

Fachhochschule Südwestfalen

Hochschule für Technik und Wirtschaft

Wege zu einer nachhaltigen und wettbewerbsfähigen Energieversorgung

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Vortrag bei den Stadtwerken Soest, 13.03.2012

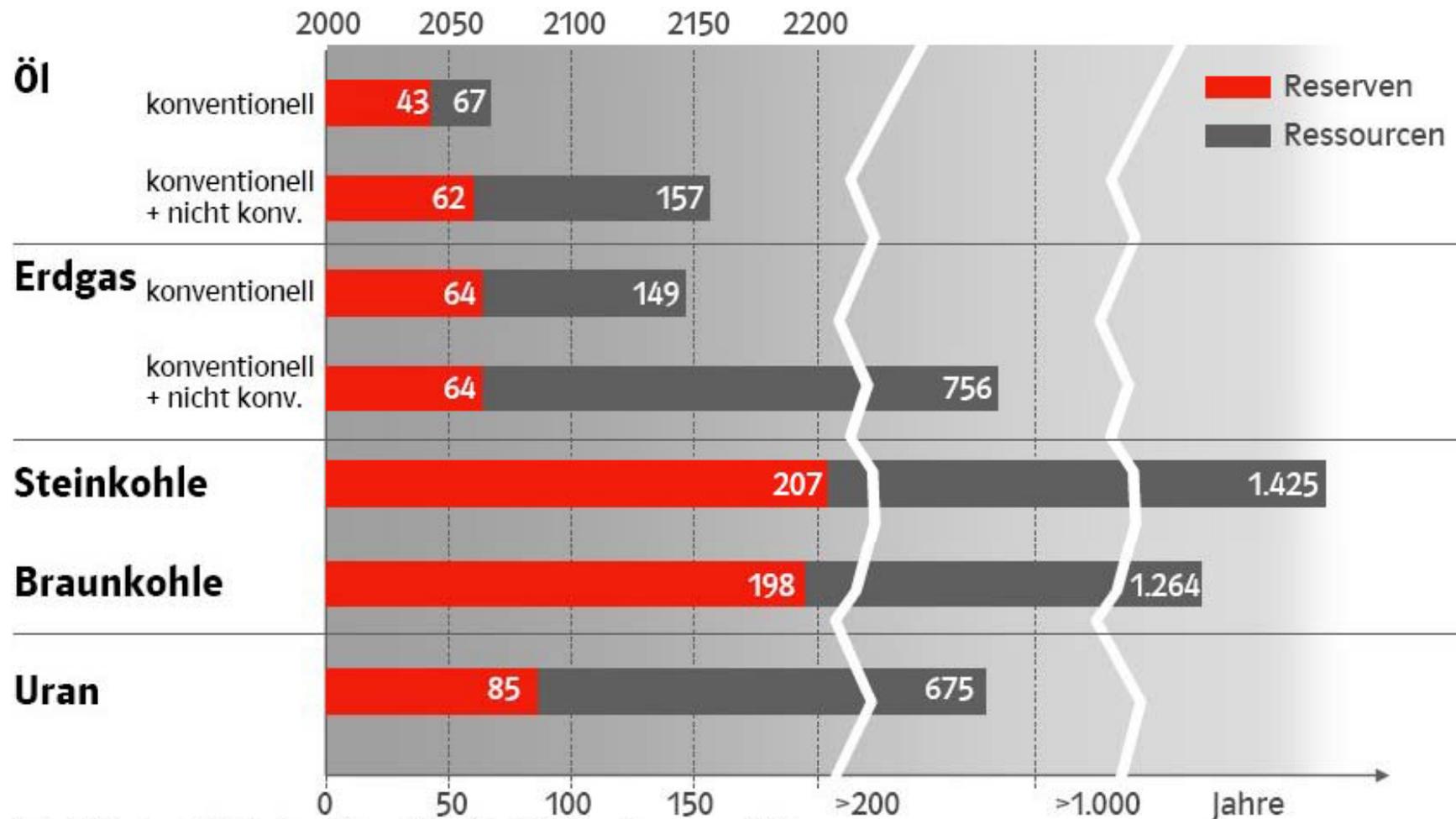




Herausforderungen für die Energiewirtschaft

