



Wege der Energiewirtschaft zu einer nachhaltigen Energieversorgung

Prof. Dr.-Ing. A. Voß

Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung

Universität Stuttgart

VDI-Frühlingstreffen

14. Mai 2011, Neckarwestheim

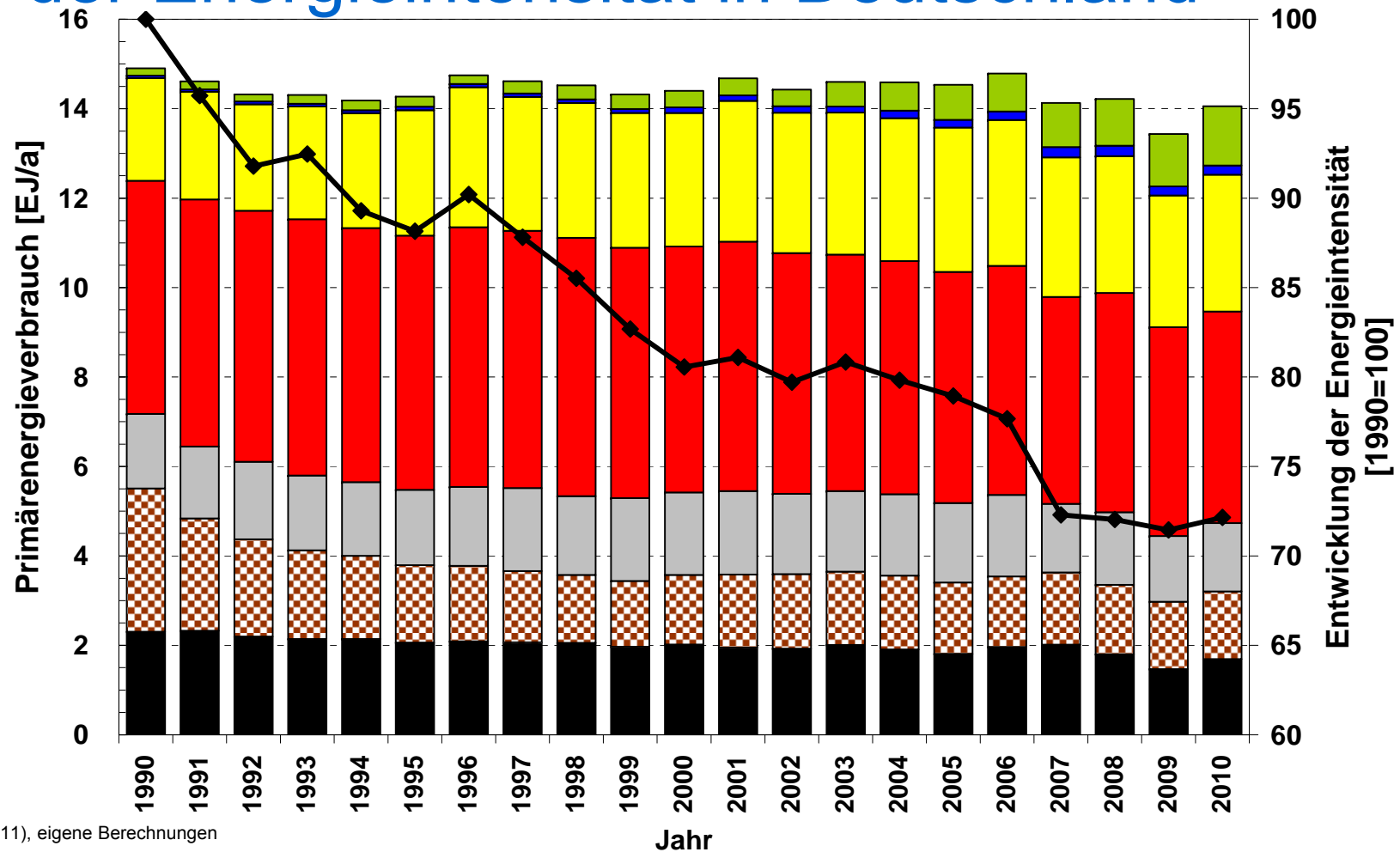


Energiesituation - Ausgangslage

➤ **Energieversorgung**



Entwicklung des Primärenergieverbrauchs und der Energieintensität in Deutschland

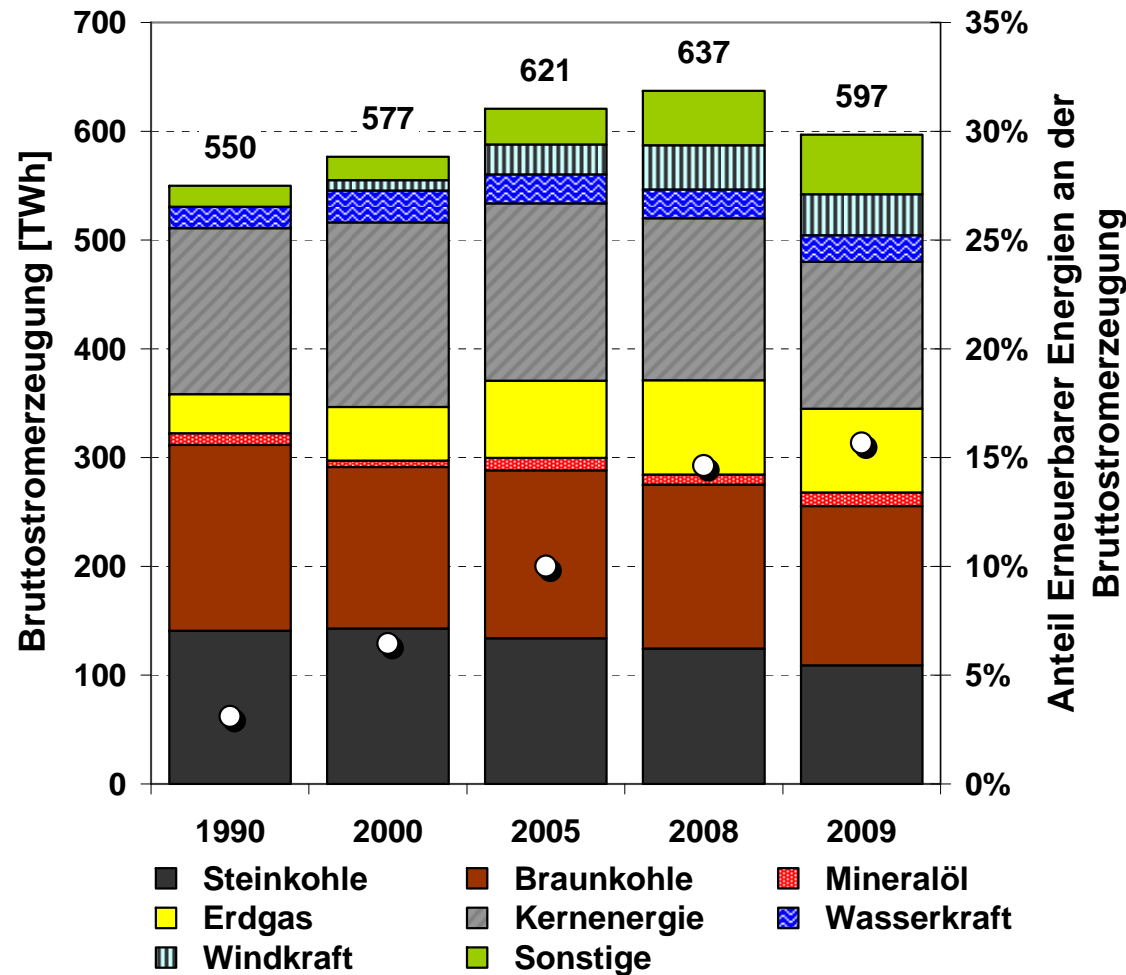


Quelle: BMWi (2011), eigene Berechnungen

- Steinkohle
- Braunkohle
- Kernenergie
- Erdgas
- Wasser/Wind
- Sonstige
- Mineralöle
- PEV/BIP



Bruttostromerzeugung nach Energieträgern in Deutschland



○ Anteil Erneuerbarer Energien

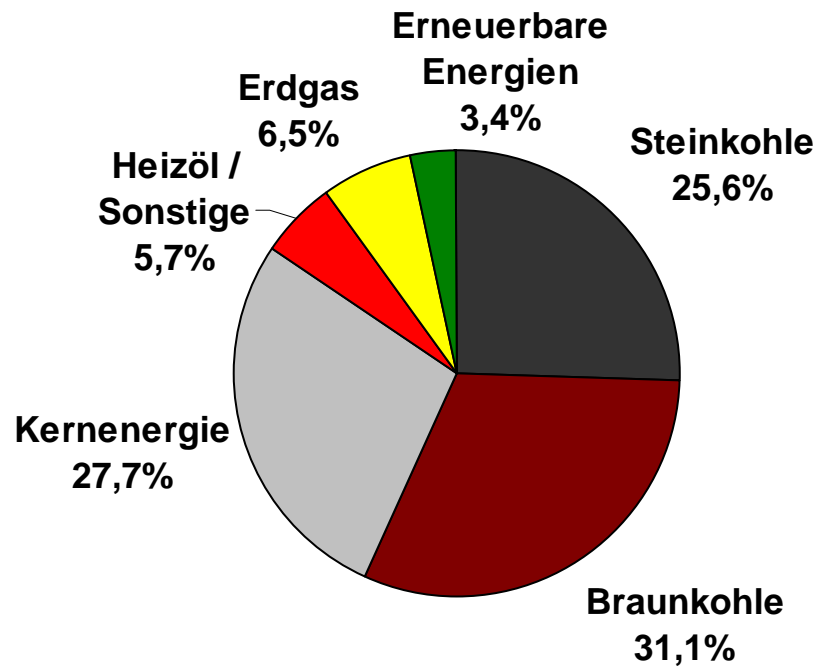
- Zunahme des Stromverbrauchs 1990-2008 um 16 %
- Entwicklung der CO₂-Emissionen der öffentl. Strom- und Wärmeerzeugung
1990: 336 Mio. t
2000: 310 Mio. t
2008: 317 Mio. t

Quelle: BMWI (2010): Energiedaten und UNFCCC (2010)



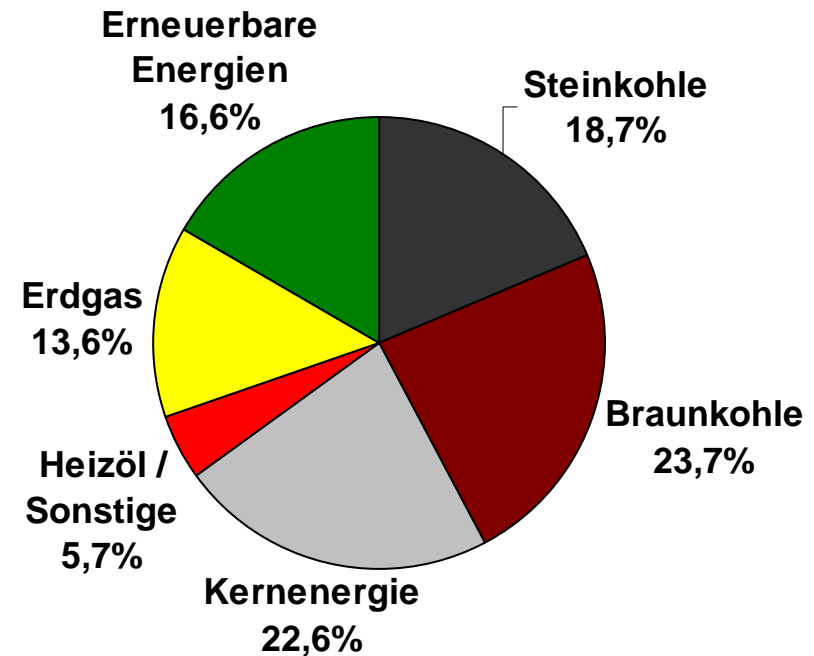
Bruttostromerzeugung in Deutschland

1990



Gesamt: 550 TWh

2010



Gesamt: 621 TWh

Quelle: BMWi (2011)

