

Stärken und Schwächen der Kernenergie: Vergleich mit anderen Optionen

Dr. Stefan Hirschberg

Leiter des Labors für Energiesystem-Analysen, Paul Scherrer Institut, Schweiz

SES-Fachtagung, Zürich, 12. September 2008

Inhalt

- Energieforschung und Energiesystem-Analysen am PSI
- Nachhaltigkeit
- Kernenergie: Rückblick
- Ökologie
- Ökonomie
- Soziale Aspekte
- Bewertung von Nachhaltigkeit
- Kernenergie für Morgen
- Schlussfolgerungen

Für Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit

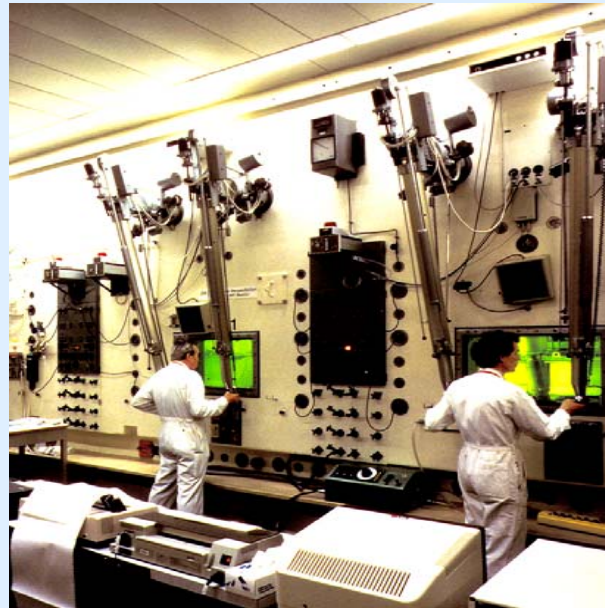
Allgemeine Energie



- Förderung erneuerbarer Energien und **Speicherung und Umwandlung** von Energie.
- Entwicklung von neuen Techniken zur **Reduktion von Emissionen**.
- Entwicklung von **Brennstoffzellen** für den vielseitigen Einsatz.
- Untersuchung des Transports und der dabei ablaufenden chemischen Umwandlungsprozesse von Luftschadstoffen.

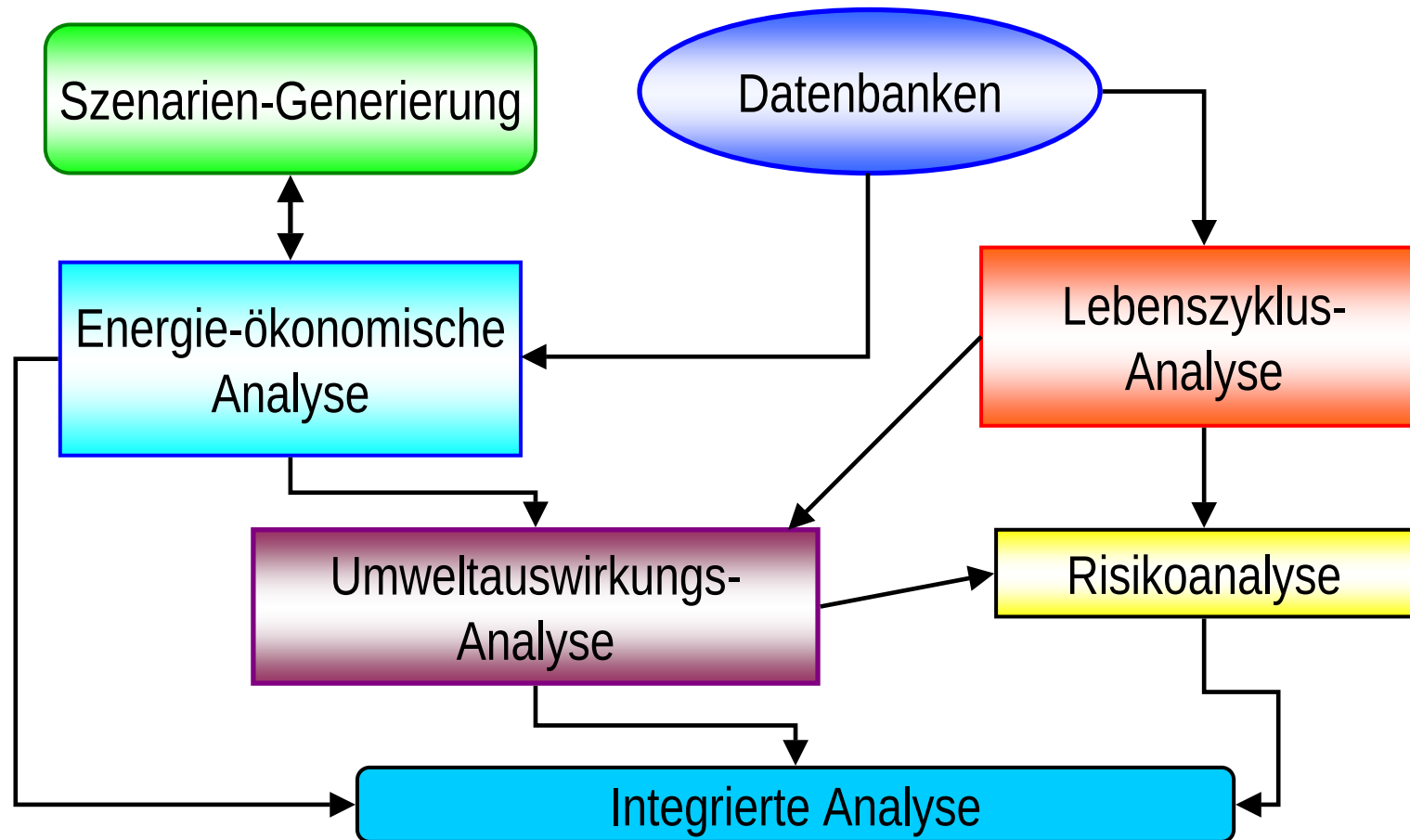
Für Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit

Nukleare Energie und Sicherheit



- Sicherheit der einheimischen Kernkraftwerke und Beiträge zur Lösung der Abfallthematik
- Erforschung der Sicherheitsmerkmale zukünftiger Reaktorkonzepte
- Evaluation der Sicherheit zukünftiger Endlagerstätten für radioaktiven Abfall

Integrierte Energiesystem-Analysen am PSI



Kernenergie weltweit (Status 2008)

- 439 Anlagen (372 GW_e) in Betrieb in 30 Ländern
- Ungefähr 16% der Elektrizität weltweit; in den OECD-Ländern knapp 25%
- Verlängerung der Betriebsdauer vorhandener Anlagen; Inbetriebnahme von 14 neuen Einheiten (2004 – 2007); 35 Einheiten im Bau (29 GW_e)
- Über 13'000 Reaktorjahre mehrheitlich positiver Betriebserfahrung; Ausnahmen: TMI (1975), Tschernobyl (1986)
- Reaktion auf öffentliche Bedenken: kontinuierliche Verbesserungen der Sicherheit
- Positiver Trend für die Kernenergie, aber gemischte Bilanz
- 700 Millionen Tonnen CO₂ können durch die Kernenergie jedes Jahr in der EU-25 vermieden werden (entspricht ungefähr der Gesamtmenge CO₂, die durch die 200 Millionen Personenwagen in der EU emittiert werden)
- Vermeidung von jährlich 4.8 Millionen Tonnen SO₂ und 2.6 Millionen Tonnen NO_x in der EU

Kriterien der Nachhaltigkeit (Beispiele)

Ökonomie:



Kosten, Versorgungssicherheit

Stromerzeugungskosten (Produktion)

Finanzielle Risiken

Autonomie der Stromproduktion

Ökologie:



Ressourcen, Emissionen, Klima

Treibhausgasemissionen

Ressourcenverbrauch

Schäden an Ökosystemen

Soziales:

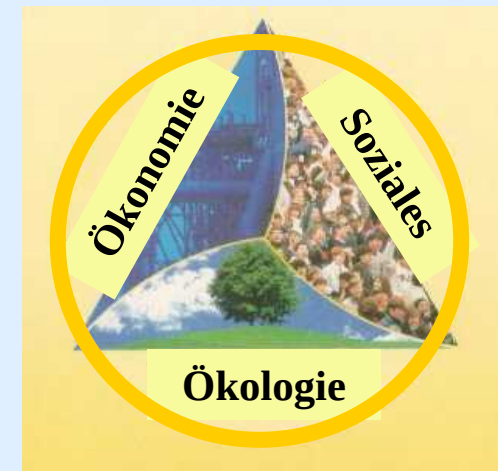


Akzeptanz, Fairness

problematische Abfälle

Todesfälle durch Schadstoffemissionen & Unfälle

Landschaftsqualität

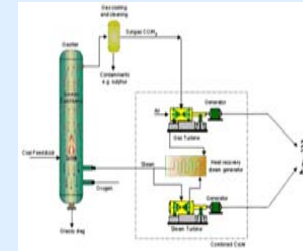


Technologiespektrum

KKW



Steinkohle



Erdgas



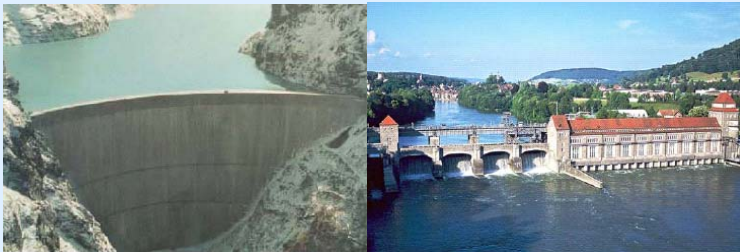
SOFC



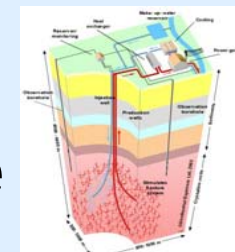
SNG



Wasser



Geothermie



Wind



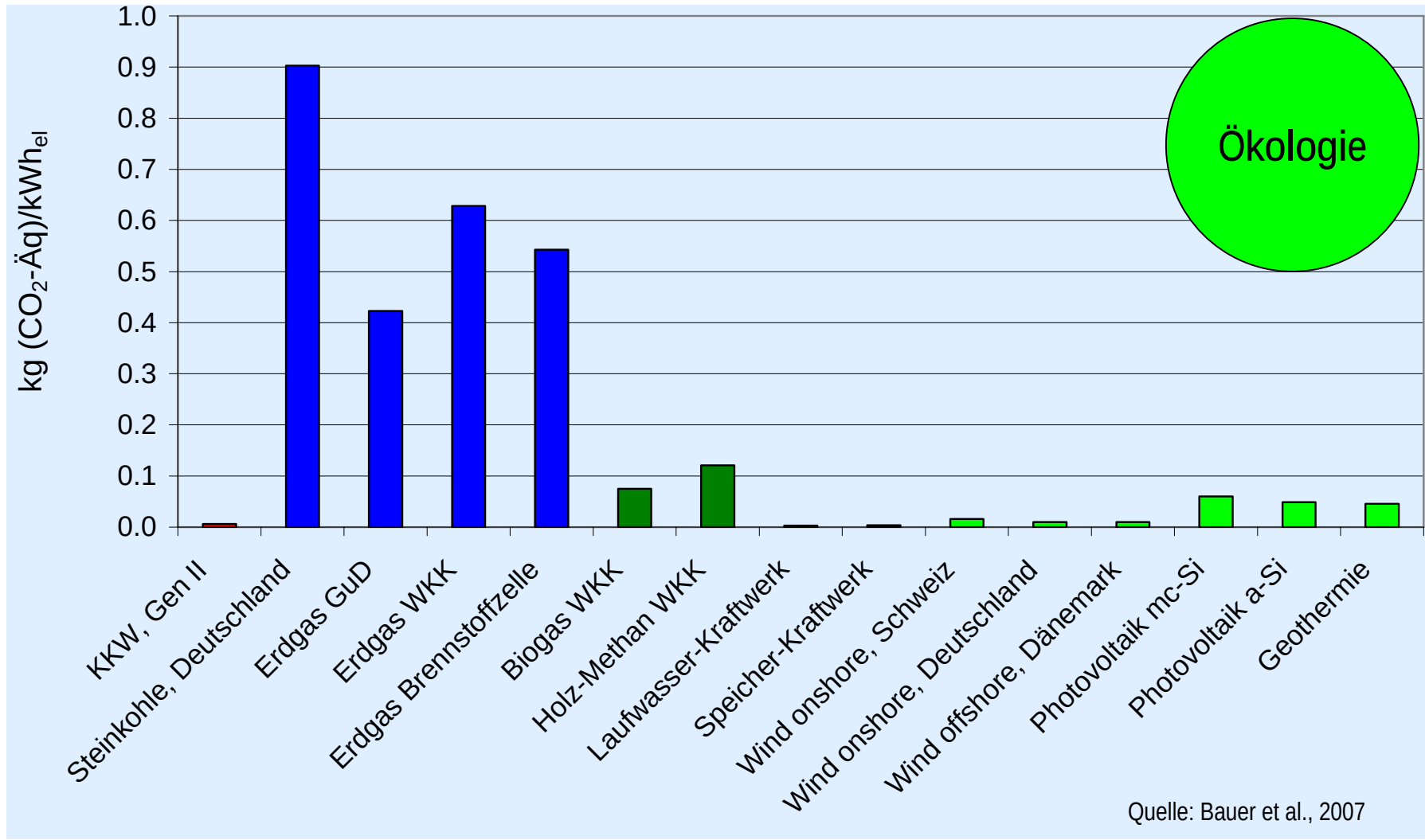
Biogas



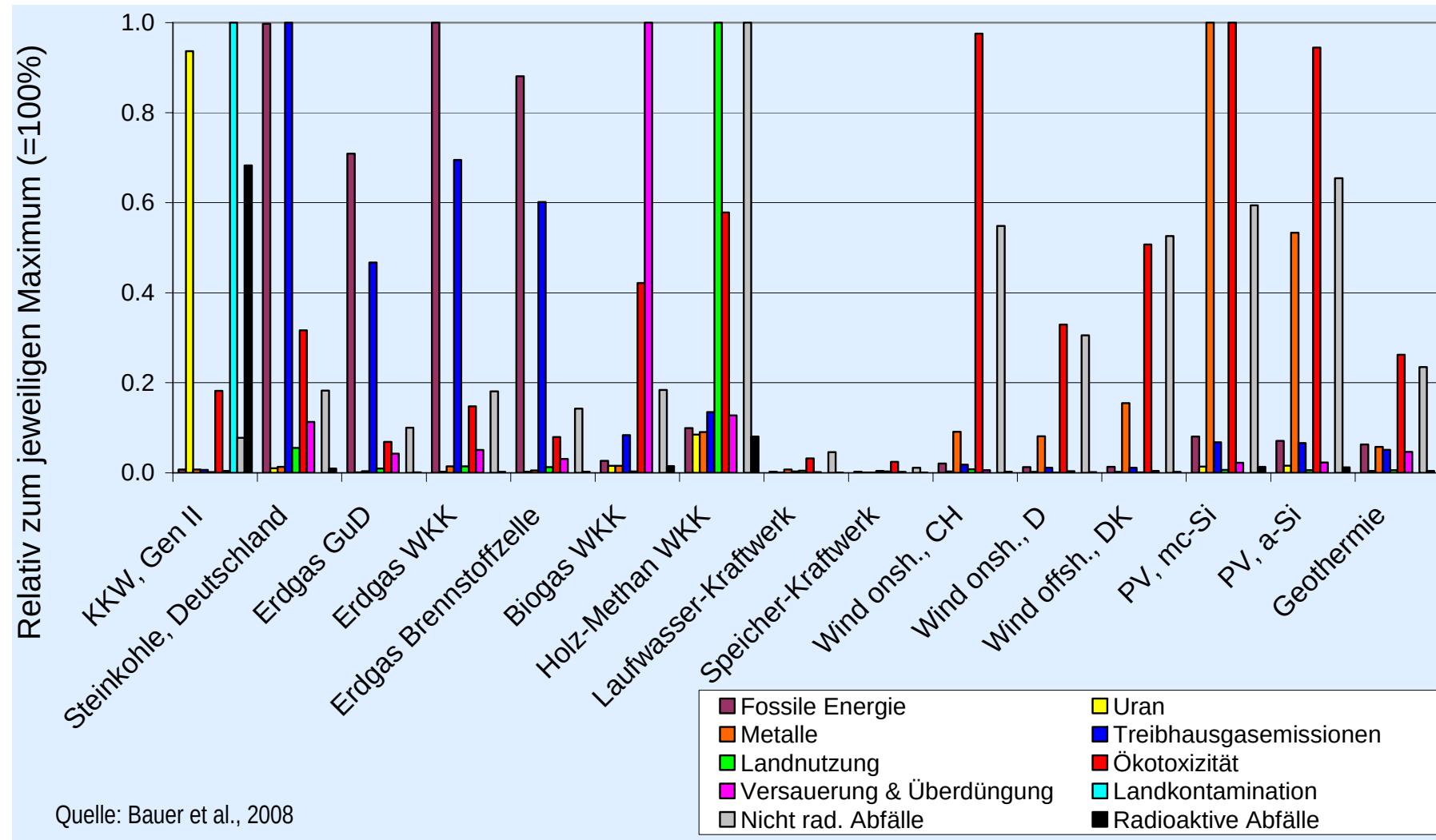
PV



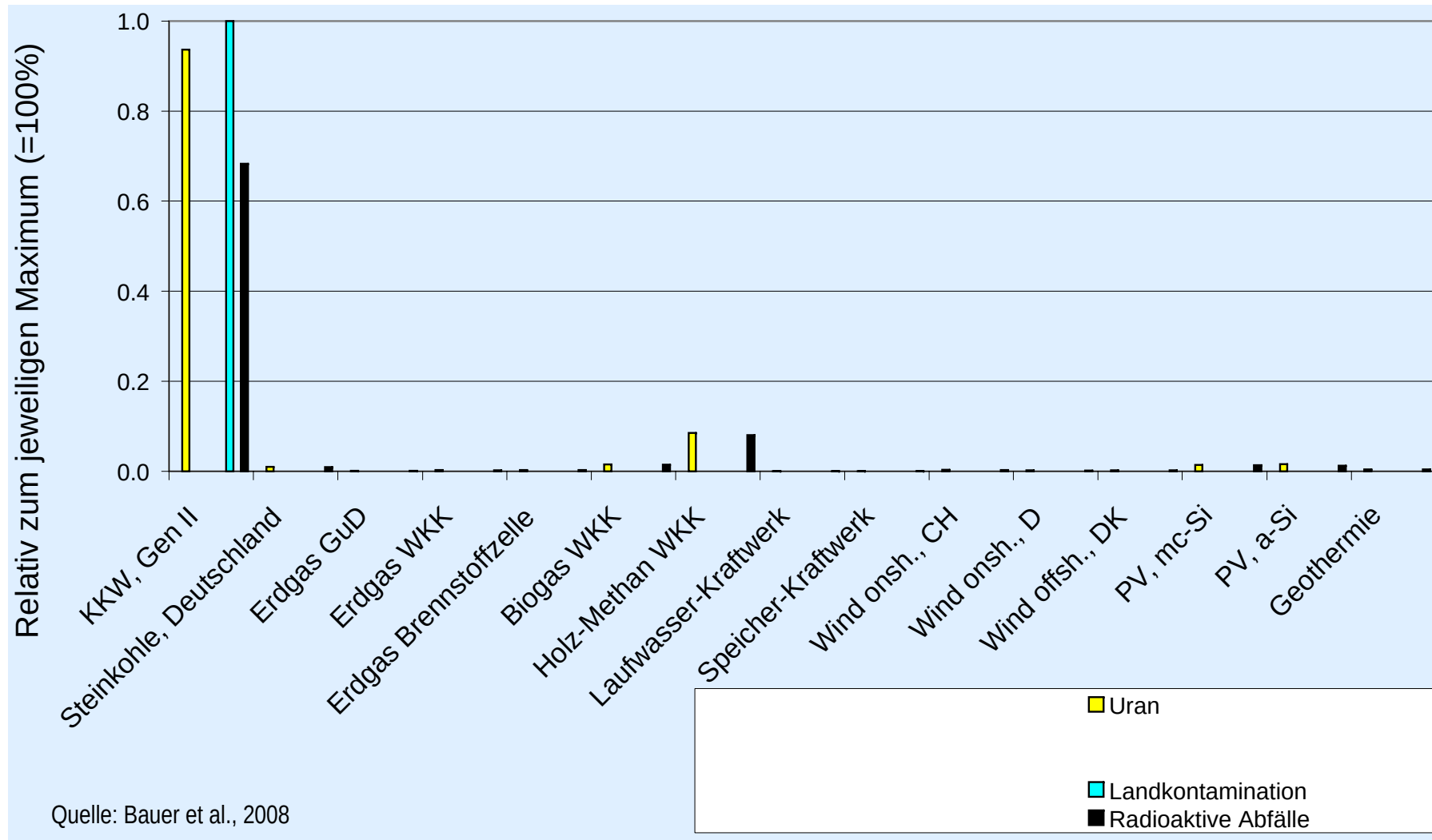
