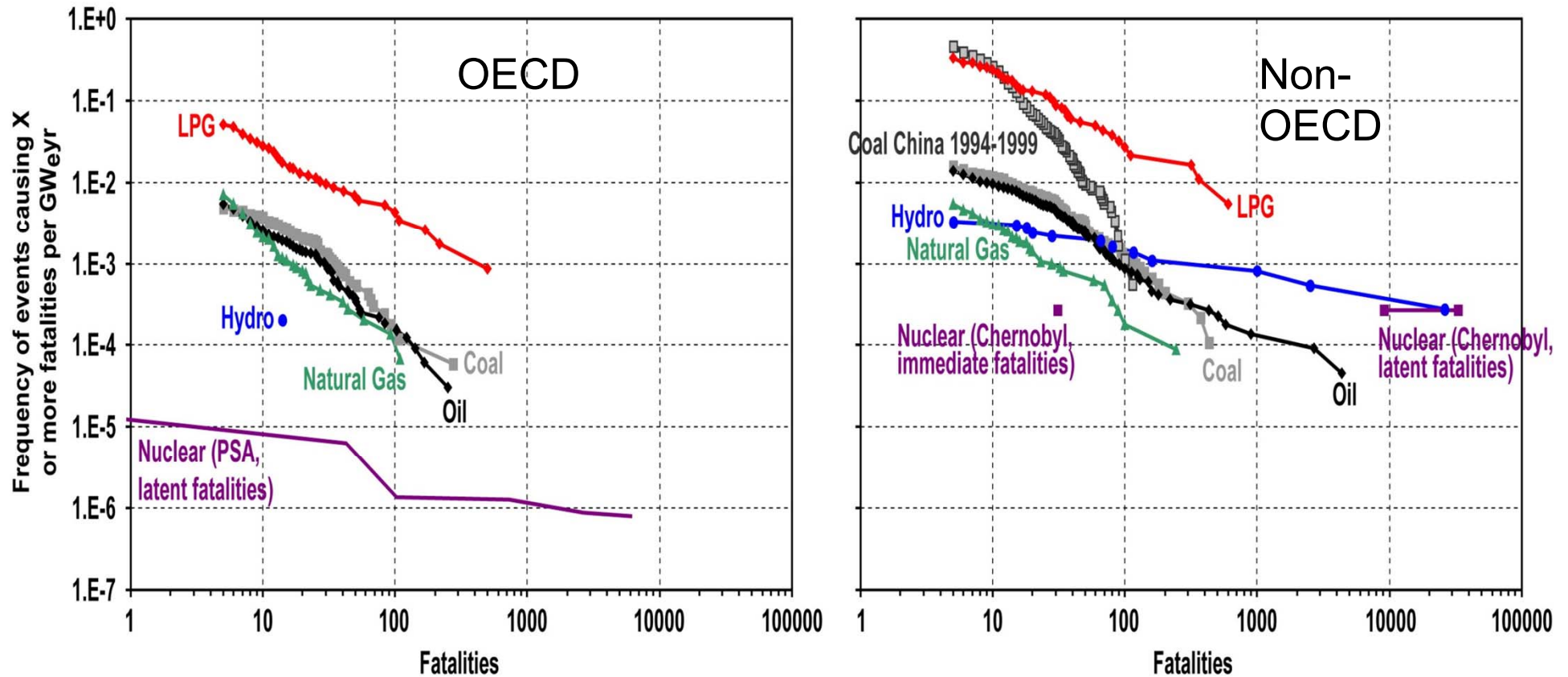
- **Hochrechnung aus Häufigkeiten der Kategorien INES 4 und 5 auf 6 und 7 ergibt für aktuelle globale Häufigkeiten (nach Weil, 2002):**
 - INES 6 und 7: $1 * 10^{-4}$ pro Reaktor und Jahr; (95% Konfidenzintervall $4,5 * 10^{-4}$ bis $4,5 * 10^{-7}$; d. h. hohe Unsicherheit)**
 - INES 4 und 5: $3 * 10^{-4}$ pro Reaktor und Jahr ($9 * 10^{-4}$ bis $4,5 * 10^{-5}$)**
 - Mit abnehmender Tendenz durch technischen Fortschritt bis 2025**
- **Statistische Analyse mit Fukushima (nach Kauermann und Küchenhoff, 2011) für INES 7:**

alle Reaktoren mit Tschernobyl:
 $1,5 * 10^{-4}$ pro Reaktor und Jahr ($4 * 10^{-5}$ bis $5,5 * 10^{-4}$)

nur westliche Reaktoren ohne Tschernobyl:
 $1 * 10^{-4}$ pro Reaktor und Jahr ($5,2 * 10^{-6}$ bis $5,8 * 10^{-4}$)