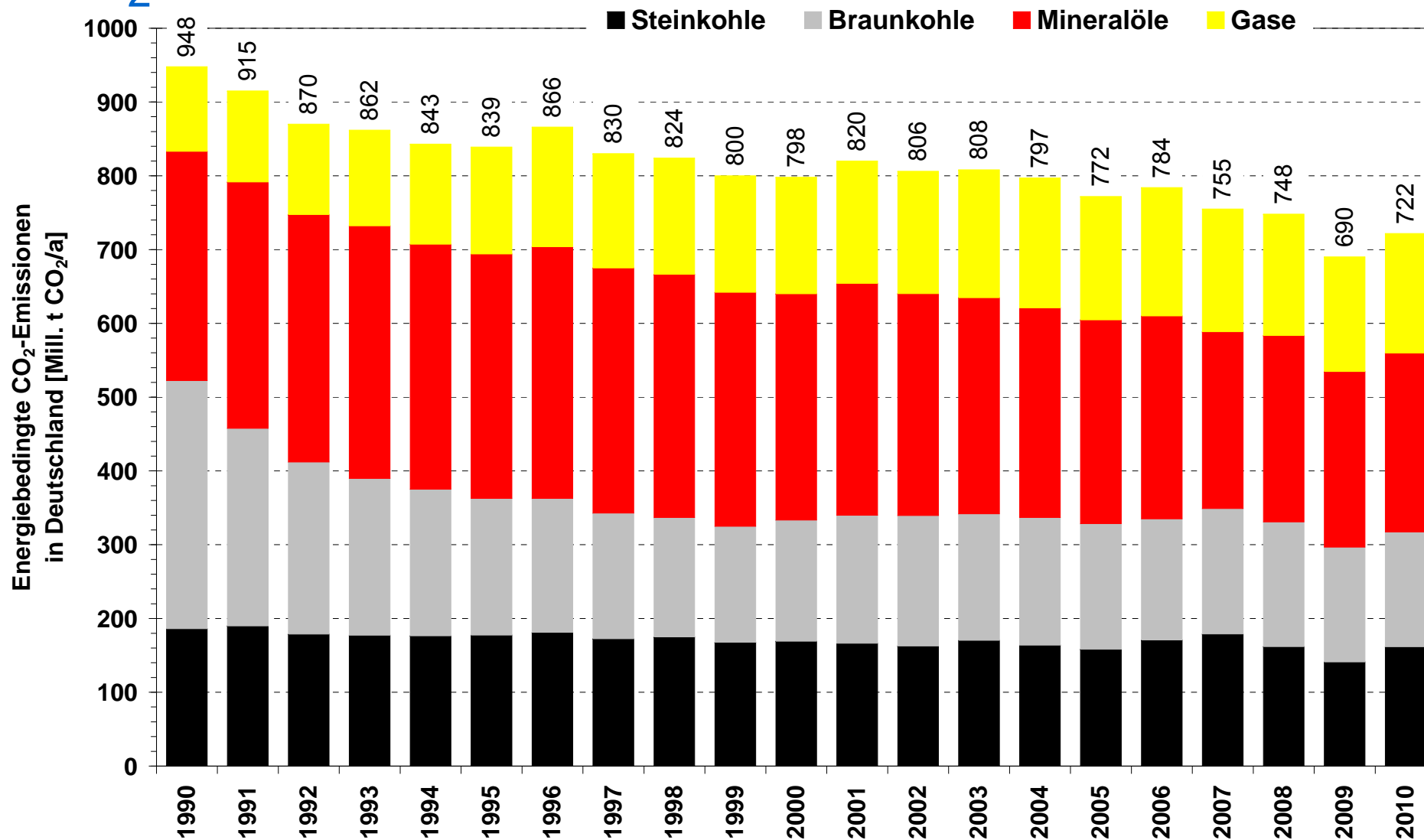


Energiesituation - Ausgangslage

- **Energieversorgung**
- **CO₂-Emissionen und Klimaschutz**



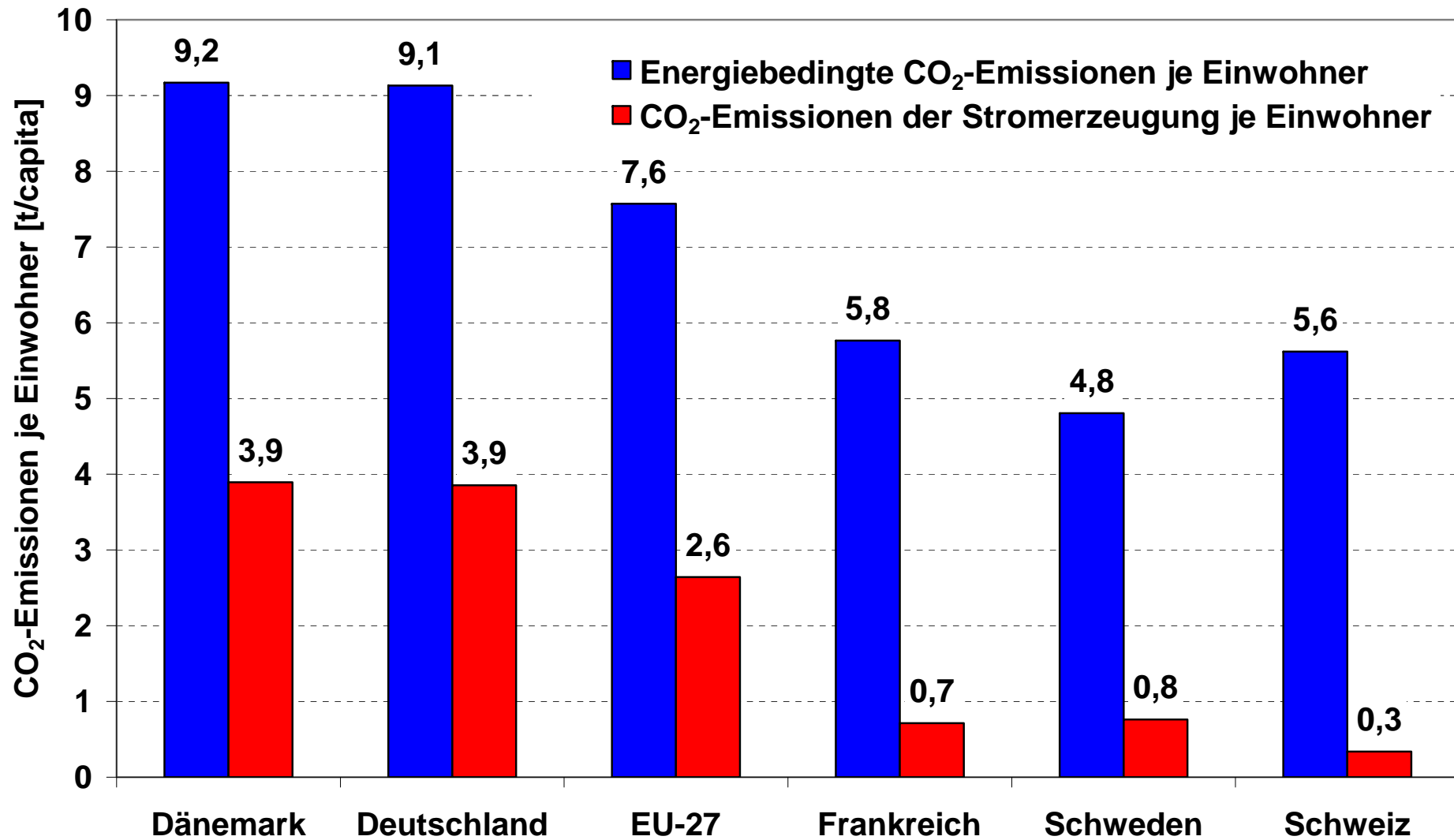
CO₂-Emissionen in Deutschland



Quelle: UNFCCC (2008), BMWI (2010), UBA (2008), AGEB (2007), eigene Berechnungen



CO₂-Emissionen in Europa: Ausgewählte Länder (2008)



Quelle: UNFCCC (2010) und EUROSTAT (2010), eigene Berechnungen;
CO₂ der Stromerzeugung umfasst hier jeweils die Emissionen aus der öffentlichen Strom- und Wärmeerzeugung



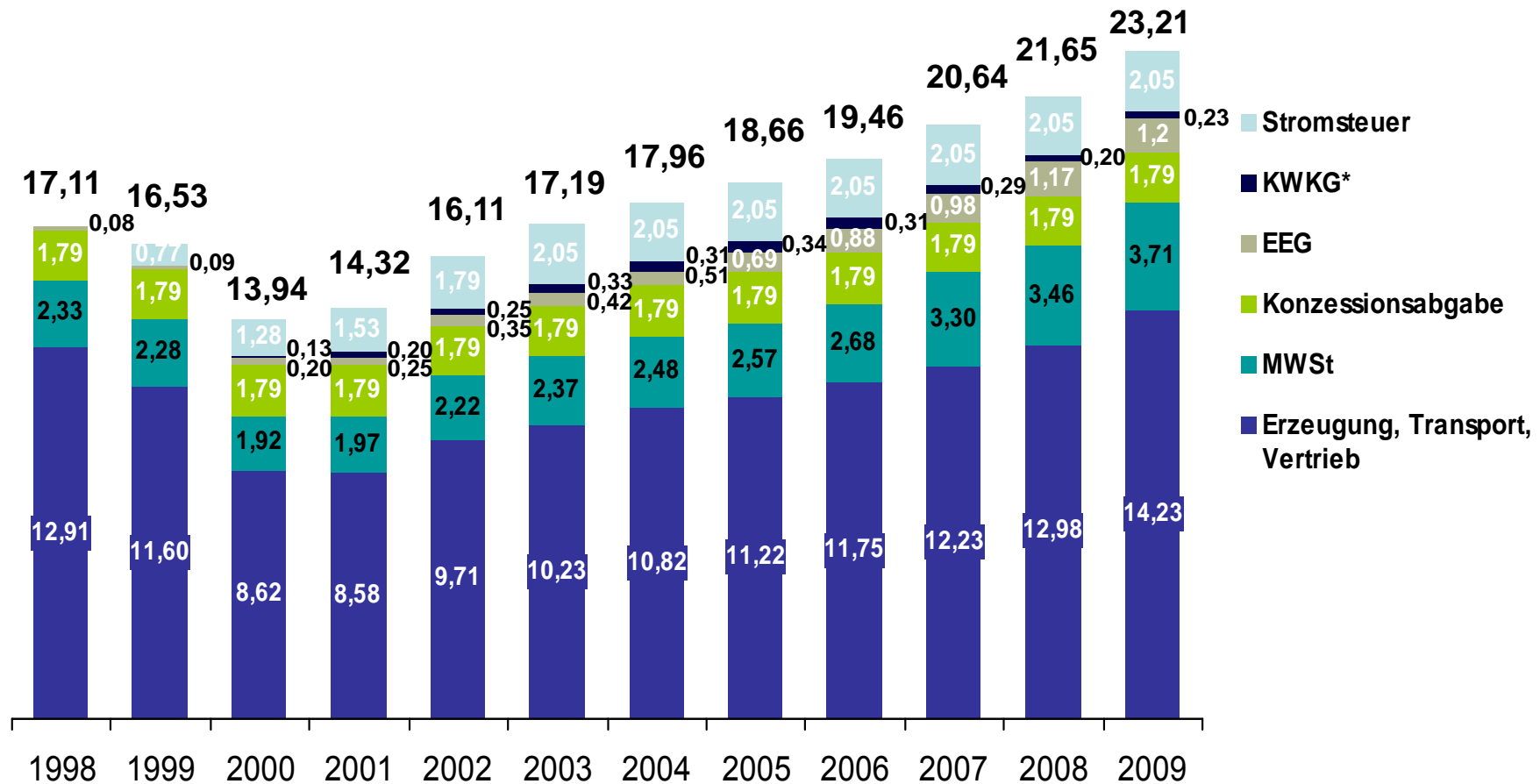
Energiesituation - Ausgangslage

- **Energieversorgung**
- **CO₂-Emissionen und Klimaschutz**
- **Energiepreise**



Strompreis für Haushalte

Durchschnittlicher Strompreis eines Drei-Personen-Haushaltes mit einem Jahresverbrauch von 3.500 kWh/a in Cent/kWh

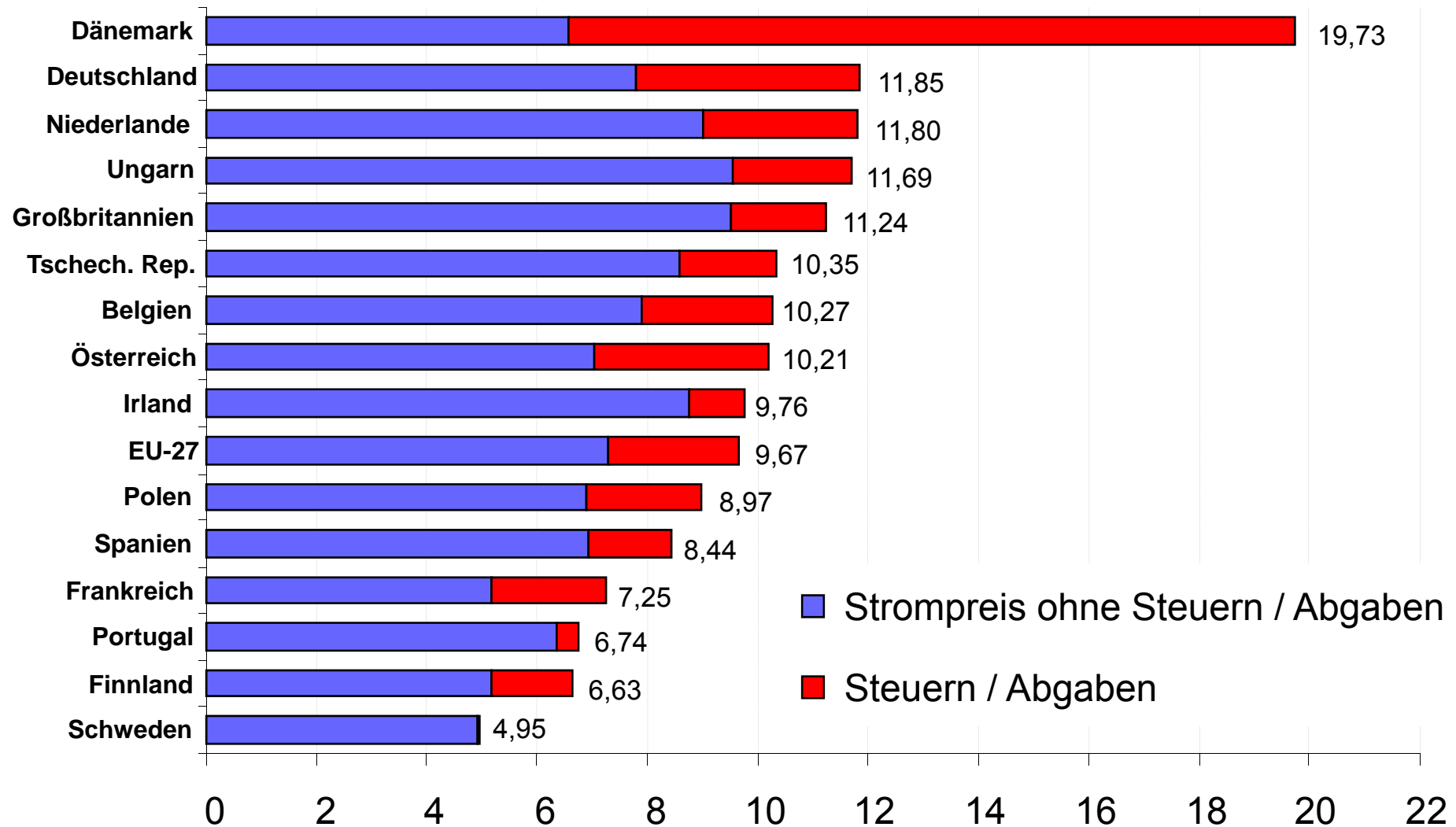


Quelle: BDEW, Stand 10/2009

*Gesamtbelastung durch KWKG ab 2002, gesunken;
durch Entlastung Industrie steigende Belastung für Haushalte



Industrie-Strompreise in der EU in 2009 (1. Hj)



Quelle: Eurostat (2010), neue Erhebungsmethodik

cent/kWh

70.000MWh < Jahresverbrauch < 150.000MWh



➤ Erneuerbare Energien



Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland im Jahr 2009 (1990)

	Primärenergie [PJ/a]		Elektrizität [GWh/a]	
	1990	2009	1990	2009
Wasserkraft	59	68,4	17.000	19.000
Wind	0,1	136,1	40	37.809
Biomasse inkl. Deponie- u. Klärgas	150	793,7	1.422	30.515
Geothermie	k.A.	20,5	--	19
solare Strahlung	< 0,1	42,8	1	6.200
Gesamt	209,2 (2,2 %*)	1.601,5 (8,0 %*)	18.463 (3,4 %**)	93.543 (16,1 %**)