Treibhausgasemissionen, 2005



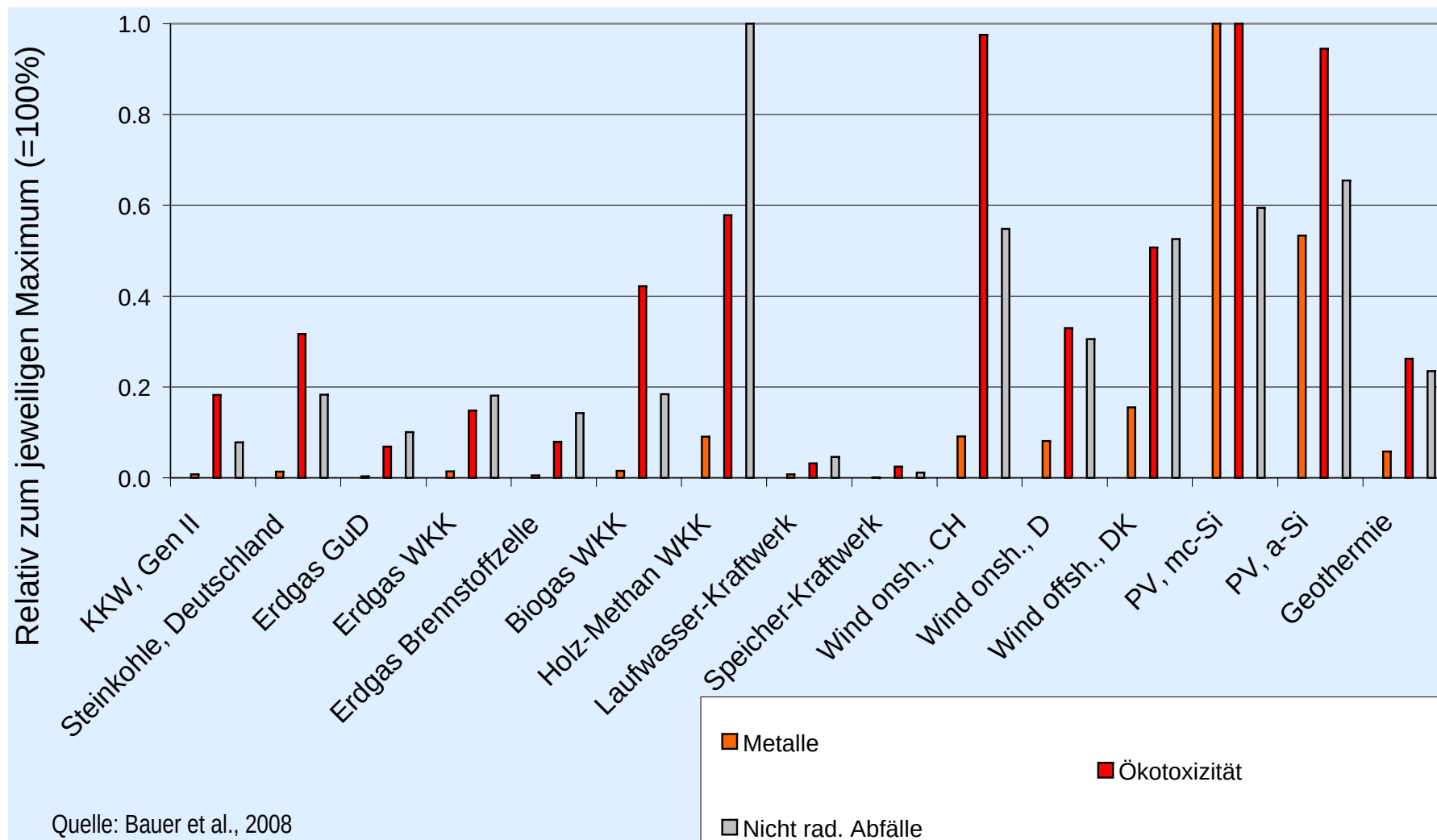
Resultate: Umweltindikatoren, 2005



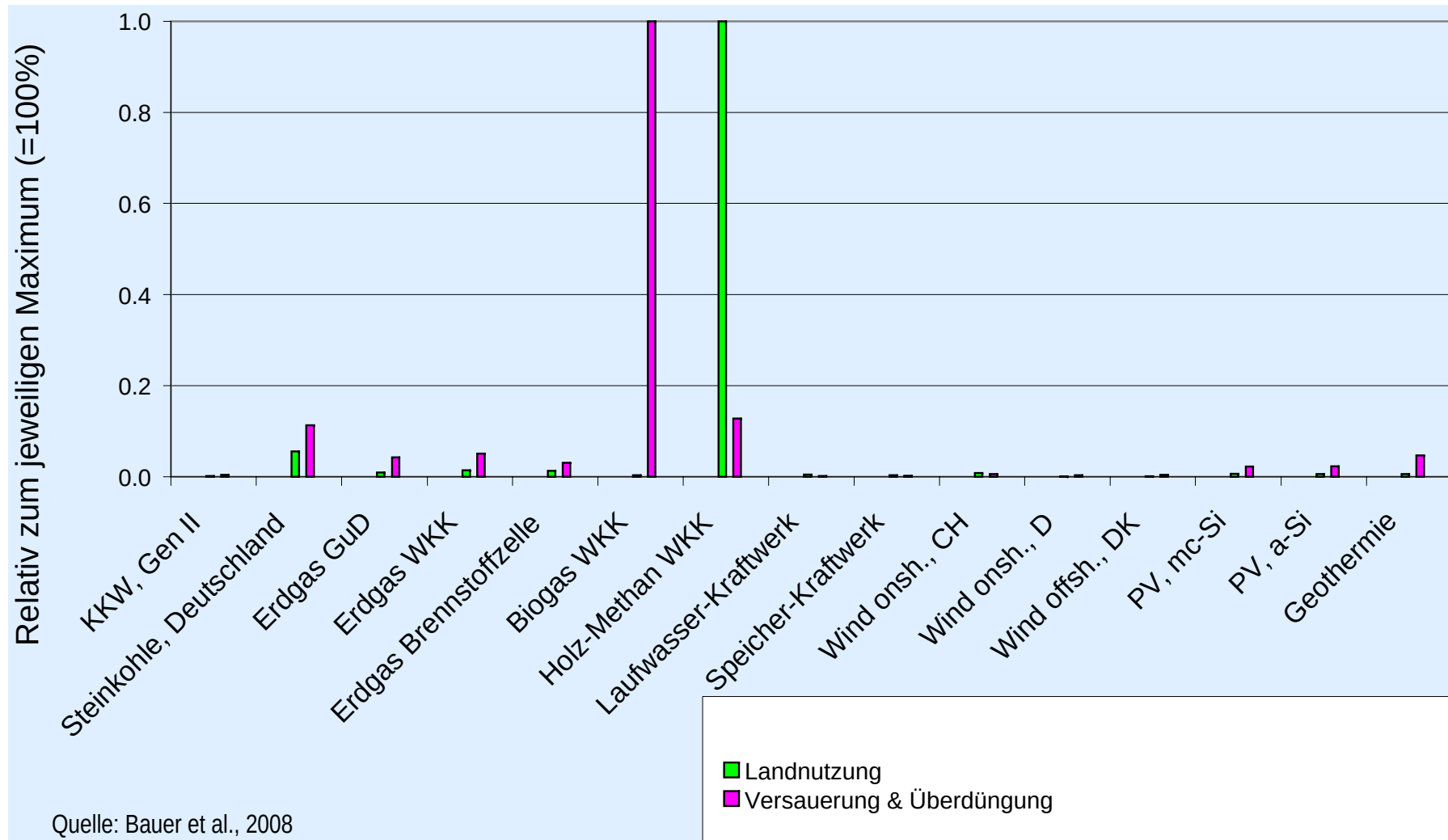
Resultate: Umweltindikatoren, 2005



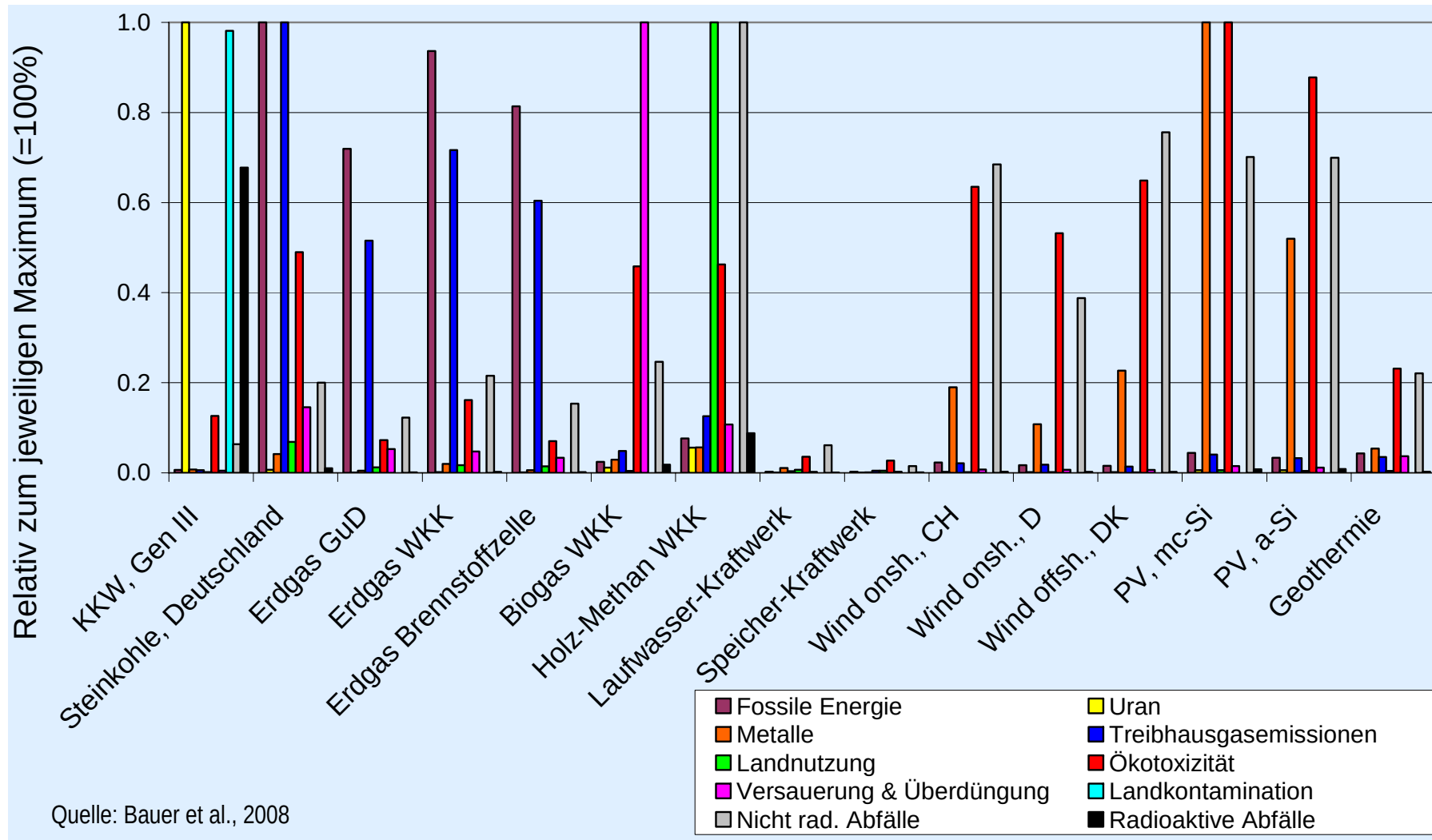
Resultate: Umweltindikatoren, 2005



Resultate: Umweltindikatoren, 2005



Resultate: Umweltindikatoren, 2030

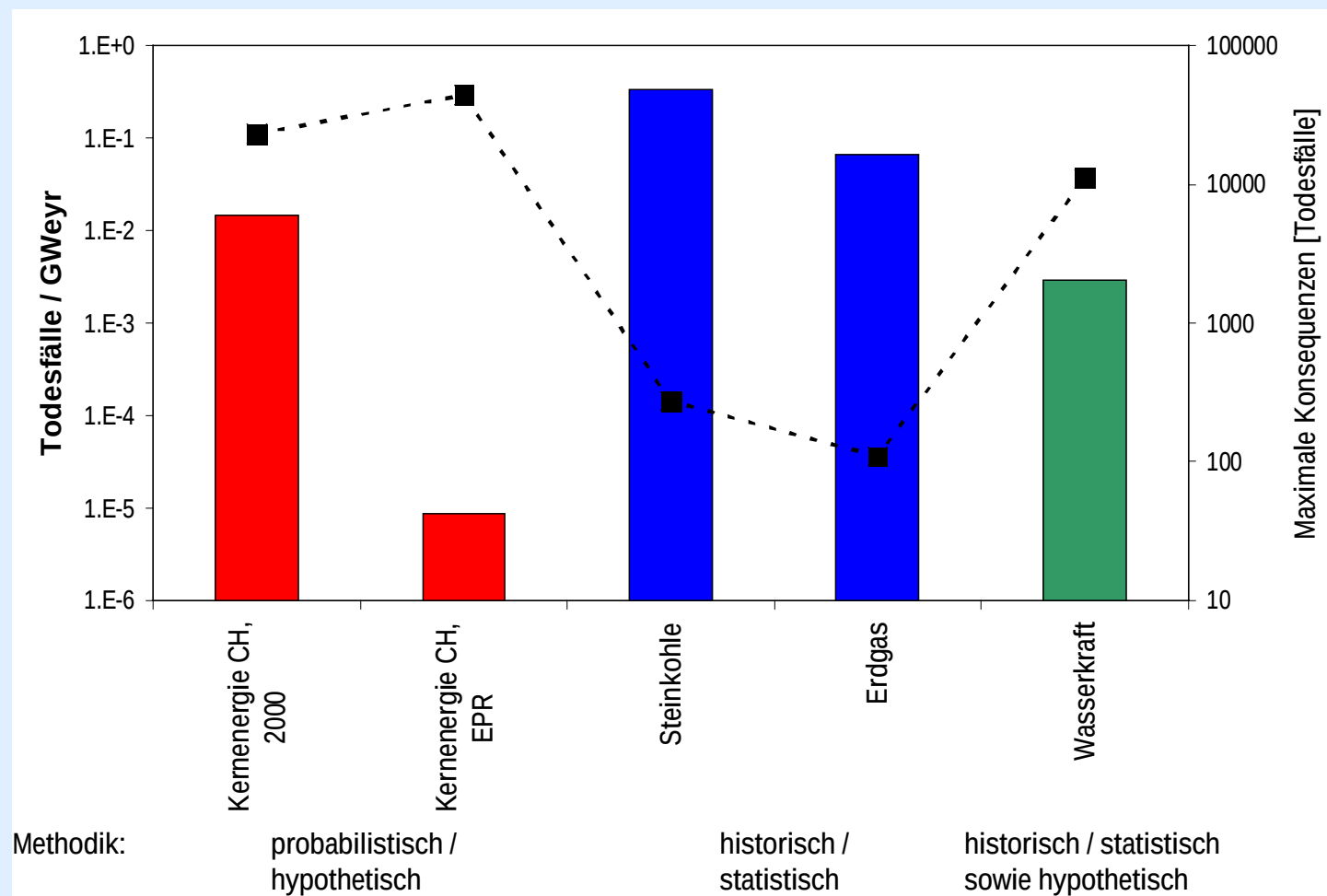


Reichweite der Uranressourcen

Reaktortyp	Brennstoff	Reichweite (Jahre)