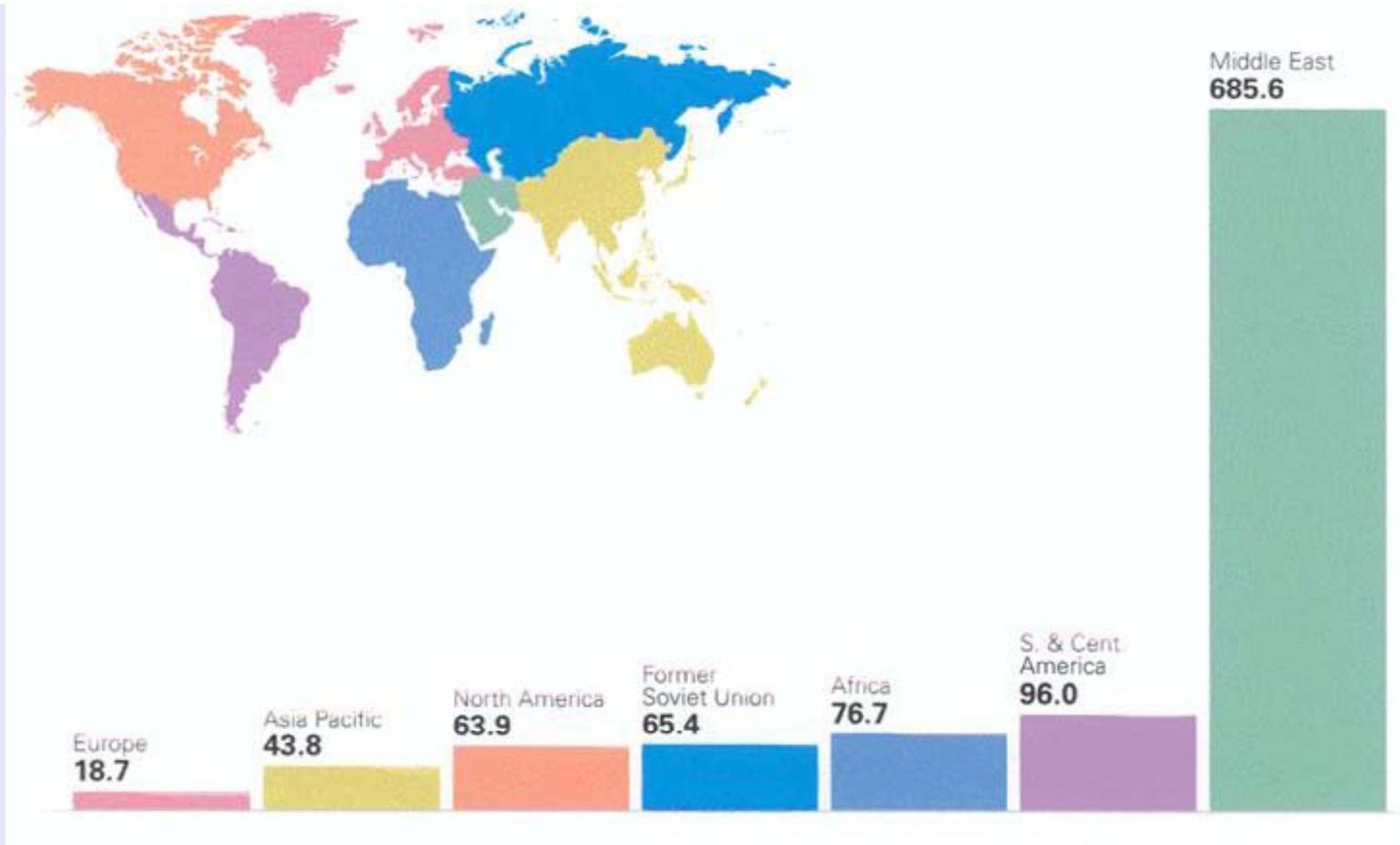
- Endlichkeit der Ressourcen fossiler Energieträger
- weltweit zunehmender Energieverbrauch
- Abhängigkeit Deutschlands von Brennstoffimporten
- Klimaänderung durch die Emission von Kohlendioxid
- Ausstieg aus der Kernenergie in Deutschland bis 2022