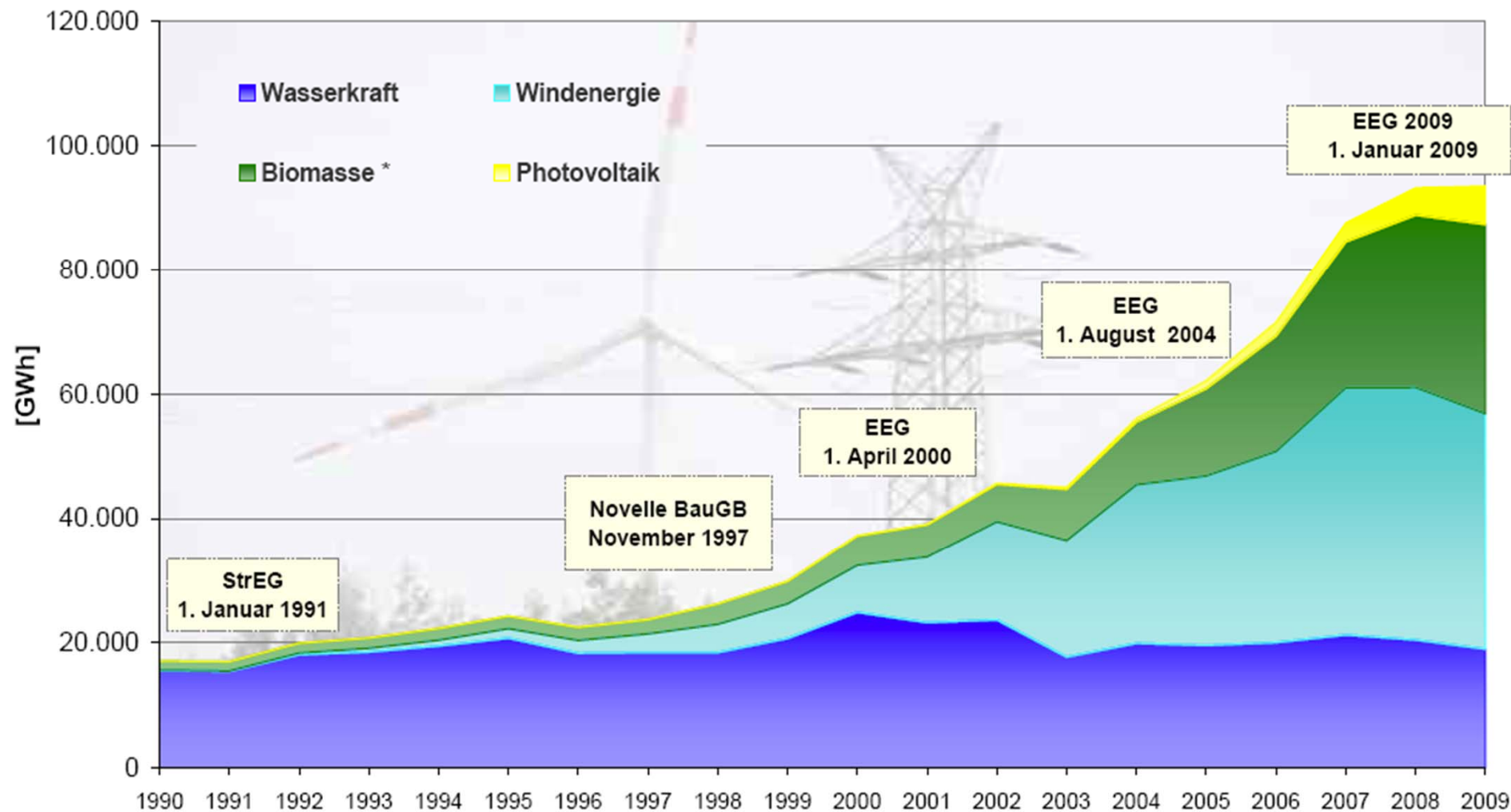
* Anteil am Primärenergieverbrauch

** Anteil am Bruttostromverbrauch

Quelle: BMU 2010

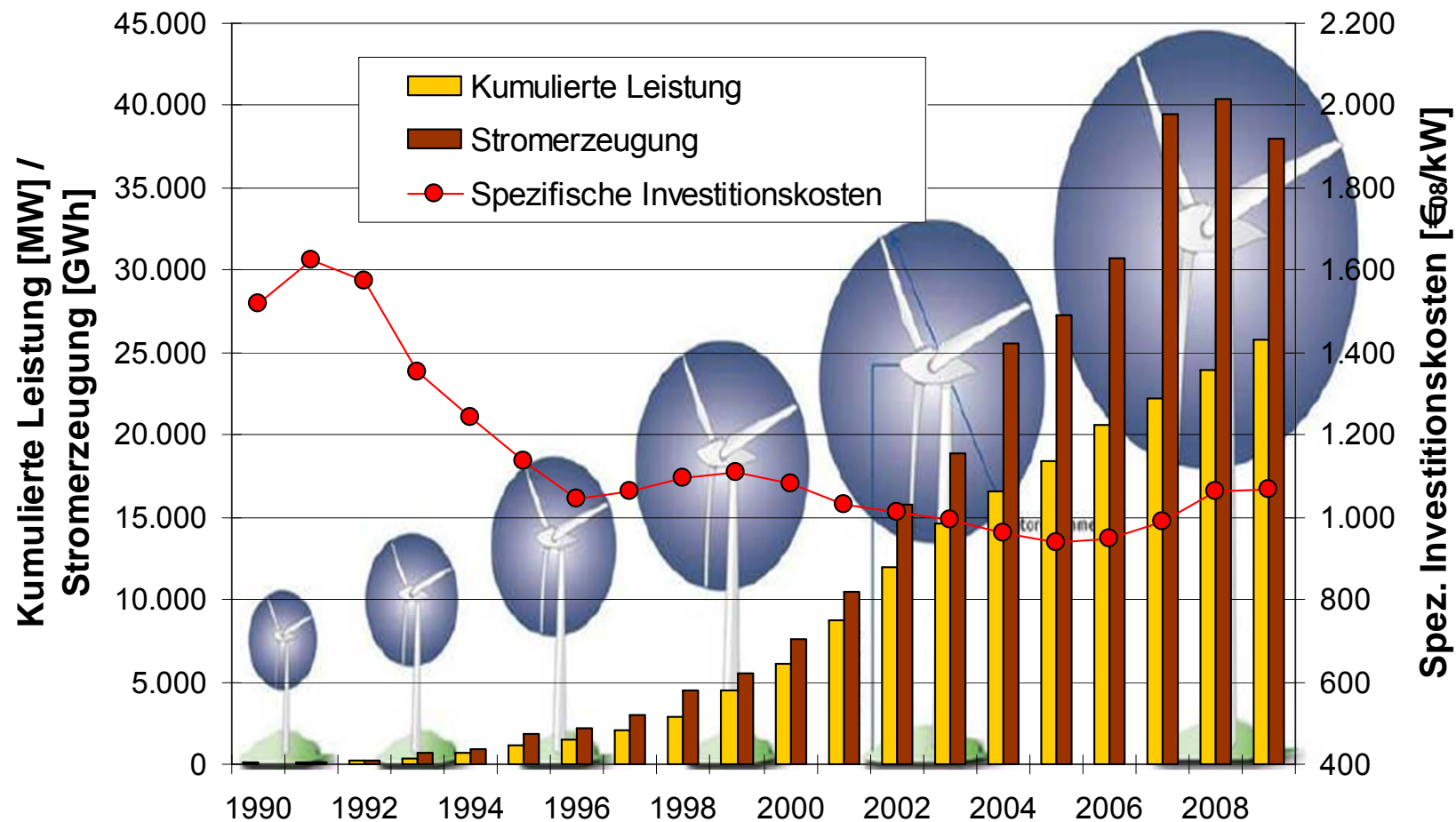


Entwicklung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien





Entwicklung der installierten Windleistung und der spezifischen Investitionskosten von Windenergieanlagen



Quellen: Bundesverband Windenergie e.V.; Staiß et al. 2008; BMU 2010



Kosten des Windstroms Onshore



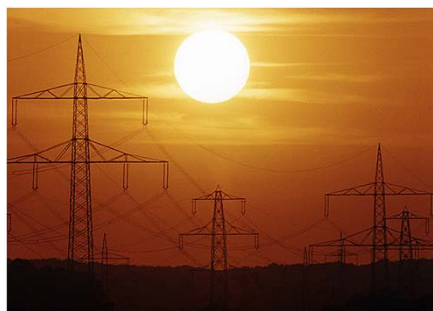
Erzeugungskosten (je nach Standort)

8,3 bis 11,9 ct / kWh



Back-up-Kosten für gesicherte Leistung

1,0 bis 2,0 ct / kWh



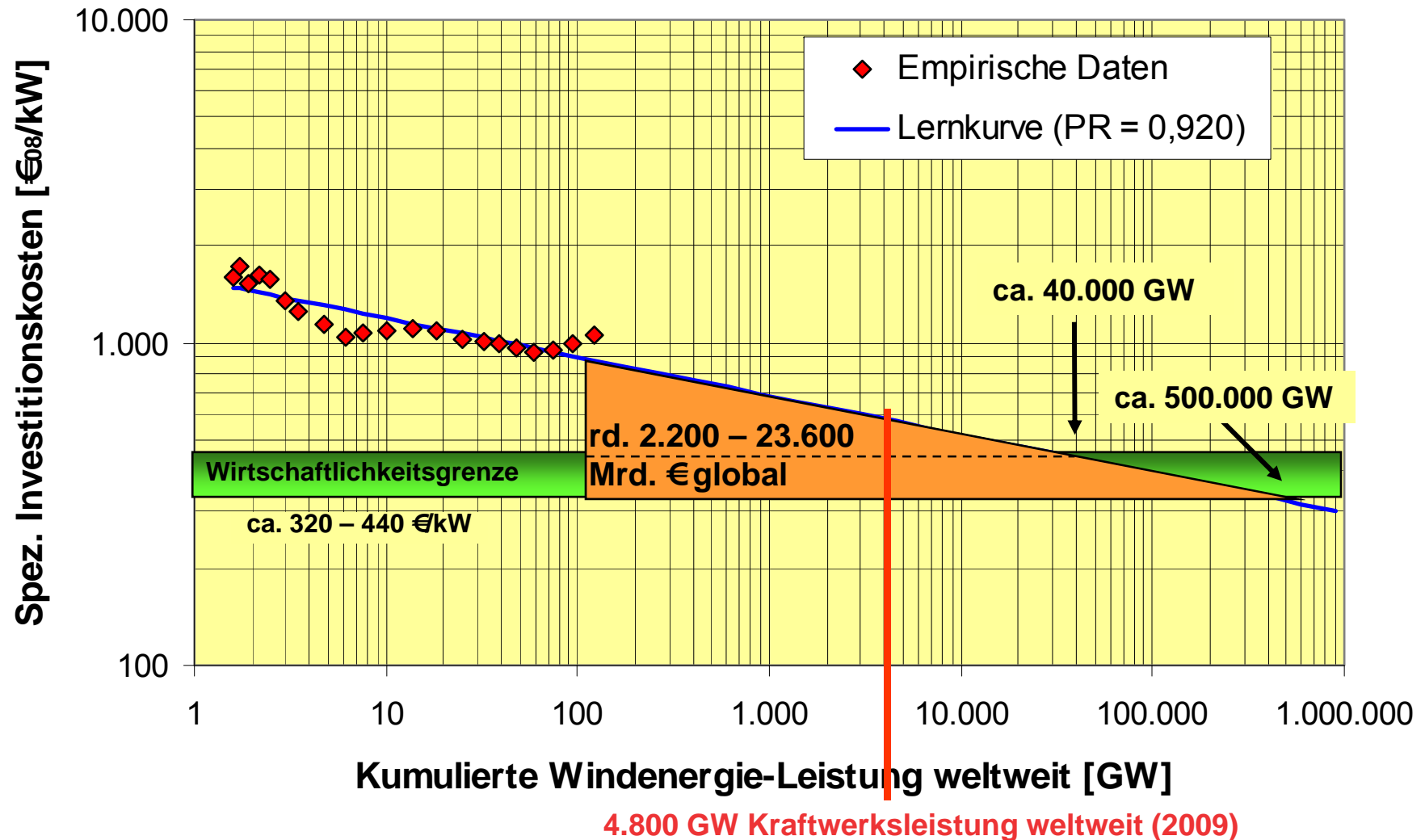
Netzausbau und Netzverluste

ca. 0,2 ct / kWh

ca. 9,5 bis 14 ct / kWh



Lerninvestitionen Windenergie





Windenergie Offshore (Deutschland)

- Technisches Erzeugungspotenzial
 - 237 TWh/a*
- Offshore-Windparks (Anfang 2011)
 - Alpha Ventus: 60 MW
 - Baltic I: 48,3 MW
 - BARD Offshore 1: 40 MW**
- Investitionskosten
 - 2.500 – 3.550 EUR/kW_{el}
- Stromerzeugungskosten
 - ~ 15 Cent/kWh_{el}

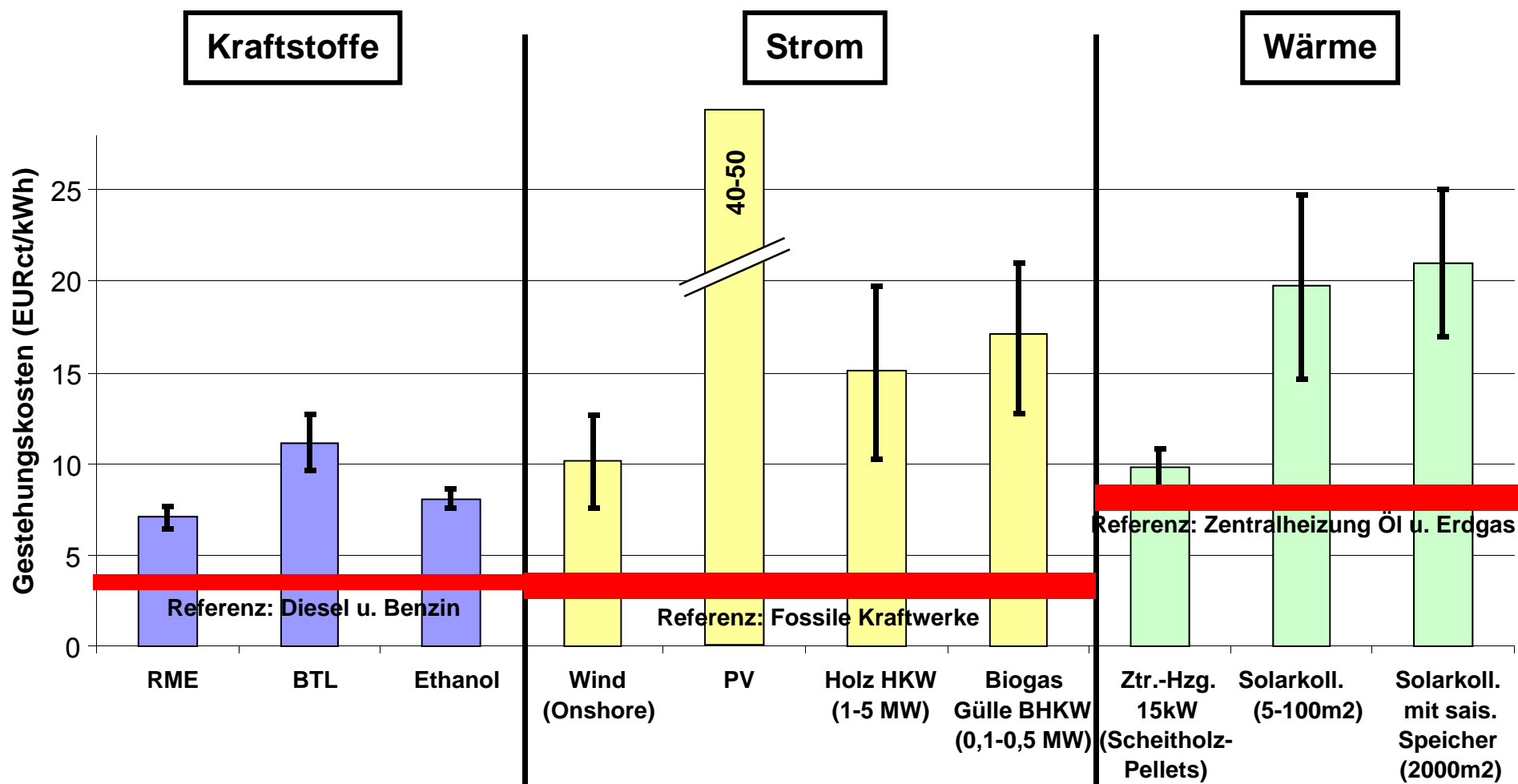


Quelle "BARD-Gruppe"

*Wassertiefe: > 10 m; mittlere Wassertiefe: ca. 40 m; maximale Entfernung von der Küste: 30 km; **am Netz angeschlossen