Leichtwasserreaktoren (Standard heute)	Natururan aus "reichen" Minen (hohe Urankonzentration)	100
Schnelle Reaktoren		10'000
Leichtwasserreaktoren (Standard heute)	Natururan aus niedrig konzentrierten Vorkommen • Granit, Dolomit • Meerwasser	100'000
Schnelle Reaktoren		10'000'000

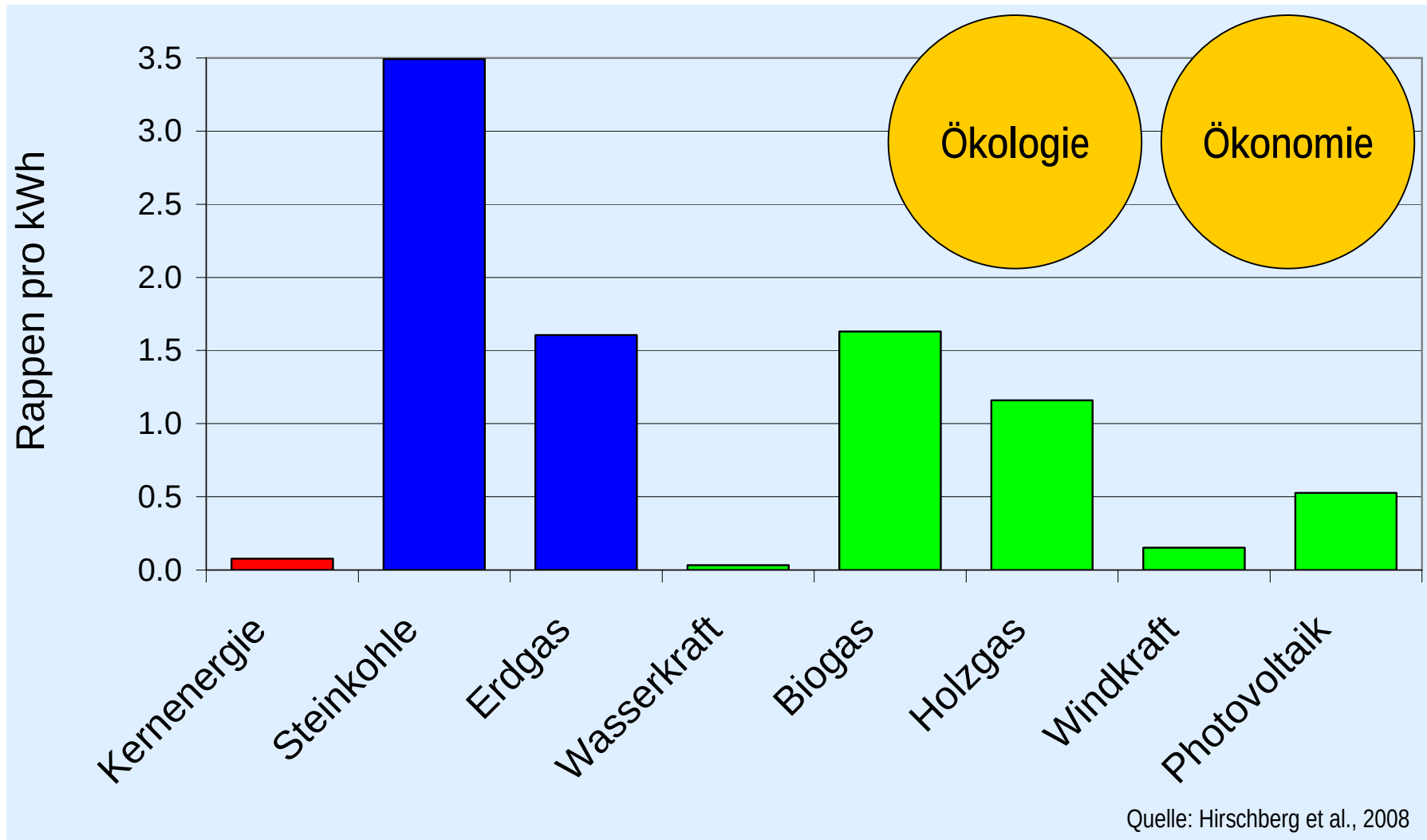
Risiken schwerer Unfälle (≥ 5 Todesfälle)

Soziales

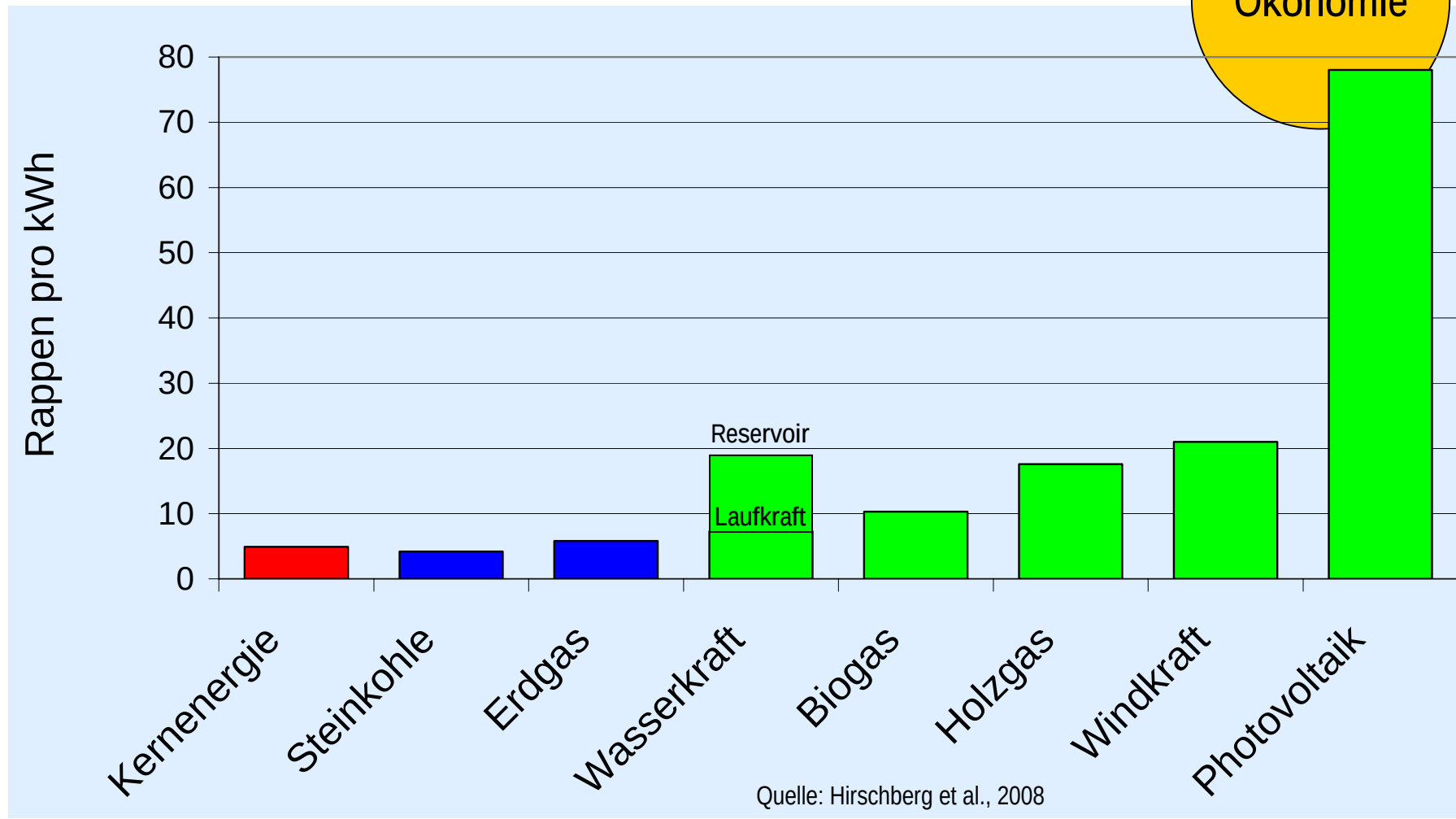


Quelle: Burgherr & Hirschberg, 2008

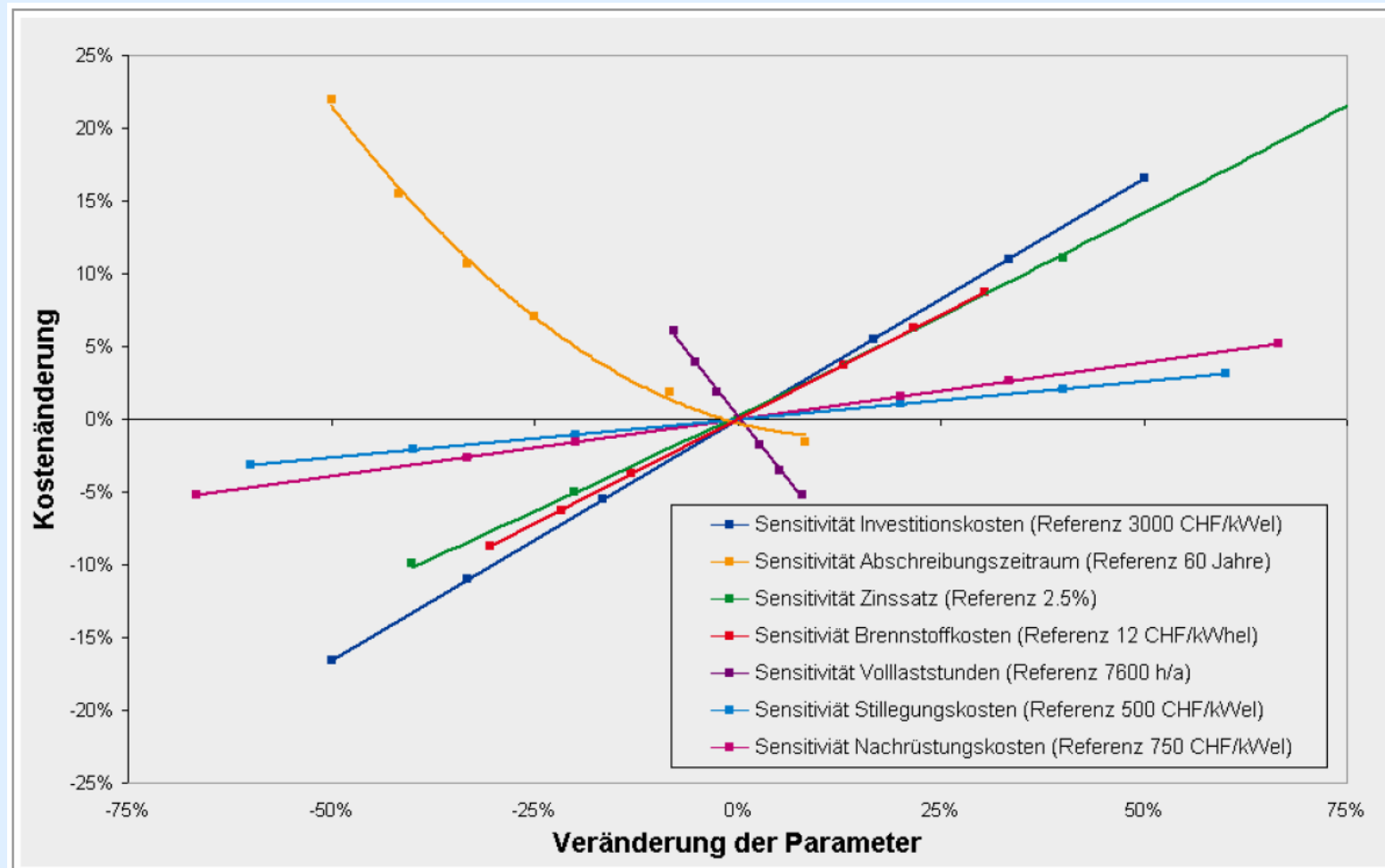
Externe Kosten (durch Luftschadstoffe und Klimagasen)