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 Dammburch in OECD Ländern > 1000 Tote in Vaiont, Italien; 1917 Tote).

Quelle: Hirschberg, PSI



Risiko eines großen Unfalls:

- **Risiko = Häufigkeit * Schaden = Erwartungswert des Schadens**
- **Häufigkeit:** nach PSA: 10^{-7} bis 10^{-8} /(Jahr und Anlage)
statistische Häufigkeit: 10^{-4} /(Jahr und Anlage)
- **Grobe Schätzung des Schadens:** 450 – 1 000 Mrd. € pro großem Unfall
- **Risiko mit PSA:** $(0,45 - 1 * 10^{12} \text{ €}) * (10^{-7} /a - 10^{-8} /a) / (9,4 * 10^9 \text{ kWh/a}) =$
0,000021 – 0,00000027 €/kWh, für EPR Faktor 1000 kleiner
- **Risiko mit stat. Häufigkeit:** $(0,45 \text{ bis } 1 * 10^{12} \text{ €}) * (10^{-4} /a) / (9,4 * 10^9 \text{ kWh/a}) =$
0,01 – 0,005 €/kWh

Selbst bei Berücksichtigung des höchsten Wertes von 1 €cent/kWh würde die Kernenergie die Stromerzeugungstechnik mit den geringsten sozialen Kosten bleiben.



Bewertung als Damoklesrisiko/ soziales Risiko:

- Ein hoher Schaden selbst bei sehr niedriger Häufigkeit und/oder ein angstmachendes Ereignis mit hohem potentiellen Schaden und sehr geringer oder ungewisser Häufigkeit, also ein Damoklesrisiko, wird meist als schlimmer bewertet als das gleiche Risiko mit geringerem Schaden und größerer Häufigkeit.
- Quantitative Ansätze zur Bewertung sozialer Risiken in anderen Ländern:
Schweiz: Faktor 100 (Bewertung der Kernenergie mit PSA keine Änderung, bei 'statistischer' Bewertung Verschlechterung)
Niederlande: tolerable risk $10^{-3} / N^2$ (N = Anzahl der deterministischen Schäden), würde Kernkraftwerke ausschließen, falls auch stochastische Schäden einbezogen würden (was nicht der Fall ist).
- Zur Zeit kein Vorschlag zur generellen Behandlung von Damoklesrisiken in Deutschland. Daher gesellschaftliche Einzelentscheidung, ob Risiko tolerierbar.
- In Deutschland ist der Bau neuer Kernkraftwerke verboten, dies kann als Entscheidung, das Risiko langfristig nicht zu akzeptieren, interpretiert werden.
- Dies führt zu einer Verringerung von sozialen Risiken (Damoklesrisiken), aber zu einer Erhöhung der Summe individueller Gesundheitsrisiken und höheren negativen ökonomischen und sozialen Folgen.



Fazit

- Bei Bewertung mit individuellen Risiken sind die sozialen Kosten der Kernenergie auch dann gering, wenn eine erhöhte Häufigkeit von Unfällen unterstellt wird. Für zukünftige Techniken könnte das Risiko weiter verringert werden.
- Die Ablehnung der Mehrheit der Bevölkerung in Deutschland resultiert aus der Ablehnung des ‚sozialen Risikos‘, d.h. des hohen potentiellen gesellschaftlichen Schadens und der Umstände des Schadens – insbesondere der potentiellen längerfristigen Sperrung größerer teils dicht besiedelter Gebiete, daneben dem lang anhaltenden diffusen Risiko durch zusätzliche Strahlung.