Gestehungskosten von Strom, Wärme und Kraftstoffen aus erneuerbaren Energien



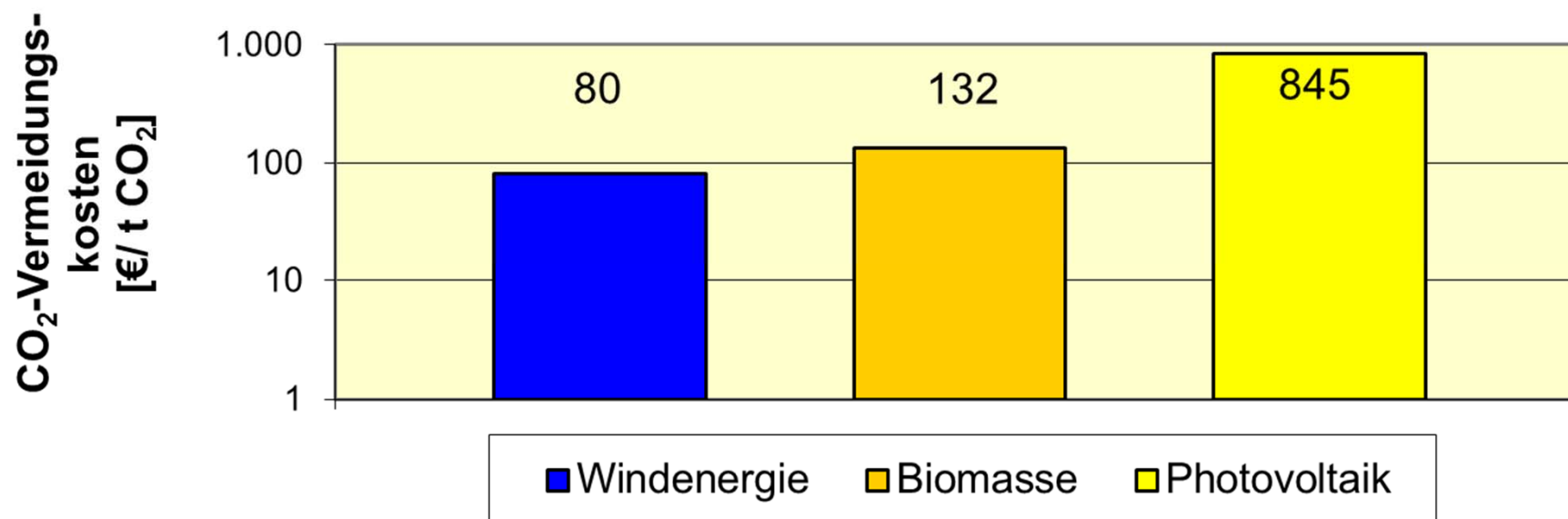
Quelle: FNR 2006, MWV 2009, Staiß 2007

03/09



CO₂-Vermeidungskosten 2009 der Stromerzeugung aus EE

	CO ₂ -Vermeidung 2008 [Mio. t]	EEG-Förderung 2009 [Mio. €]
Windenergie	27,8	2.237
Biomasse	22,8	3.011
Photovoltaik	3,5	2.959





➤ **Nachhaltige Energieversorgung – was ist darunter zu verstehen?**



Nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development)

Brundtland Kommission:

„Nachhaltige Entwicklung“ ist eine „Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können“.

Ziel

Die Verbesserung der ökonomischen und sozialen Lebensbedingungen aller Menschen, der heute und zukünftig lebenden, mit der langfristigen Sicherung der natürlichen Lebensgrundlagen in Einklang zu bringen.



Naturwissenschaftliche Grundlagen

- 2. Hauptsatz der Thermodynamik \Rightarrow Leben sowie die Entfaltung wirtschaftlicher und kultureller Leistungen bedürfen ständiger Zufuhr von arbeitsfähiger Energie und Materie.
- Wachsendes Wissen (Gestaltungsfähigkeit) und die damit mögliche Weiterentwicklung von Technik sind die Basis zur Erhaltung bzw. Erweiterung der Entfaltungsspielräume kommender Generationen.
- Energiebedingte Umweltbelastungen resultieren aus der mit der Stoffwandlung verbundenen Stofffreisetzungen in die Umwelt.

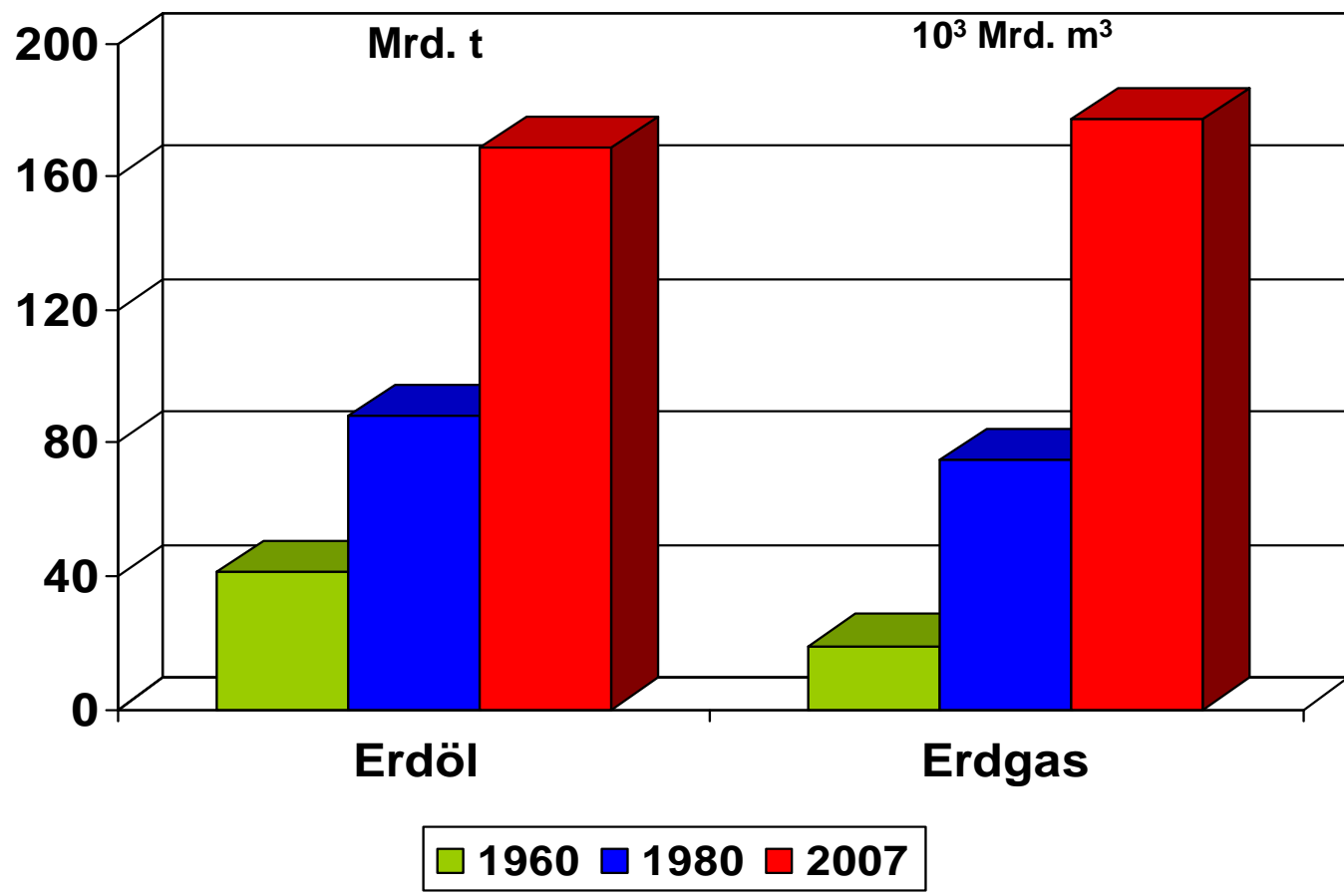


Nachhaltigkeit und die Nutzung vorratsbegrenzter Ressourcen

- Ist die Nutzung vorratsbegrenzter Ressourcen (z.B Erdöl und Kohle) mit dem Nachhaltigkeitsprinzip vereinbar ?
- Die Bereitstellung von Energiedienstleistungen erfordert neben dem Einsatz von Energieträgern immer auch den von nichtenergetischen Rohstoffen und Materialien.
- Stand der Technik bestimmt die technisch-wirtschaftlich verfügbare Energie- und Rohstoffbasis.
- Eine Nutzung vorratsbegrenzter Ressourcen erfordert eine Gegenleistung:
 - die Ausweitung der technisch-wirtschaftlich verfügbaren Ressourcenmenge.



Entwicklung der sicher gewinnbaren Reserven





Effiziente Ressourcennutzung und Ökonomie

- Haushälterischer Umgang mit knappen Ressourcen ist ein zentraler Aspekt von Nachhaltigkeit.
- Auch das allgemeine ökonomische Prinzip zielt auf die Minimierung des Ressourcenverbrauchs ab.
 - Kosten und Preise dienen dabei als Maß für die Ressourceninanspruchnahme.
- Vollkosten, die die Umweltinanspruchnahme erfassen, sind ein Maß für den gesamten Ressourcenverbrauch.
 - relative Nachhaltigkeit



Nachhaltige Energieversorgung

wenn

- das Potenzial für die Bereitstellung von Energiedienstleistungen für die nächste Generation größer wird
 - ➔ Ausweitung der wirtschaftlich nutzbaren Energie- und Rohstoffbasis
- die mit der Energienutzung verbundenen Stofffreisetzungen die Assimilationskapazität der Umwelt als Senke nicht überschreiten
- die Energiedienstleistungen mit möglichst geringem Ressourcenaufwand, einschließlich der Ressource Umwelt bereitgestellt werden
 - ➔ Relative Nachhaltigkeit von Energiesystemen lässt sich messen am gesamten Ressourcenverbrauch je Energieeinheit
 - ➔ Vollkosten sind Maß für relative Nachhaltigkeit

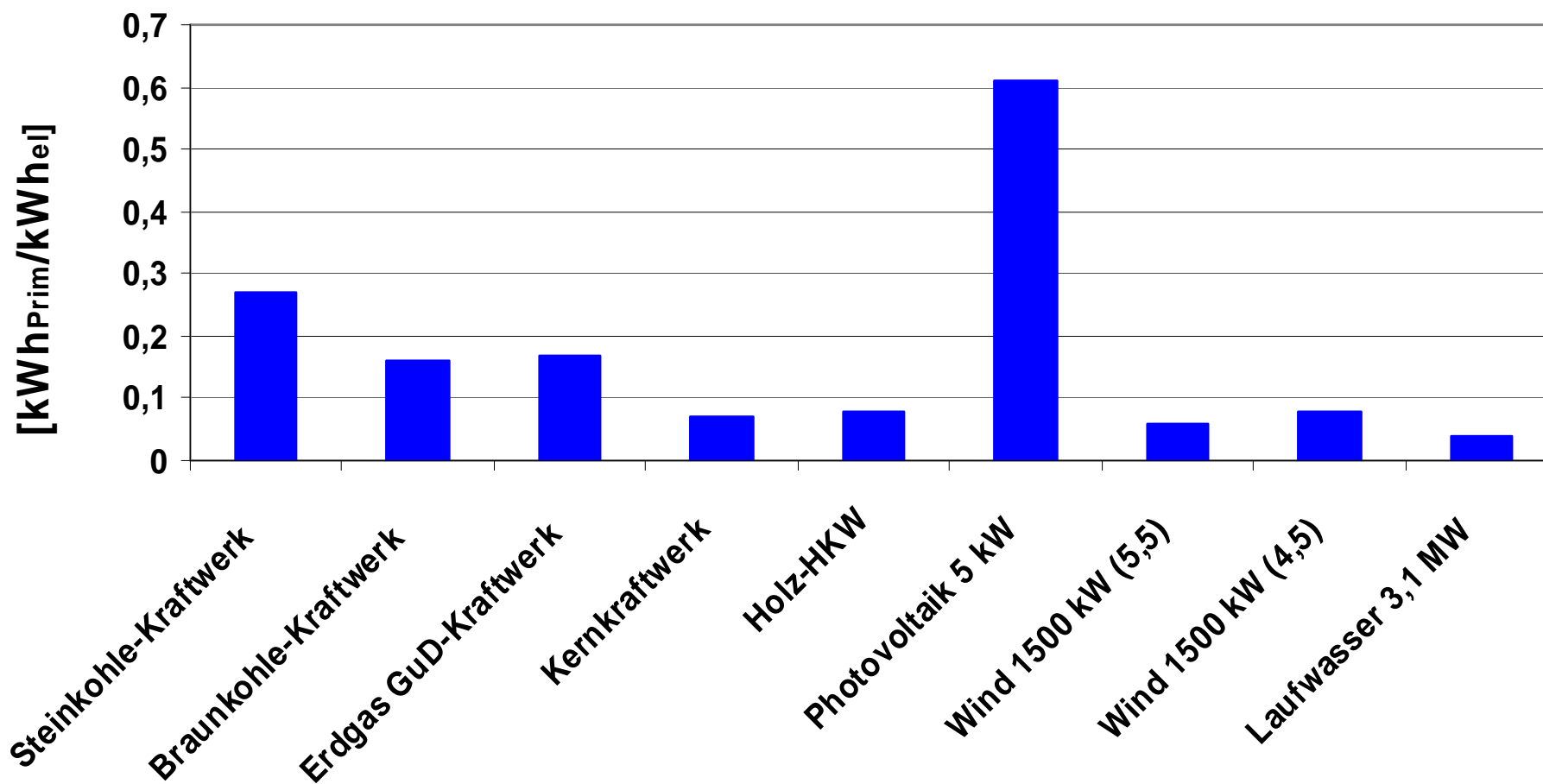


➤ **Stromerzeugungssysteme auf dem Prüfstand der Nachhaltigkeit**

Ressourcenverbrauch und ökologischer Fußabdruck verschiedener Stromerzeugungstechniken



Spezifischer kumulierter Energieaufwand (KEA) (ohne Brennstoff)