Stromerzeugungskosten, neue Anlagen (2000-2004)

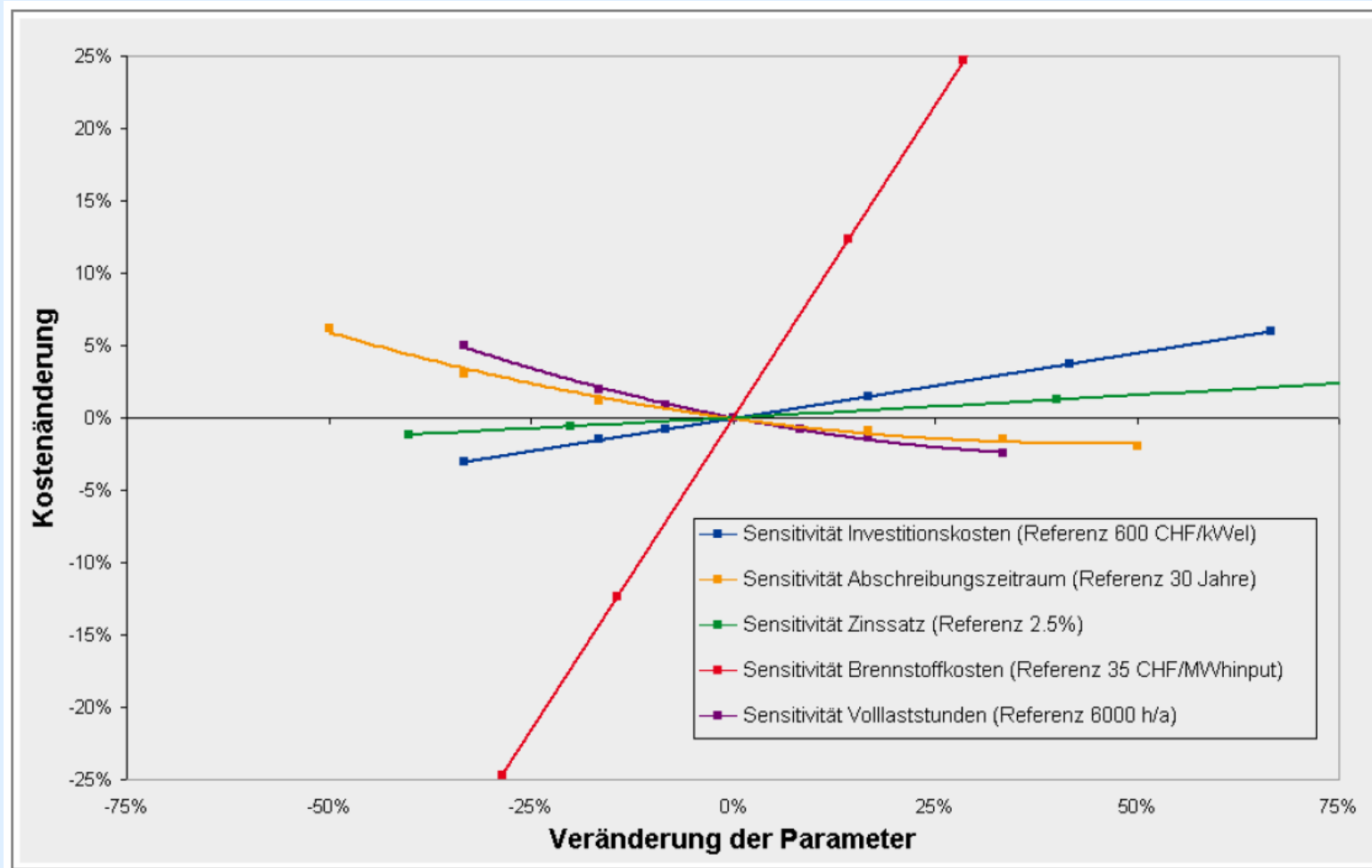


Sensitivitätsanalyse Stromgestehungskosten neues KKW



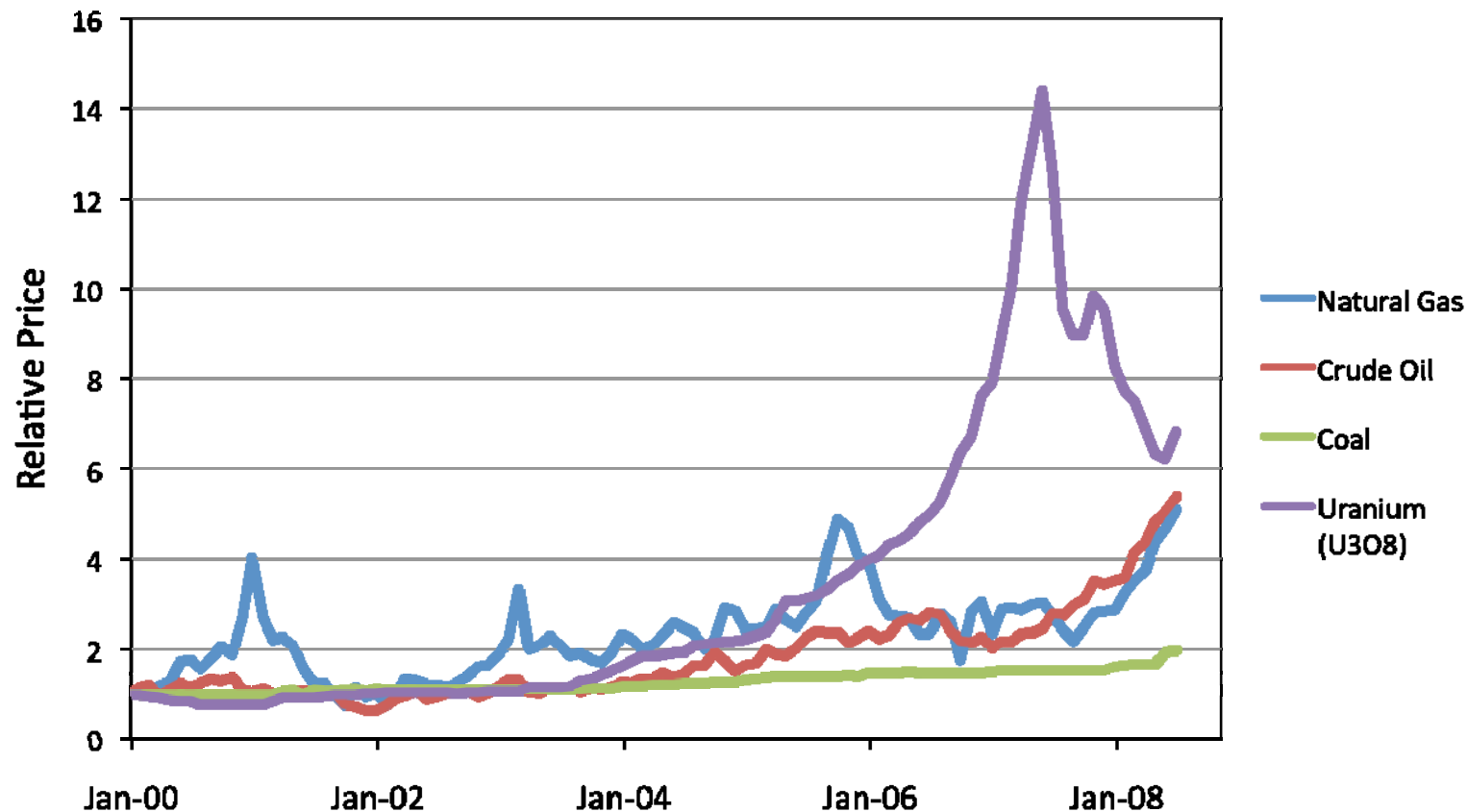
Quelle: Prognos 2006

Sensitivitätsanalyse Stromgestehungskosten bei GuD



Quelle: Prognos 2006

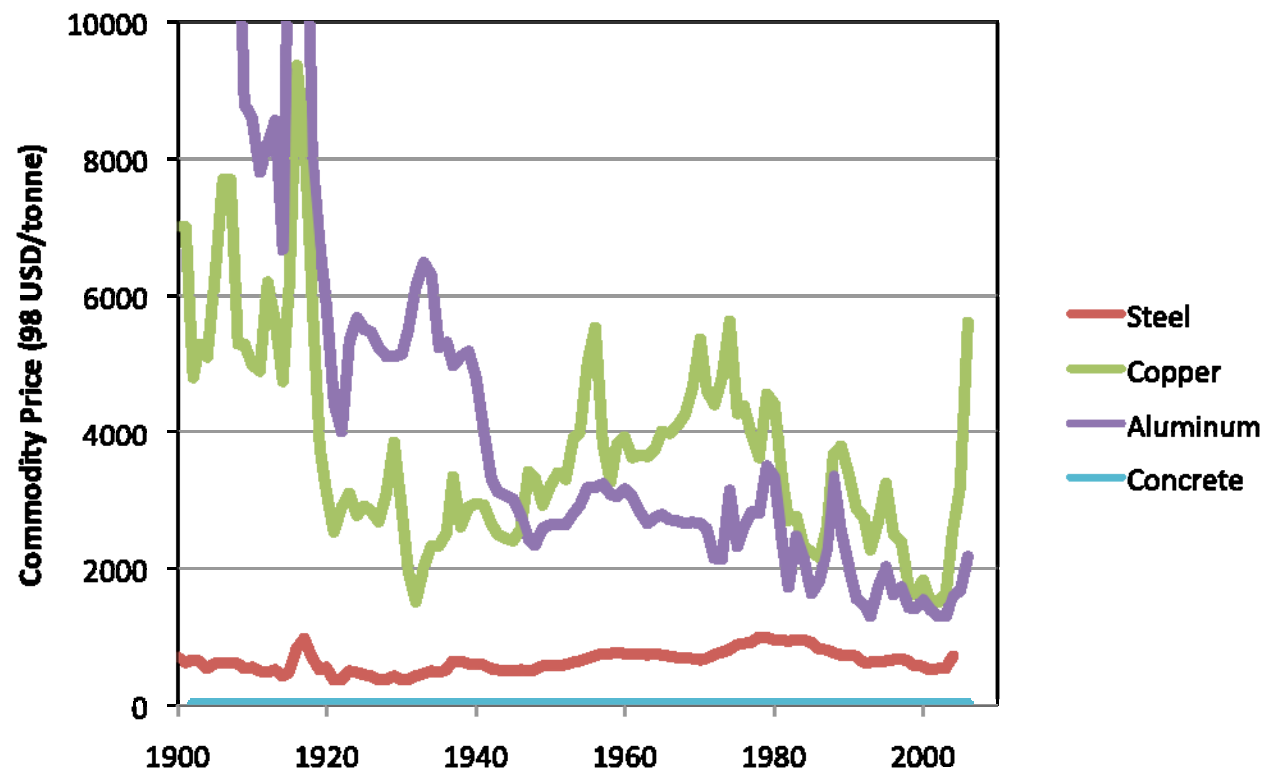
Entwicklung der Energieträgerpreise (2000 – 2008)