Quelle: IER 2005/07



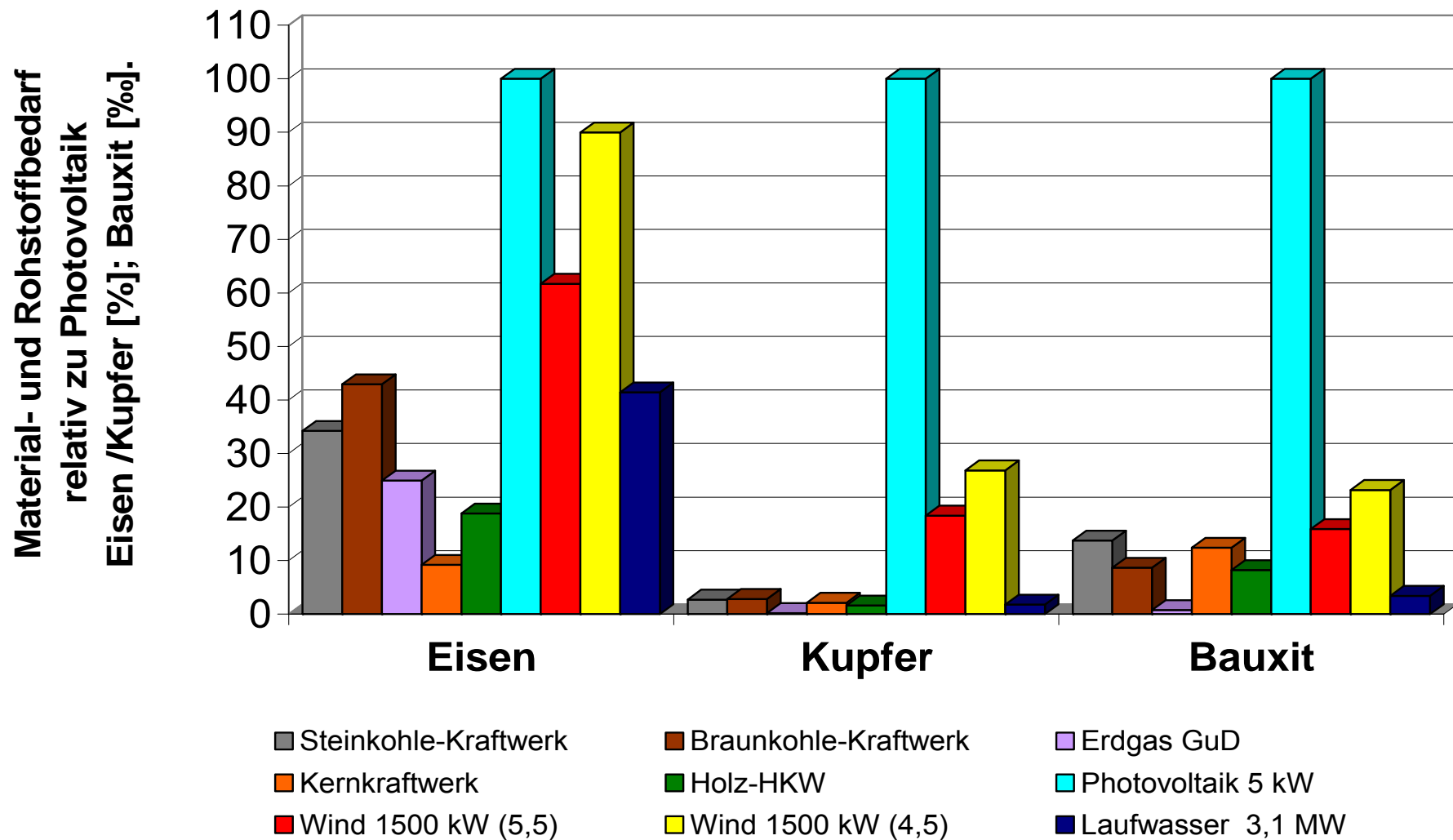
Gesamter Rohstoff und Materialaufwand

	Eisen [kg/GWh _{el}]	Kupfer [kg/GWh _{el}]	Bauxit [kg/GWh _{el}]
Steinkohle-Kraftwerk	1.700	8	30
Braunkohle-Kraftwerk	2.134	8	19
Erdgas GuD	1.239	1	2
Kernkraftwerk	457	6	27
Holz-HKW	934	4	18
Photovoltaik 5 kW	4.969	281	2.189
Wind 1500 kW (5,5)	3.066	52	35
Wind 1500 kW (4,5)	4.471	75	51
Laufwasser 3,1 MW	2.057	5	7

Quelle: IER 2005/07



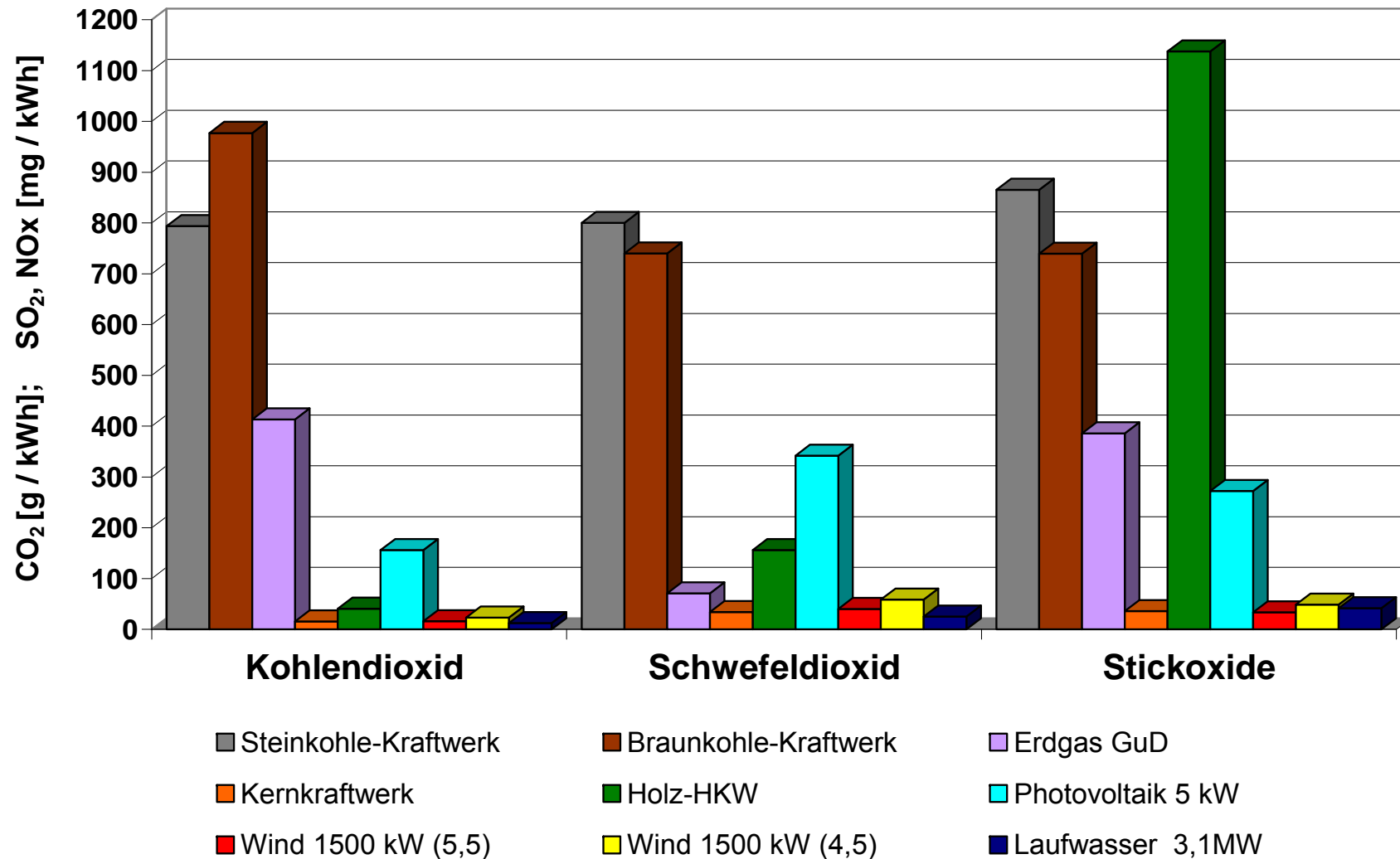
Gesamter Rohstoff und Materialaufwand



Quelle: IER 2005/07



Kumulierte Emissionen



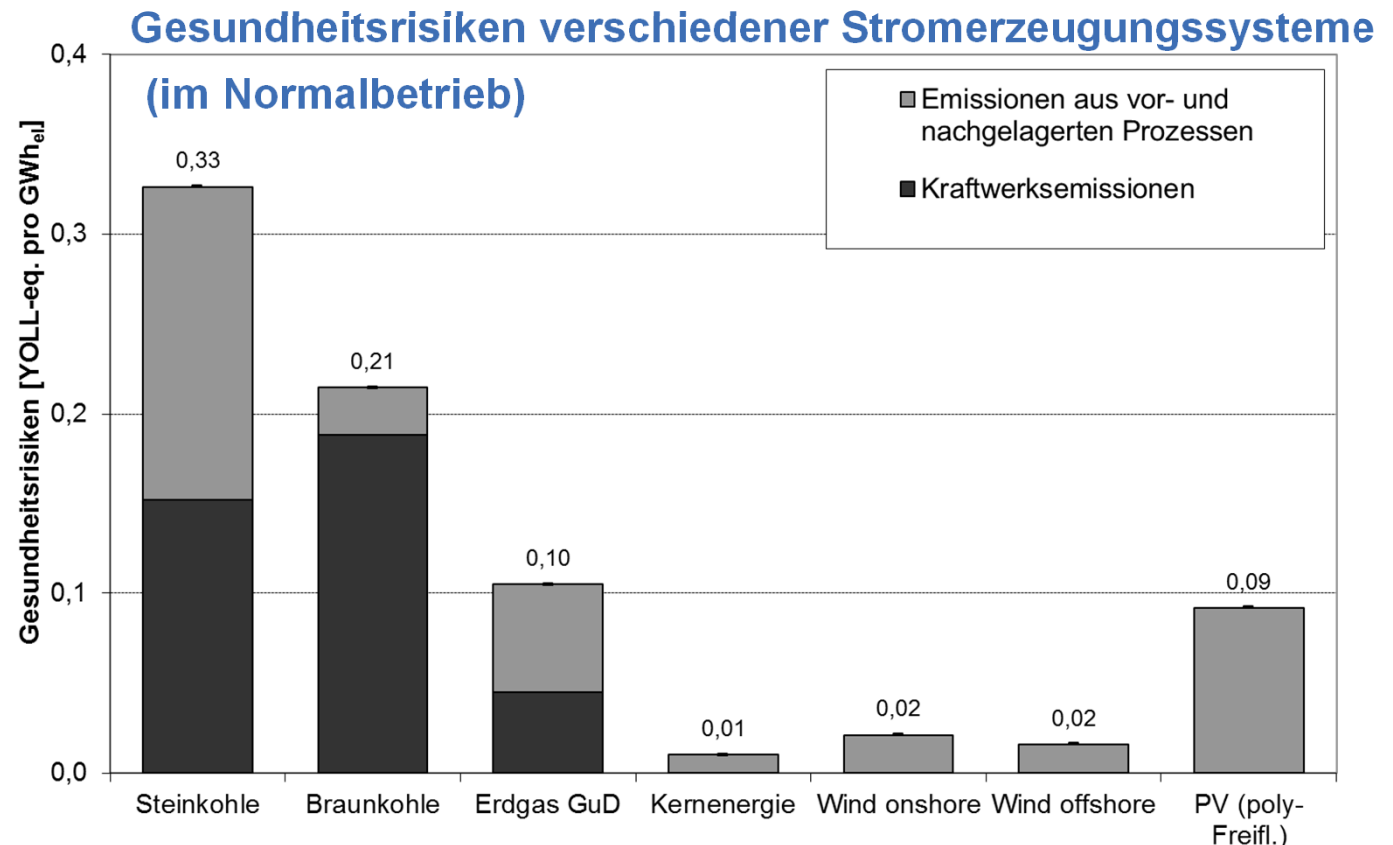
Quelle: IER 2005/07



Risiken für das menschliche Leben und die Gesundheit - Gesundheitsrisiken von Energiesystemen

Die Produktion von Gütern und Dienstleistungen, und damit auch die Bereitstellung elektrischer Energie ist mit Gesundheitsrisiken verbunden.

~ 1300 tödliche Arbeitsunfälle in Deutschland (Mittelwert der letzten 20 Jahre)
~ 480.000 verlorene Lebensjahre (YOLL) durch Luftschadstoffe in Deutschland





Naturkatastrophen

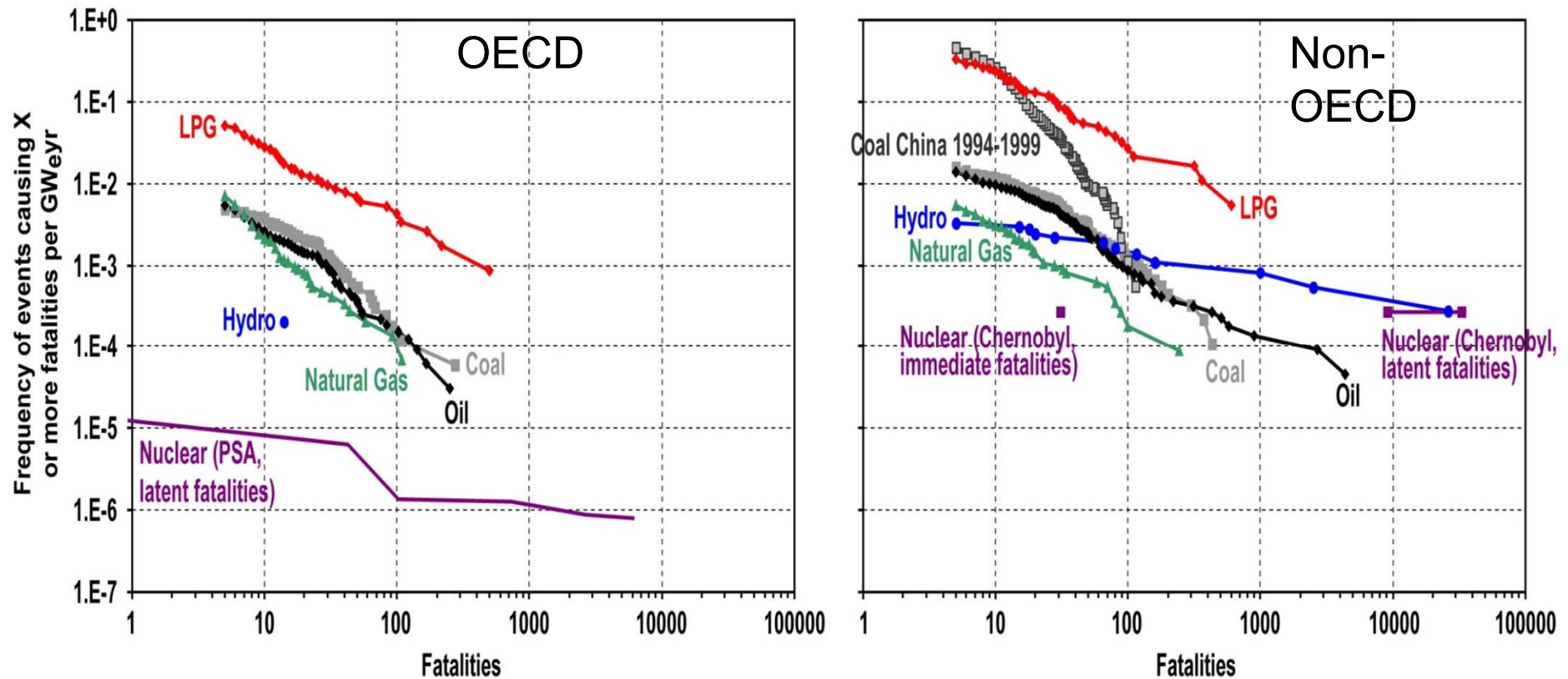
- 1976 China, Tangshan Erdbeben: 290 000 Tote
- 1985 Kolumbien, Ausbruch des Vulkans Nevado del Ruiz: etwa 22 000 Tote
- 1991 Bangladesh, Zyklon: etwa 139 000 Tote
- 1995 Japan, Erdbeben in Kobe: 6400 Tote
- 2004 Indischer Ozean, Erdbeben und Tsunami: etwa 300 000 Tote
- 2010 Haiti, Erdbeben: etwa 200 000 Tote
- 2011 Japan, Tohoku Erdbeben: ca. 15 000 Tote, 10 000 Vermisste

Schwere Unfälle

- 1975 China, Banqiao Staudammbruch: 26 000 Tote
- 1984 Indien, Chemieunfall in Bhopal: 5000 Tote
- 1986 Ukraine, Reaktorunfall in Tschernobyl, 31 unmittelbare Tote, bis zu 33 000 geschätzte latente Todesfälle
- 1993 Haiti, Fährunglück: ca. 1800 Tote
- 1998 Nigeria, Explosion Benzinpipeline: ca. 900 Tote
- 2011 Japan, Reaktorunfall Fukushima: ?



Häufigkeiten und Todesfälle durch große Unfälle (1970-2005)



- Hohe Unfallwahrscheinlichkeit bei LPG (liquid petrol gas) und bei Kohleminen in China.
- Dambrüche in Entwicklungsländern können Tausende Tote verursachen; letzter Dambruch in OECD Ländern > 1000 Tote in Vaiont, Italien; 1917 Tote im Jahre 1963)

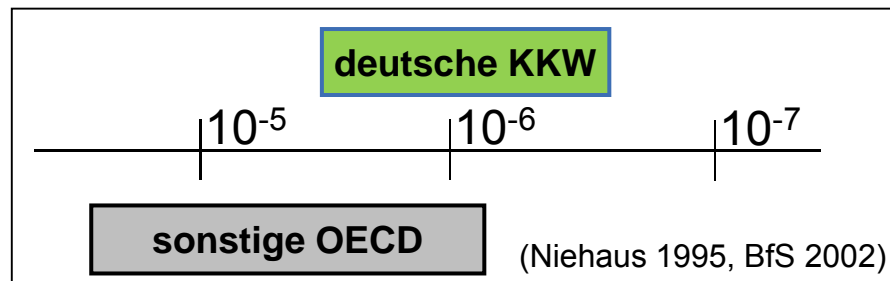
(Hirschberg, PSI 2008)



Unfallrisiken der Kernenergie

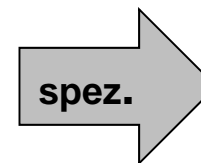
Kernschadenshäufigkeit in [1/a]

Deutscher Kernkraftwerke im Vergleich zu Reaktoren in anderen OECD-Länder



Häufigkeit großer Freisetzungen

etwa um den Faktor fünf bis zehn geringer als die Kernschadenshäufigkeit



**Gesundheitsrisiken =
Häufigkeit des Unfalls •
Gesundheitsschäden**

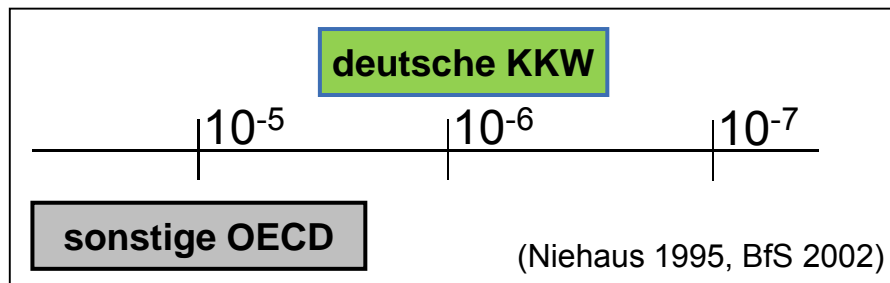
	Gesundheitsrisiken
	[YOLL-eq./GWh]
h = Kernschaden	$1,8 \cdot 10^{-8} - 6,8 \cdot 10^{-4}$
h = Freisetzung	$1,8 \cdot 10^{-9} - 1,4 \cdot 10^{-4}$
Normalbetrieb	$\sim 1,0 \cdot 10^{-2}$



Unfallrisiken der Kernenergie

Kernschadenshäufigkeit in [1/a]

Deutscher Kernkraftwerke im Vergleich zu Reaktoren in anderen OECD-Länder



Häufigkeit großer Freisetzungen

etwa um den Faktor fünf bis zehn geringer als die Kernschadenshäufigkeit

Schäden

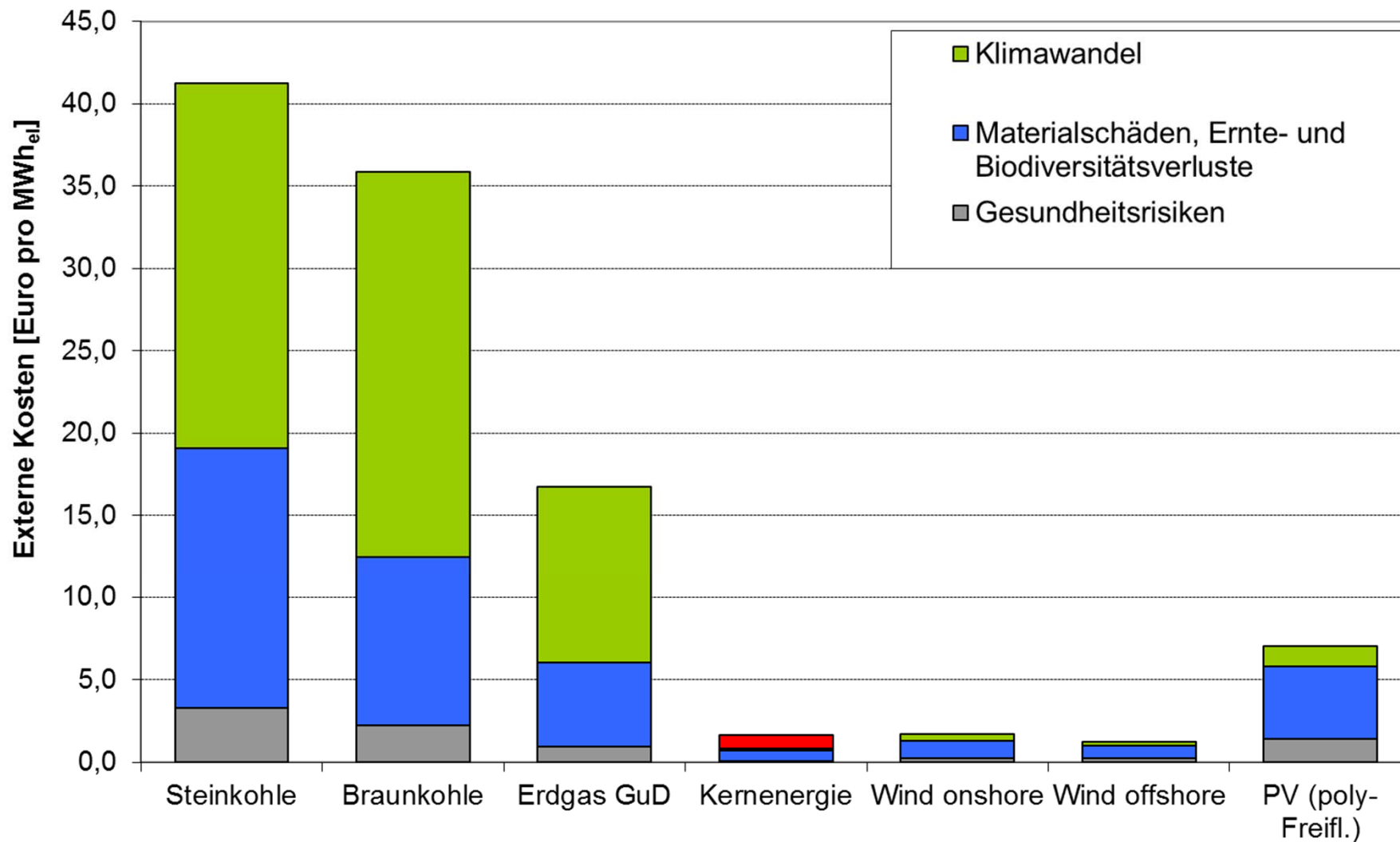
Unter Berücksichtigung von Gesundheitsrisiken, Wertschöpfung und Umsiedlung

spez. **Erwartungswert des Schaden = Häufigkeit des Unfalls • Schaden**

	Erwartungswert des Schadens
	[Euro/MWh]
h = Kernschaden	$1,1 \cdot 10^{-4} - 8,6 \cdot 10^{-1}$
h = Freisetzung	$1,1 \cdot 10^{-5} - 1,7 \cdot 10^{-1}$



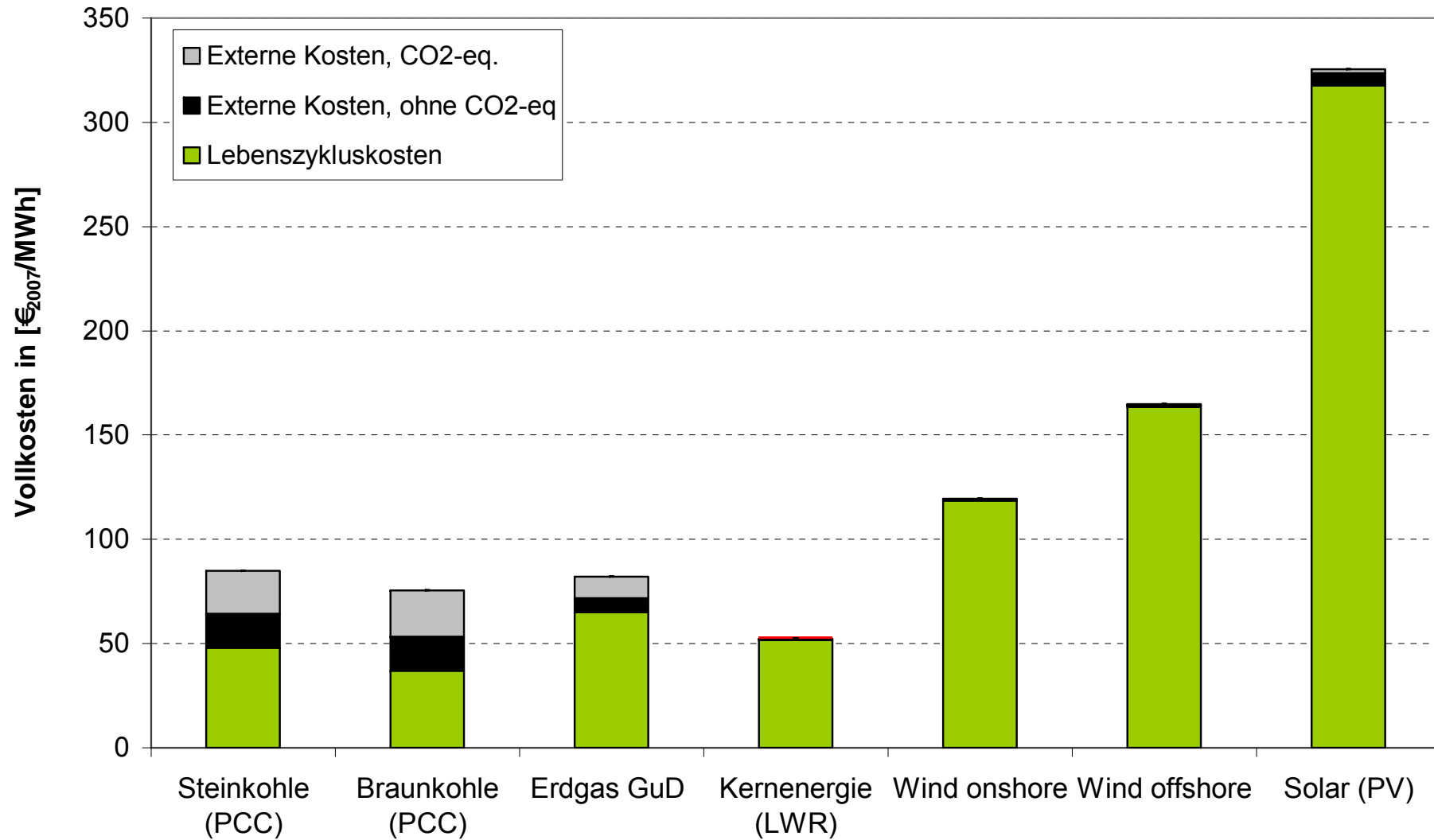
Externe Kosten





Vollkosten

Diskontrate 7,5 %





➤ Szenarien der Entwicklung der Energieversorgung

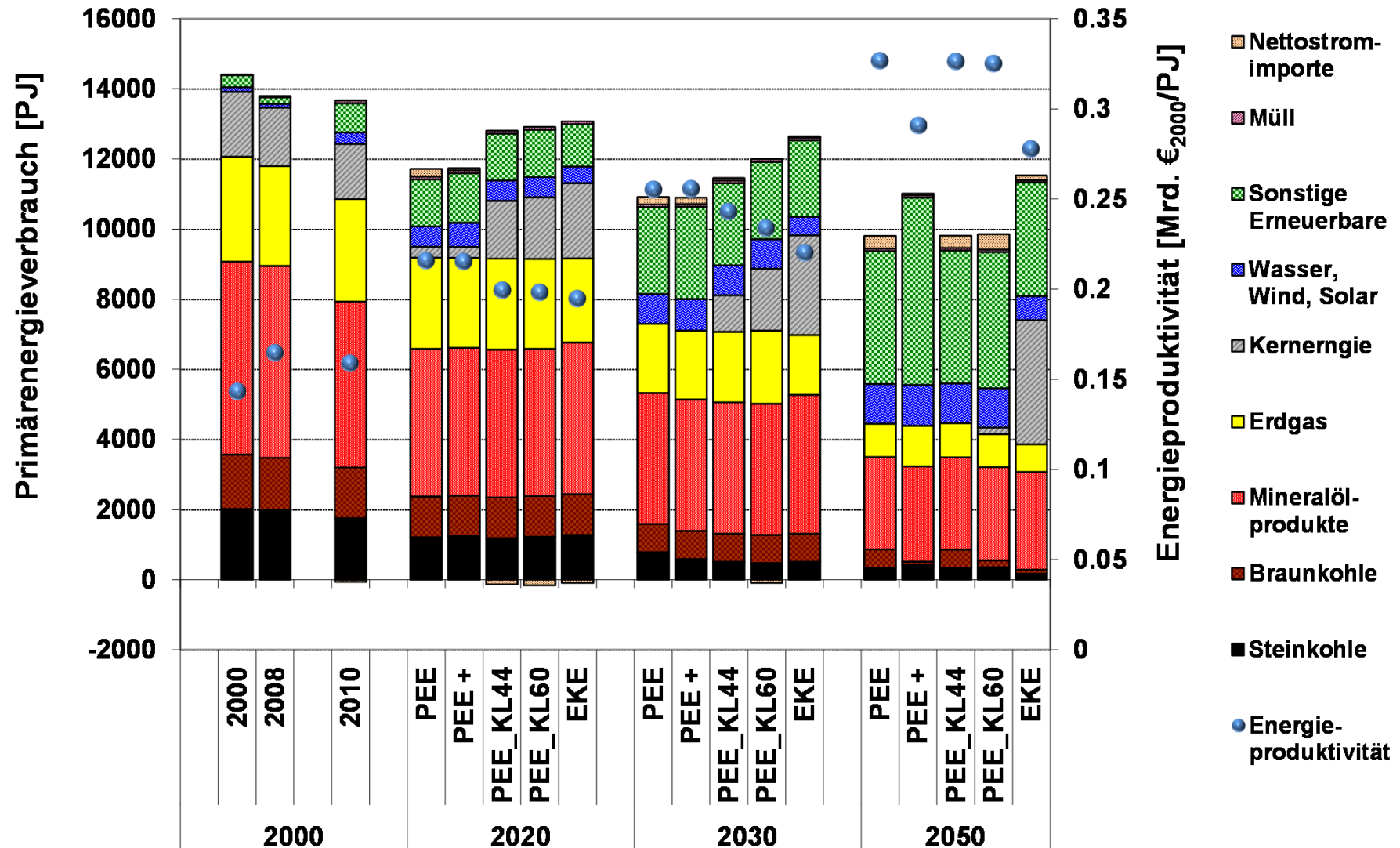


Szenarien zur Entwicklung der Elektrizitätserzeugung

Szenario	Beschreibung	
PEE	Präferenz Erneuerbare Energien <ul style="list-style-type: none">- Wachsende Anteile Erneuerbarer Energien an der Stromerzeugung (2030 ~40 %, 2050 ~60 %)- Kernenergieausstieg (32 Jahre)	THG- Reduktion bis 2050 75% ggü. 1990 (EU-weit)
PEE +	Wie PEE, aber höherer Stromanteil Erneuerbarer Energien (2030 ~50%, 2050 ~80%)	
PEE_KL44	Wie PEE, aber mit Kernenergie-Laufzeitverlängerung auf 44 Jahre	
PEE_KL60	Wie PEE, aber mit Kernenergie-Laufzeitverlängerung auf 60 Jahre	
EKE	Effizienter Klimaschutz in Europa <ul style="list-style-type: none">- kosteneffiziente Treibhausgasreduktion- Kernenergiezubau möglich	