Quelle: US Bureau of Labor Statistics, Producer Price Indices und www.cameco.com

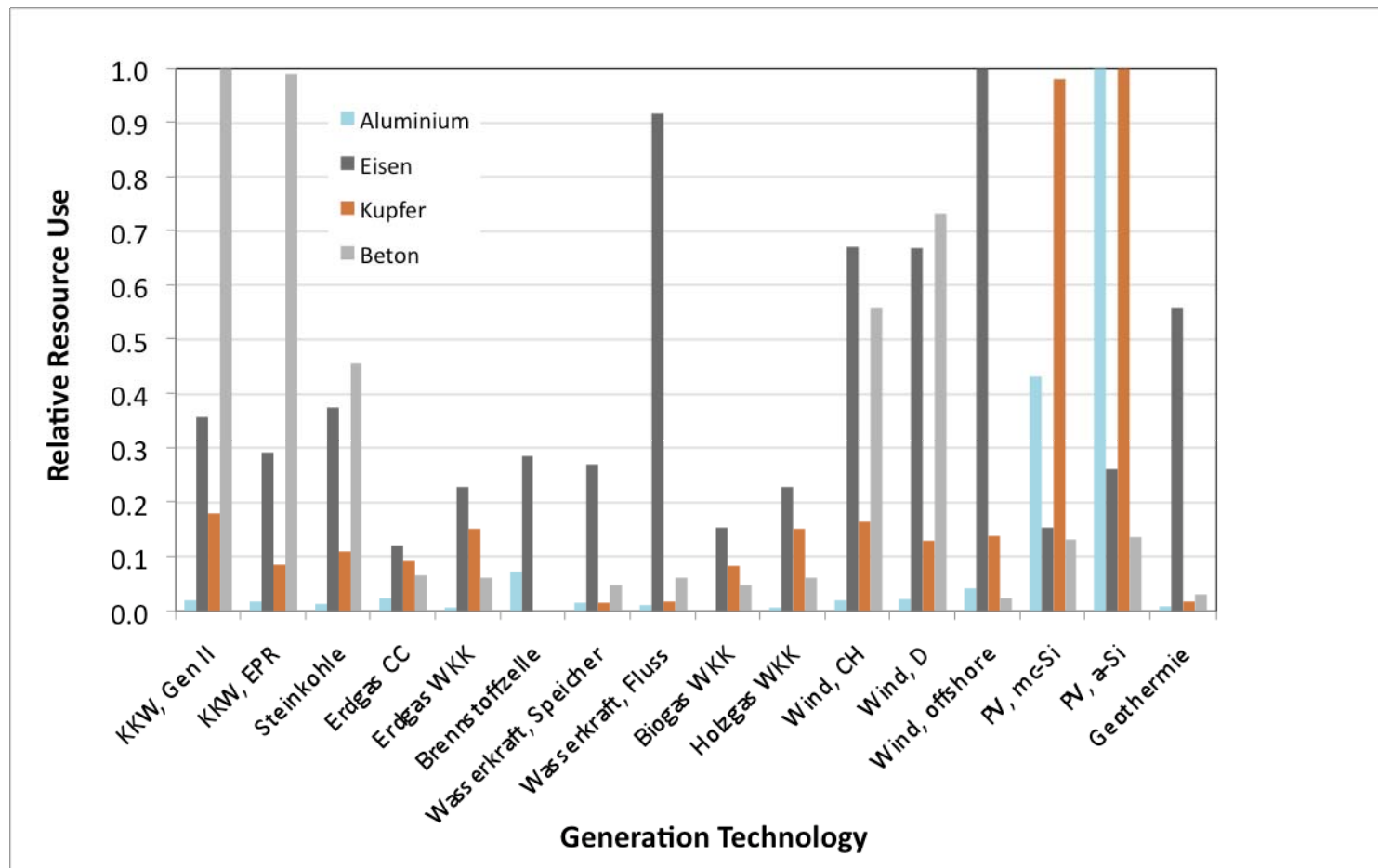
Bemerkung: Die Höchstpreise für Erdgas widerspiegeln die Auswirkungen von Wirbelstürmen auf die US Offshore-Produktion

Historische Rohstoffpreise (1900-2006)



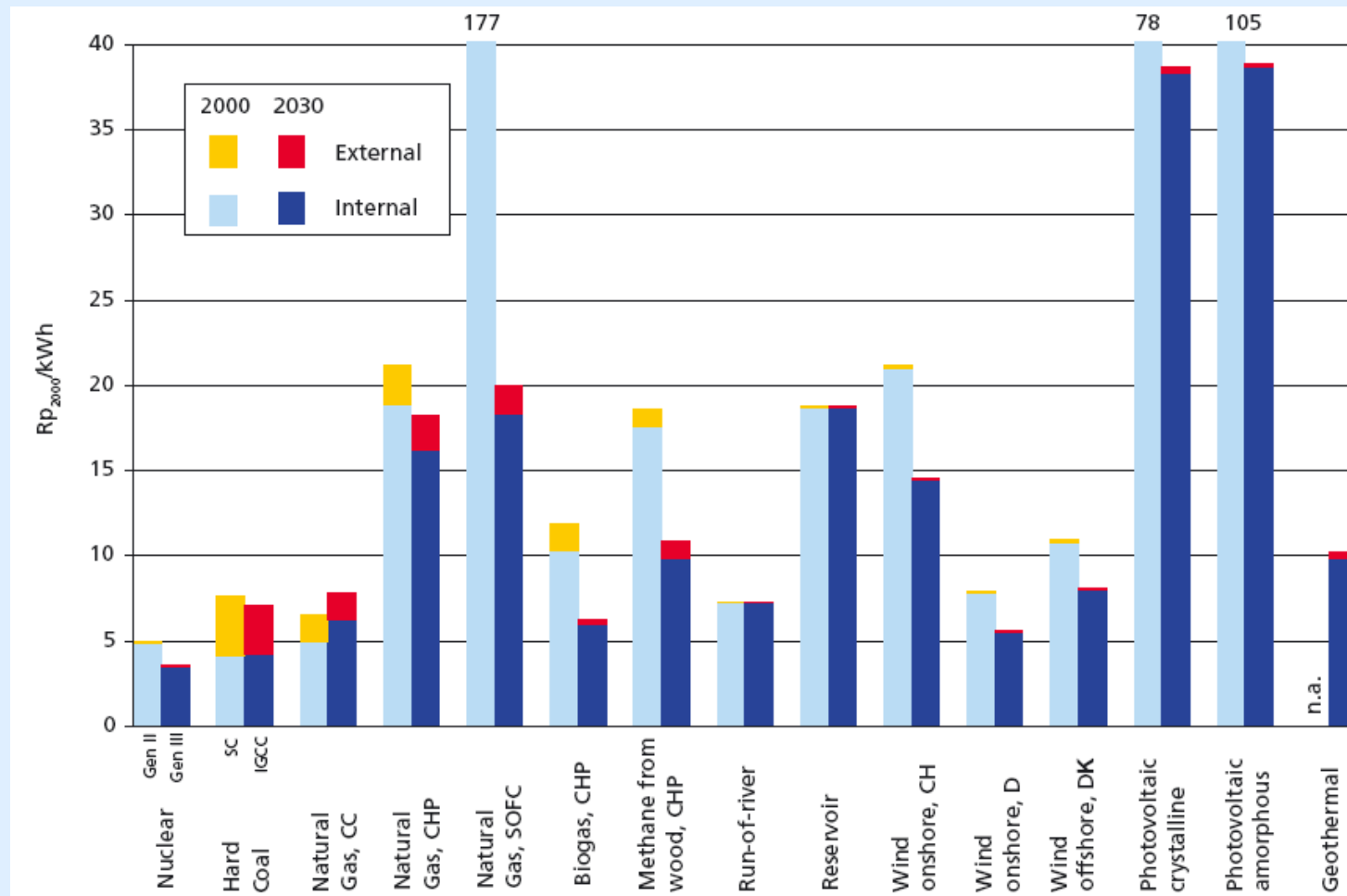
Quelle: US Geologic Survey

Relative Materialintensität (2005)



Quelle: Bauer et al., 2008

Totale Kosten heutiger und zukünftiger Stromerzeugungstechnologien



Quelle: Hirschberg et al., 2007

Beispiele komplexer aber potenziell wichtiger sozialer Aspekte:

- Soziale Gerechtigkeit
- Risikoaversion und Risikowahrnehmung
- Resilienz des Energiesystems
- Konfliktpotenzial

⇒ *Theoretisch kann jede Externalität monetarisiert werden, in der Praxis sind die Methoden und Schätzungen aber oft kontrovers.*

Beurteilungskriterien in den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit