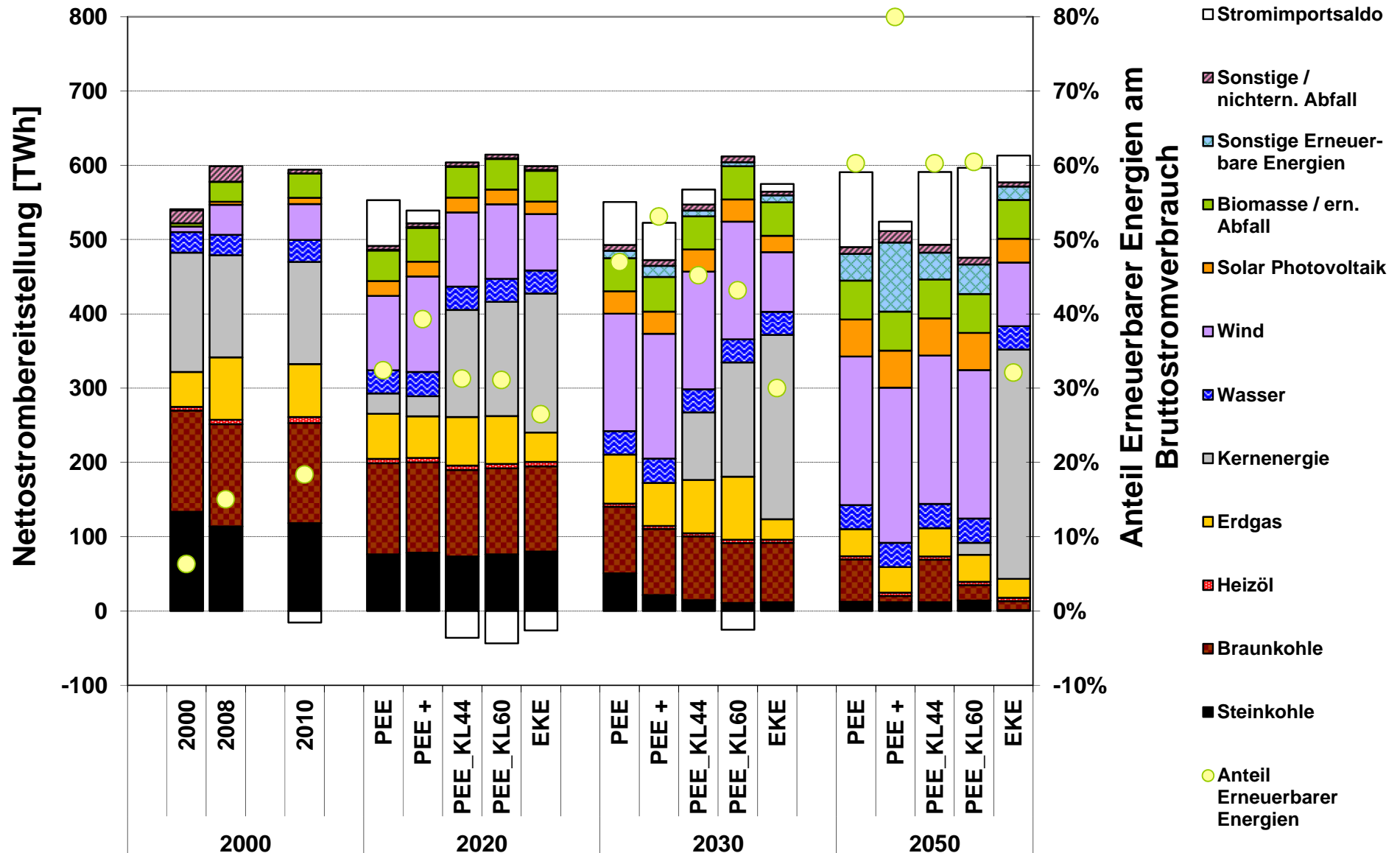


Primärenergieverbrauch und Energieproduktivität in Deutschland



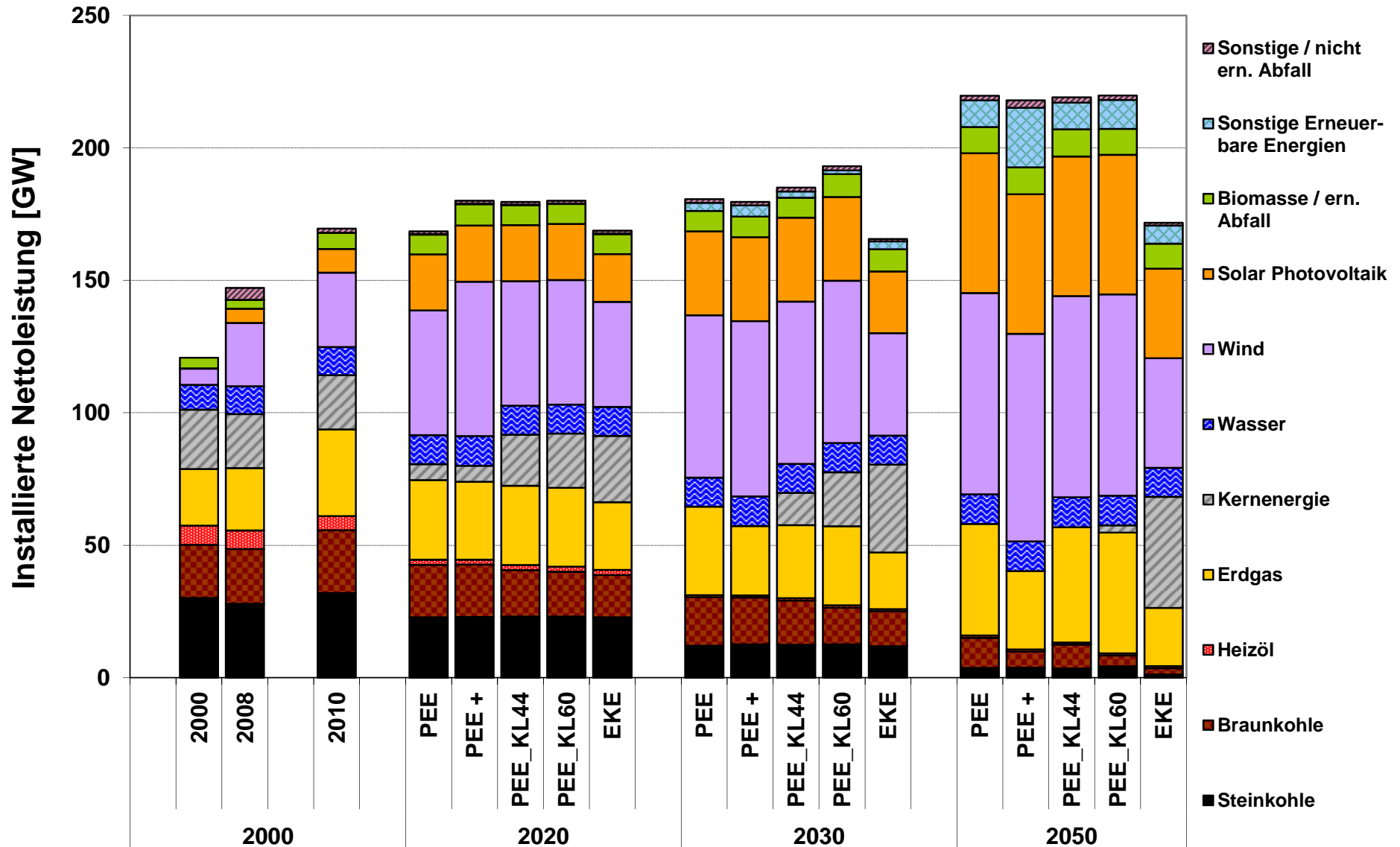


Nettostrombereitstellung in Deutschland



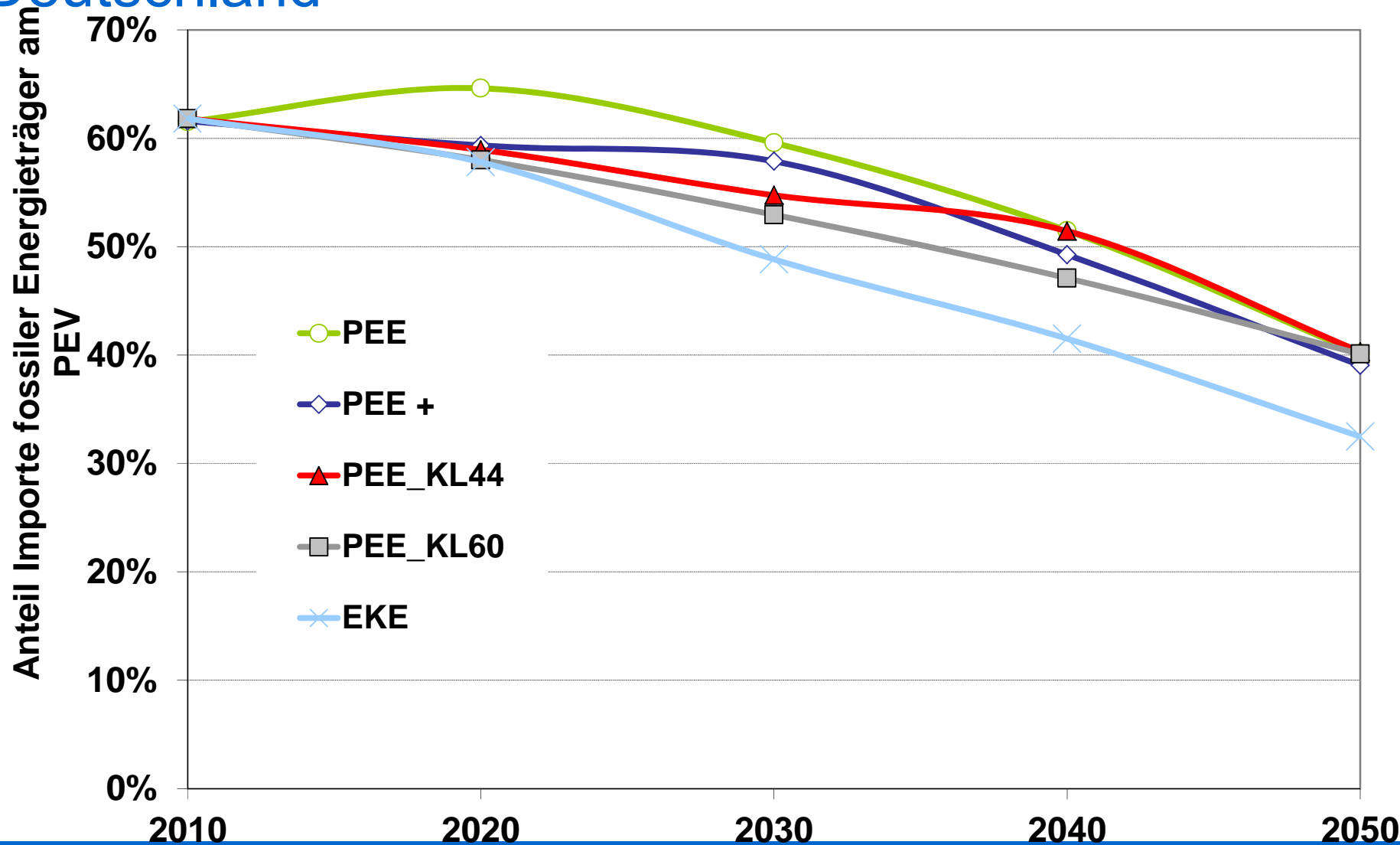


Stromerzeugungskapazitäten in Deutschland





Importabhängigkeit fossiler Energieträger in Deutschland



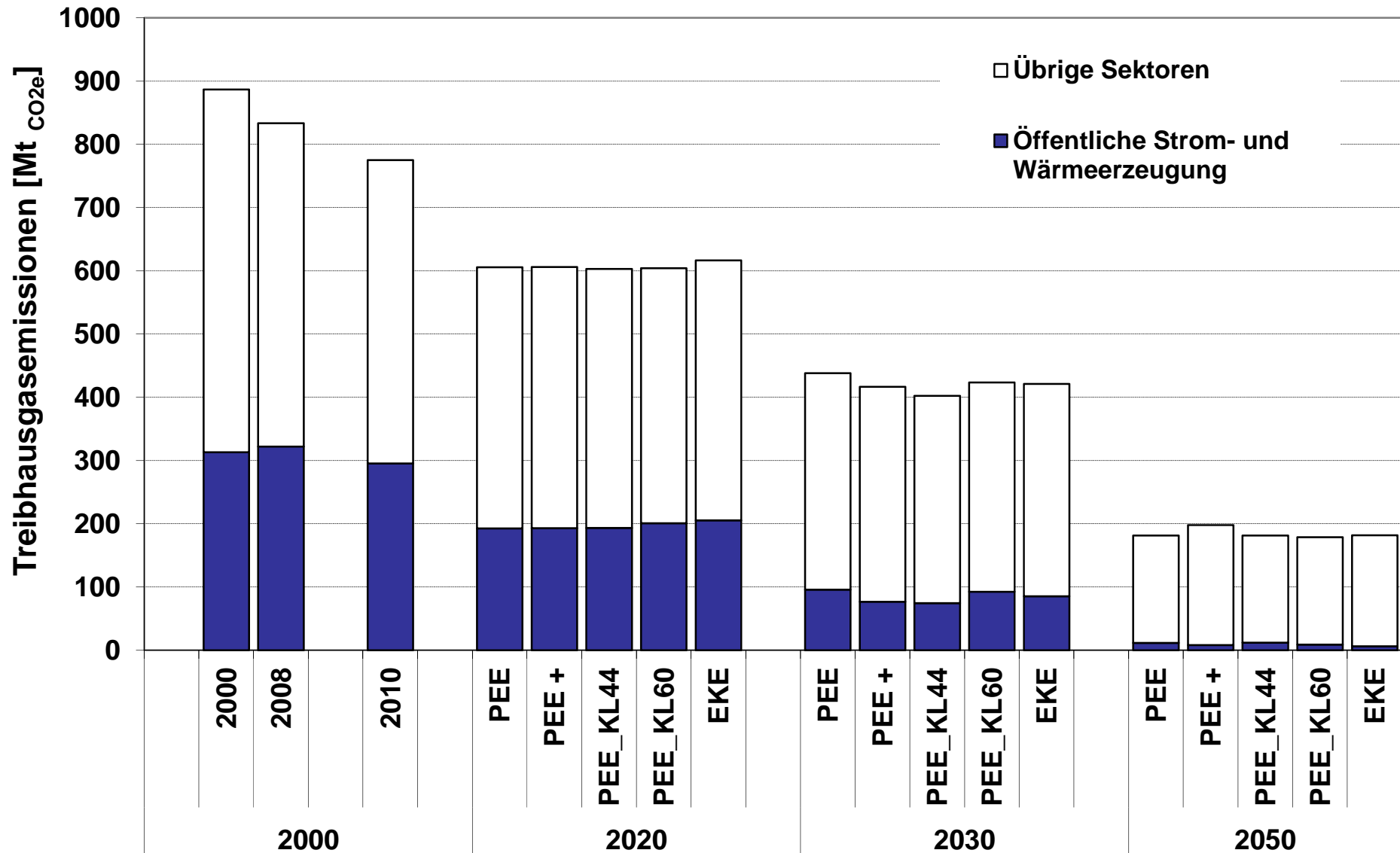


Treibhausgasemissionen in Deutschland

		2020	2030	2040	2050
Gesamt [Mio.tCO ₂ e]	PEE	605,5	437,9	290,1	181,4
	PEE +	606,1	416,8	275,0	198,1
	PEE_KL44	602,8	402,4	276,3	181,5
	PEE_KL60	604,1	423,4	264,3	178,8
	EKE	616,6	421,0	270,7	181,7
Öffentliche Strom- und Wärme- erzeugung [Mio.tCO ₂ e]	PEE	192,5	96,1	17,7	11,7
	PEE +	193,1	76,9	10,0	8,2
	PEE_KL44	193,4	74,4	15,2	11,9
	PEE_KL60	201,0	92,5	8,9	8,9
	EKE	205,3	85,5	8,3	6,5

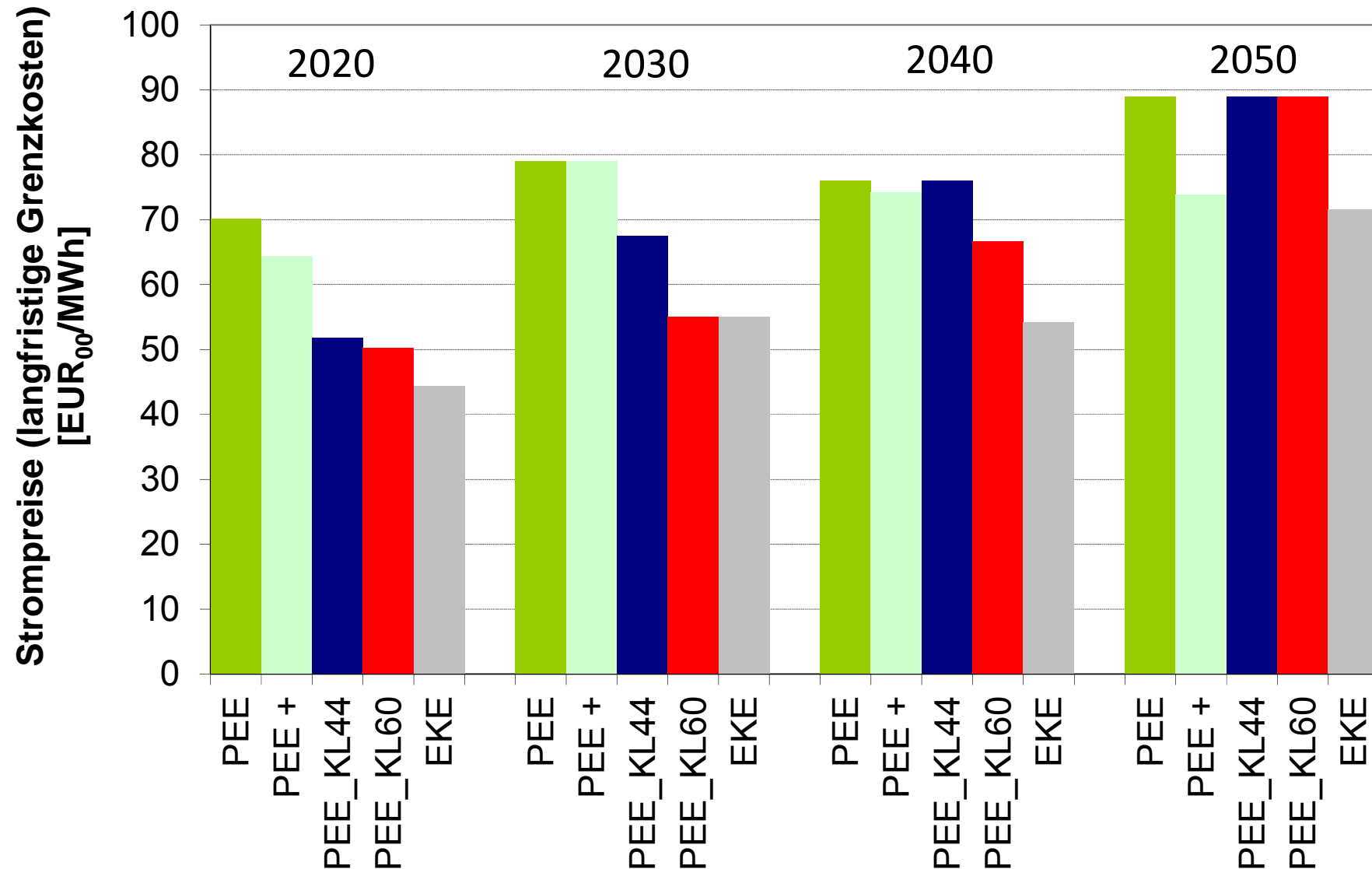


Treibhausgasemissionen in Deutschland



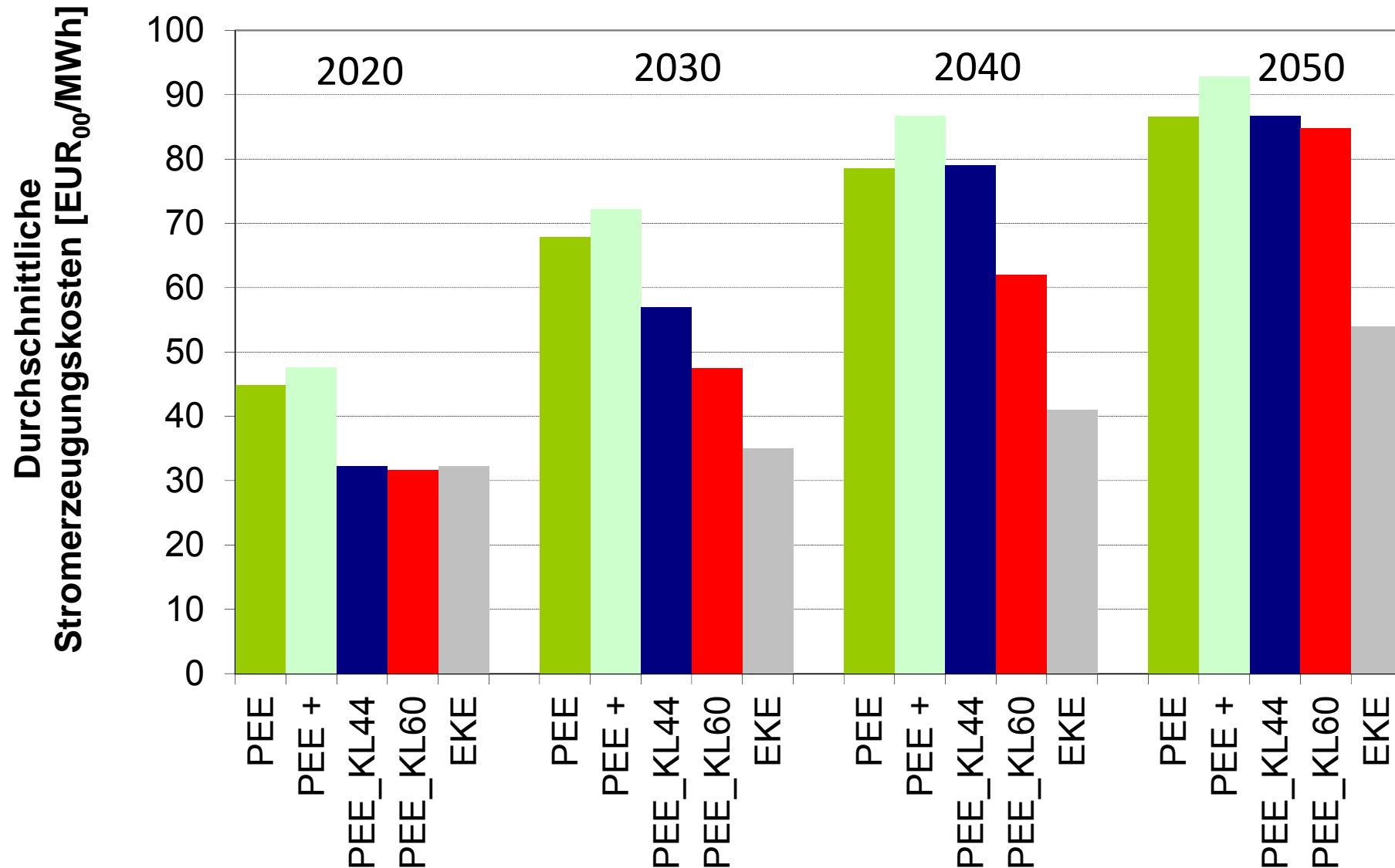


Strompreise (langfristige Grenzkosten)





Durchschnittliche Stromerzeugungskosten





Systemkosten für Deutschland

Veränderung gegenüber PEE	2030				2050			
	PEE +	PEE_KL44	PEE_KL60	EKE	PEE +	PEE_KL44	PEE_KL60	EKE
jährliche Systemkosten [Mrd. EUR₀₀]	1	-4	-8	-16	3	0	0	-19
kumulierte Systemkosten (ab 2010) [Mrd. EUR₀₀]	12	-75	-107	-176	32	-82	-212	-531

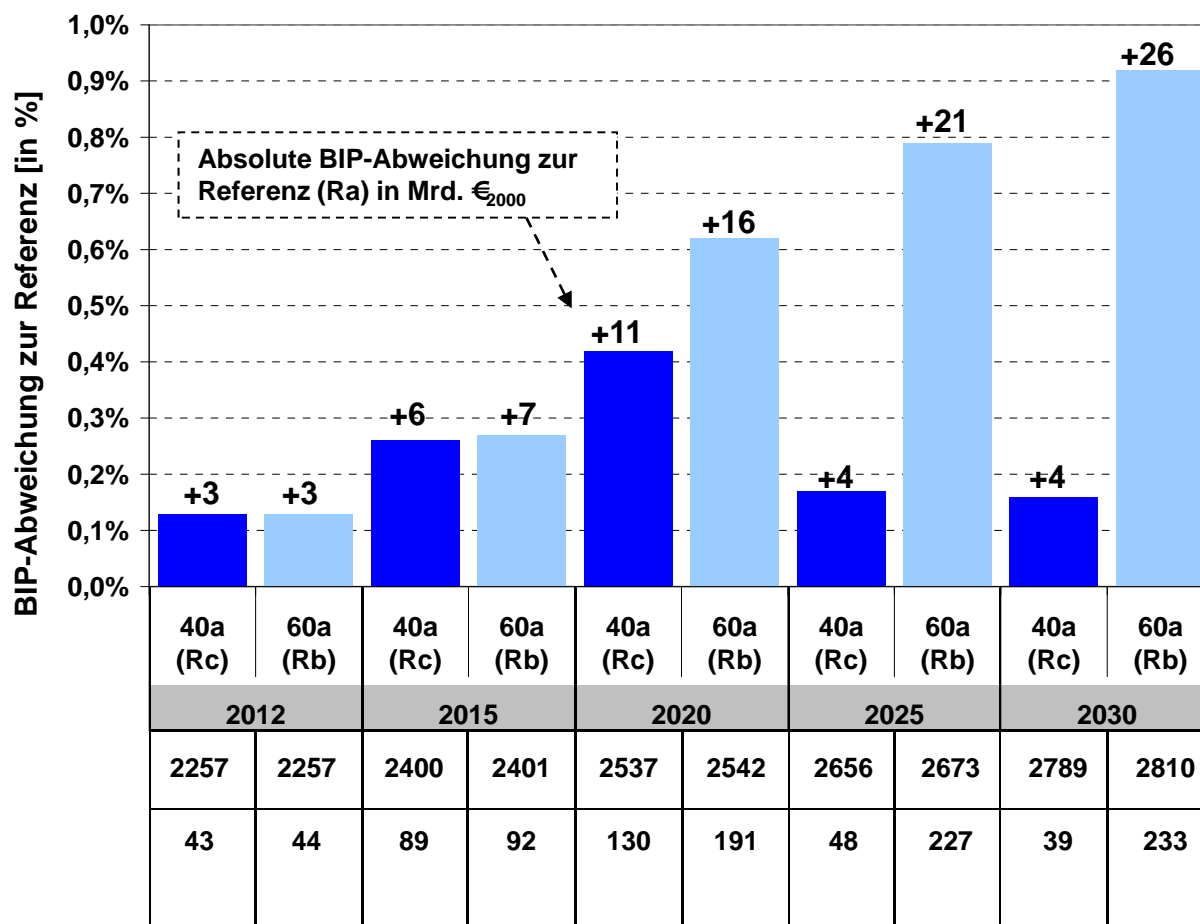


Systemkosten für die EU-27

Veränderung gegenüber PEE	2030				2050			
	PEE +	PEE_KL44	PEE_KL60	EKE	PEE +	PEE_KL44	PEE_KL60	EKE
jährliche Systemkosten [Mrd. EUR ₀₀]	1	-5	-26	-72	3	0	-9	-66
kumulierte Systemkosten (ab 2010) [Mrd. EUR ₀₀]	14	-73	-246	-693	39	-96	-699	-2194



Volkswirtschaftliche Effekte von Laufzeitverlängerungen auf 40 bzw. 60 Jahre



- Positive Auswirkungen einer Laufzeitverlängerung auf gesamtwirtschaftliche Entwicklung und Beschäftigte (kumulierte Steigerung des BIP um +295 Mrd. €₂₀₀₀)
- Günstigere CO₂-Zertifikats- und Strompreise wirken über volkswirtschaftliche Verflechtungen multiplikativ (Rückkopplung)

2257	2257	2400	2401	2537	2542	2656	2673	2789	2810	BIP [Mrd. € ₂₀₀₀]
43	44	89	92	130	191	48	227	39	233	Zusätzliche Beschäftigte [Tsd.] [gegenüber der Referenz (Ra)]



**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit!**