Umwelt

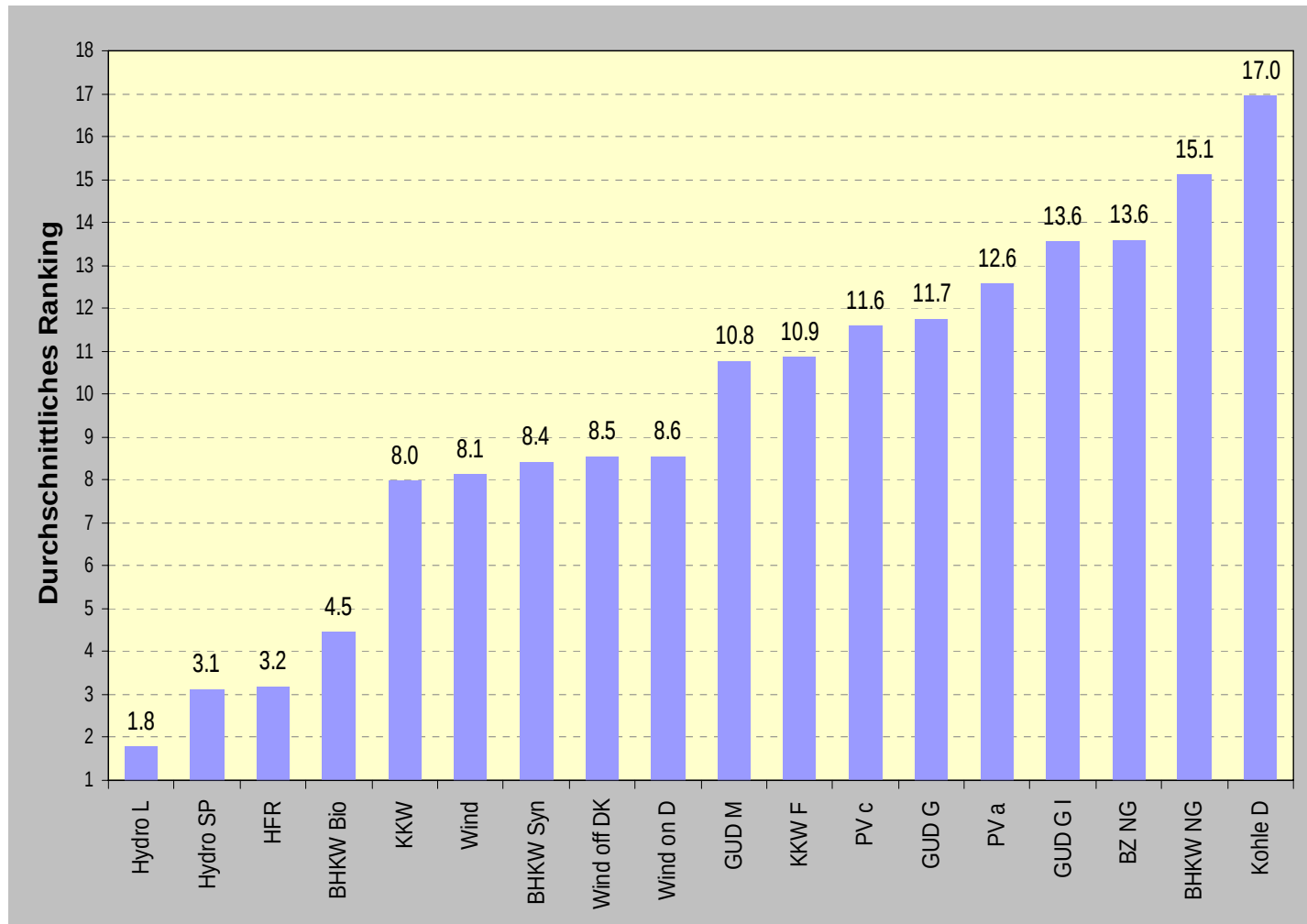
Soziale Aspekte

Wirtschaft

- Insgesamt besteht das System aus 75 direkt berechneten Indikatoren
11 Umwelt, 33 Soziales, 31 Wirtschaft
Beispiel: Objektive tödliche Gesundheitsrisiken in [verlorene Lebensjahre pro kWh]
- Die Indikatoren sind in 4 Hierarchieebenen strukturiert und zusammengefasst
Weitere 32 übergeordnete Indikatoren: beispielsweise werden im Indikator „Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit“ alle Subindikatoren, welche Normalbetrieb und schwere Unfälle betreffen, aggregiert

Quelle: Roth et al., 2008

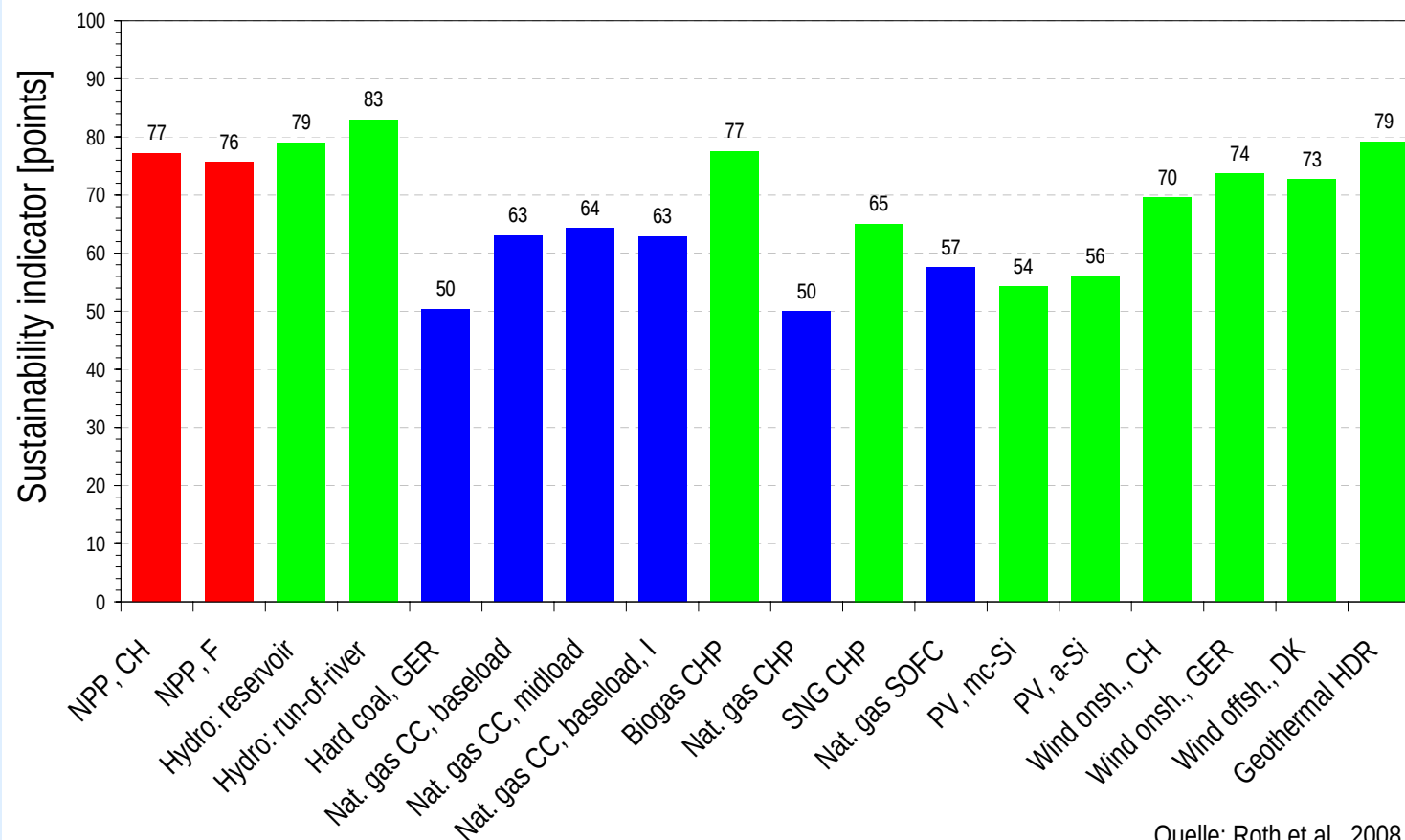
Anonymisierte Auswertungen (MCDA)



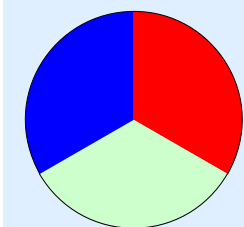
Quelle: Roth et al., 2008

Multi-Kriterien Sensitivitätsanalyse (CH, 2030):

Fokus auf Klima und Gesundheit, Stromerzeugungskosten und Auswirkungen auf das Unternehmen



Quelle: Roth et al., 2008



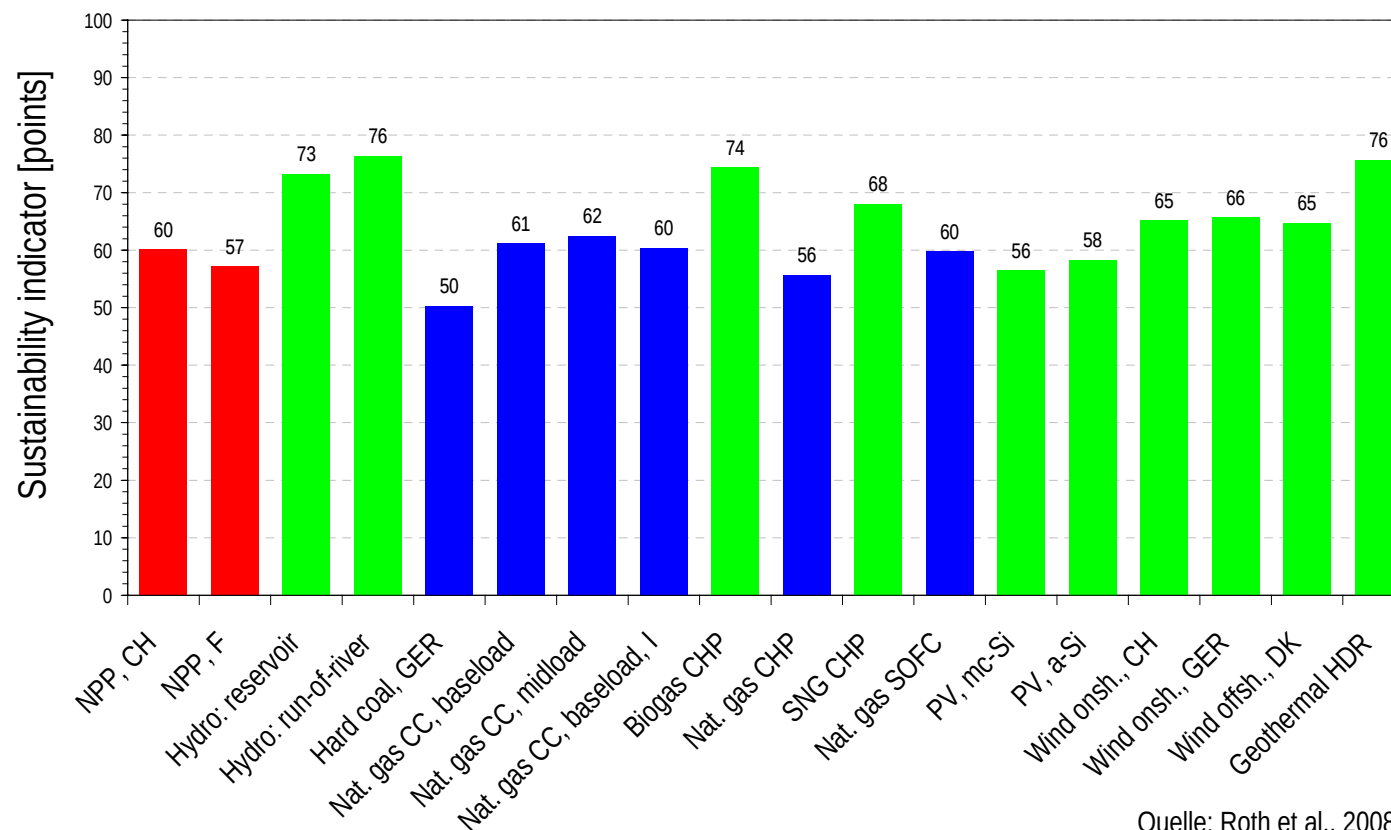
Wirtschaft

Ökologie

Gesellschaft

Multi-Kriterien Sensitivitätsanalyse (CH, 2030):

Starker Fokus auf Erschöpfung der Ressourcen, interne Sicherheit, politische Stabilität und Legitimität, Risikowahrnehmung, maximale Konsequenzen schwerer Unfälle und direkte Beschäftigungseffekte



Quelle: Roth et al., 2008



Herausforderungen für die Kernenergie

- Sicherheit (Ausschluss von Katastrophenszenarien)
- Überzeugende Lösung für die Abfallentsorgung
- Minimierung der Proliferationsrisiken
- Ökonomische Wettbewerbsfähigkeit
- Öffentliche Akzeptanz

Technologie GEN III/III+

Verbesserungen

- Sicherheit: Passive Systeme, erhöhte Redundanz
- Wirtschaftlichkeit: Standardisierung, Vereinfachung Betrieb, Verfügbarkeit, Verkürzung Bauzeit
- Ressourcen: Brennstoffausnutzung, Verringerung Abfälle

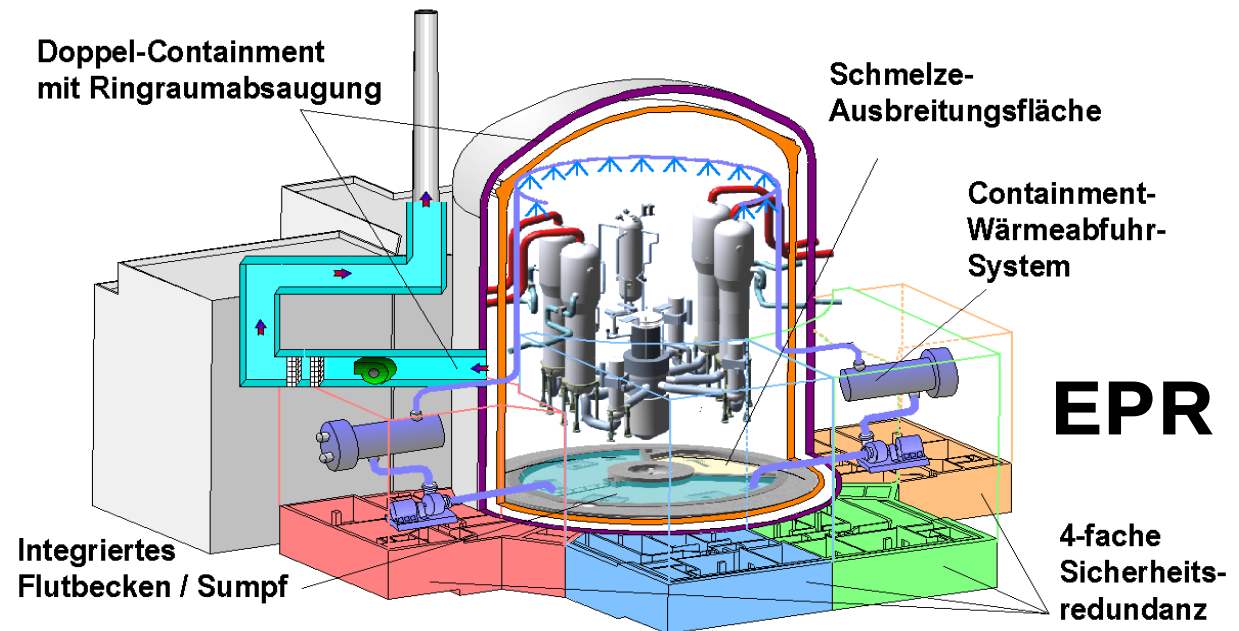
In Betrieb

=> ABWR
(Japan)

In Planung

=> EPR*
(FI/FR)
=> PBMR
(Südafrika)

* EPR: Europäischer Druckwasserreaktor



Kernenergie: Generation IV

➤ Neue Anforderungen

- Durchbrüche/Verbesserungen bei
 - *Reduktion der Abfälle*
 - *Ressourcenschonung*
 - *Proliferation*
 - *Wettbewerbsfähigkeit*
 - *Sicherheit und Zuverlässigkeit*

➤ Technische Marktreife nach 2030

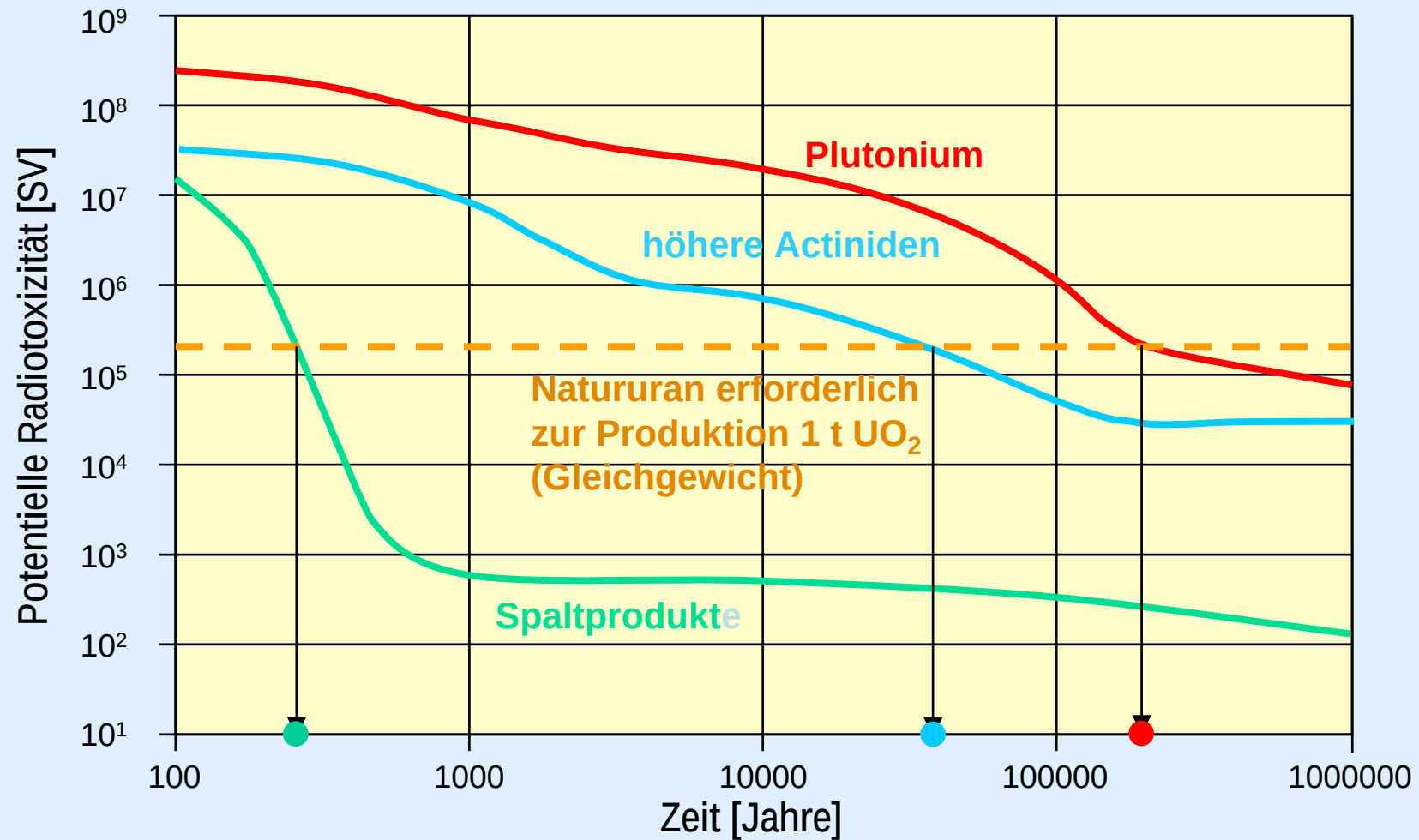
➤ Neue Märkte

- Wasserstoffproduktion
- Prozesswärme
- Mobilität (Batterieaufladung)
- Wasserentsalzung

➤ Internationale F&E (Generation IV International Forum)

	Abkürzung	Spektrum	Brennstoffzyklus
Sodium-Cooled Fast	SFR	schnell	geschlossen
Lead Alloy-Cooled	LFR	schnell	geschlossen
Gas-Cooled Fast	GFR	schnell	geschlossen
Very High Temperature	VHTR	thermisch	einweg
Supercritical Water-Cooled	SCWR	thermisch & schnell	beides
Molten Salt	MSR	epithermisch	geschlossen

Reiz der Actiniden-Vernichtung

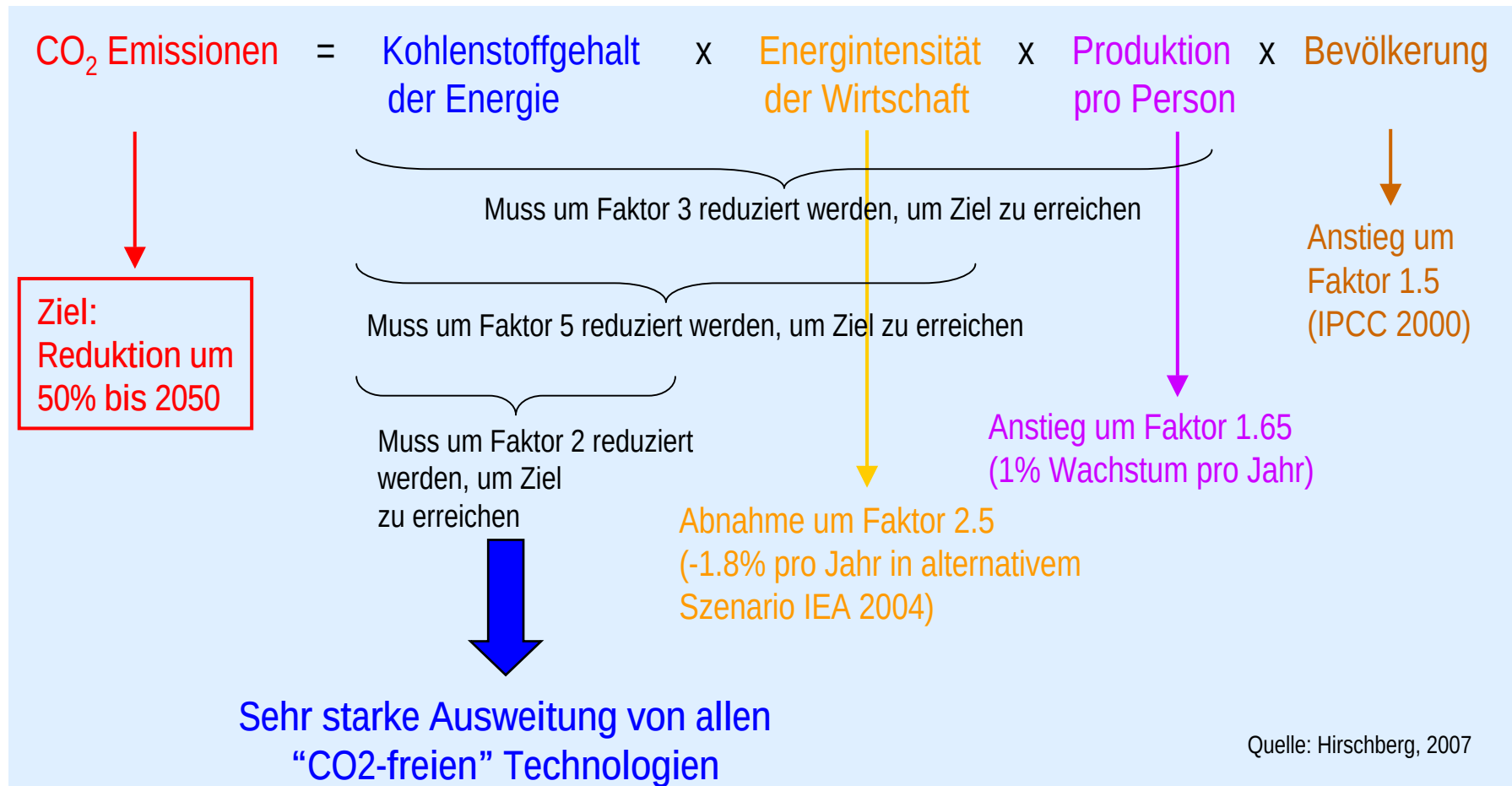


Quelle: CEA, 2001

Schlussfolgerungen

- Keines der analysierten Systeme kann alle Kriterien hinsichtlich **Nachhaltigkeit und Markt** erfüllen.
- **Kompromisse** zwischen ökologischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Nachhaltigkeitskomponenten sind unvermeidlich. Diese sind durch Werturteile beeinflusst.
- Heutige Kernenergietechnologien schneiden in Bezug auf die wirtschaftlichen und umweltbezogenen Leistungsmerkmale sehr gut ab.
- Betonung der Ökonomie benachteiligt Erneuerbare;
Betonung der Umwelt benachteiligt fossile Ketten;
Betonung sozialer Aspekte benachteiligt Kernenergie.
- Langzeitentwicklungen bei der Kernenergie (Gen IV) zielen auf eine massgebliche Beschränkung der Konsequenzen hypothetischer nuklearer Unfälle sowie eine drastische Reduktion der Einschlusszeit radioaktiver Abfälle ab.
- Zur klimafreundlichen Bedarfsdeckung werden Erneuerbare und Kernenergie gebraucht.

Implikationen der “Kaya-Gleichung”



Herzlichen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

stefan.hirschberg@psi.ch