Reserven, Ressourcen und Reichweiten der Primärenergieträger



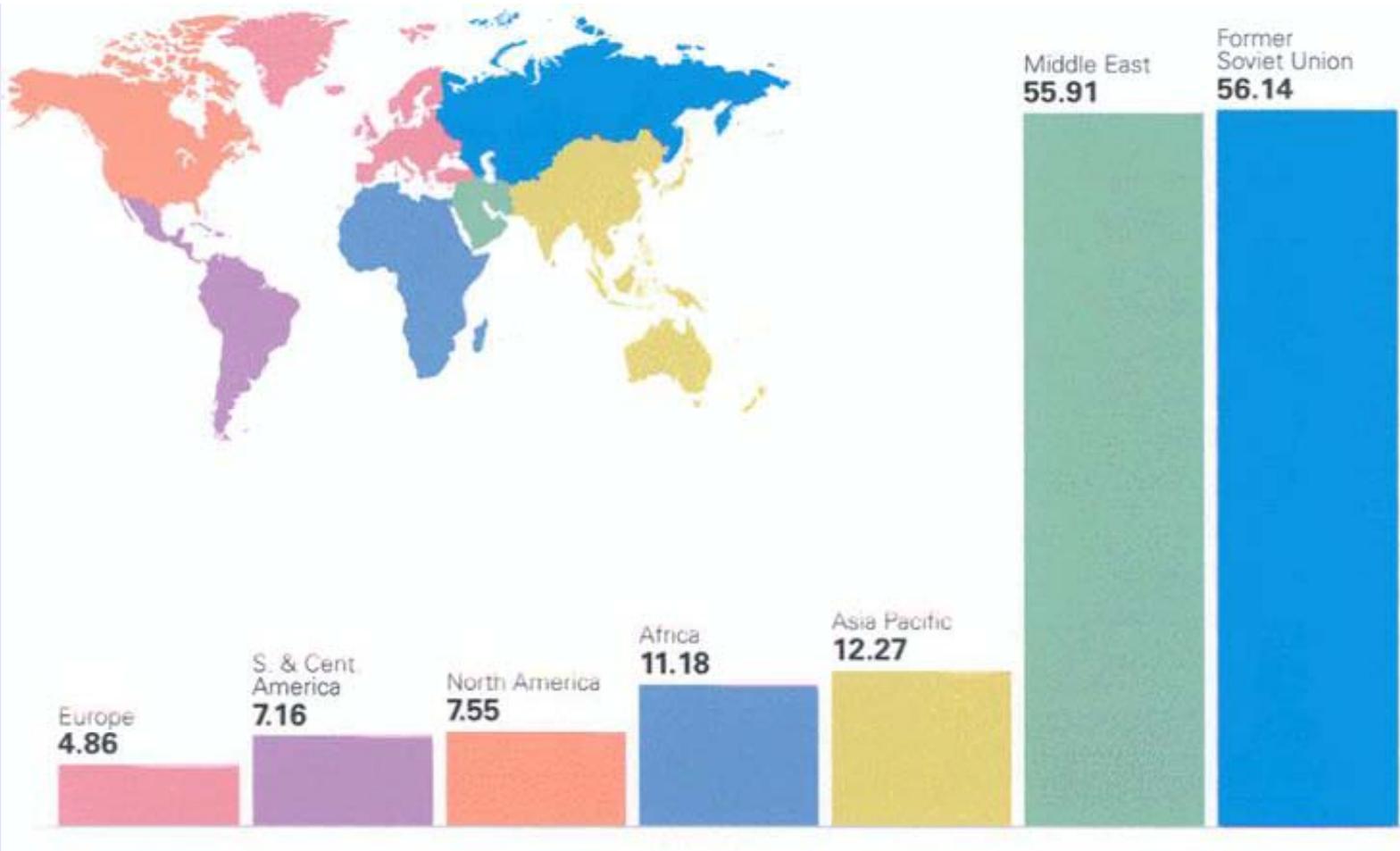
Quelle: BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, in: VGB, Zahlen zur Stromerzeugung 2007

Öl-Reserven in Gigabarrel (1 barrel \approx 159 l)



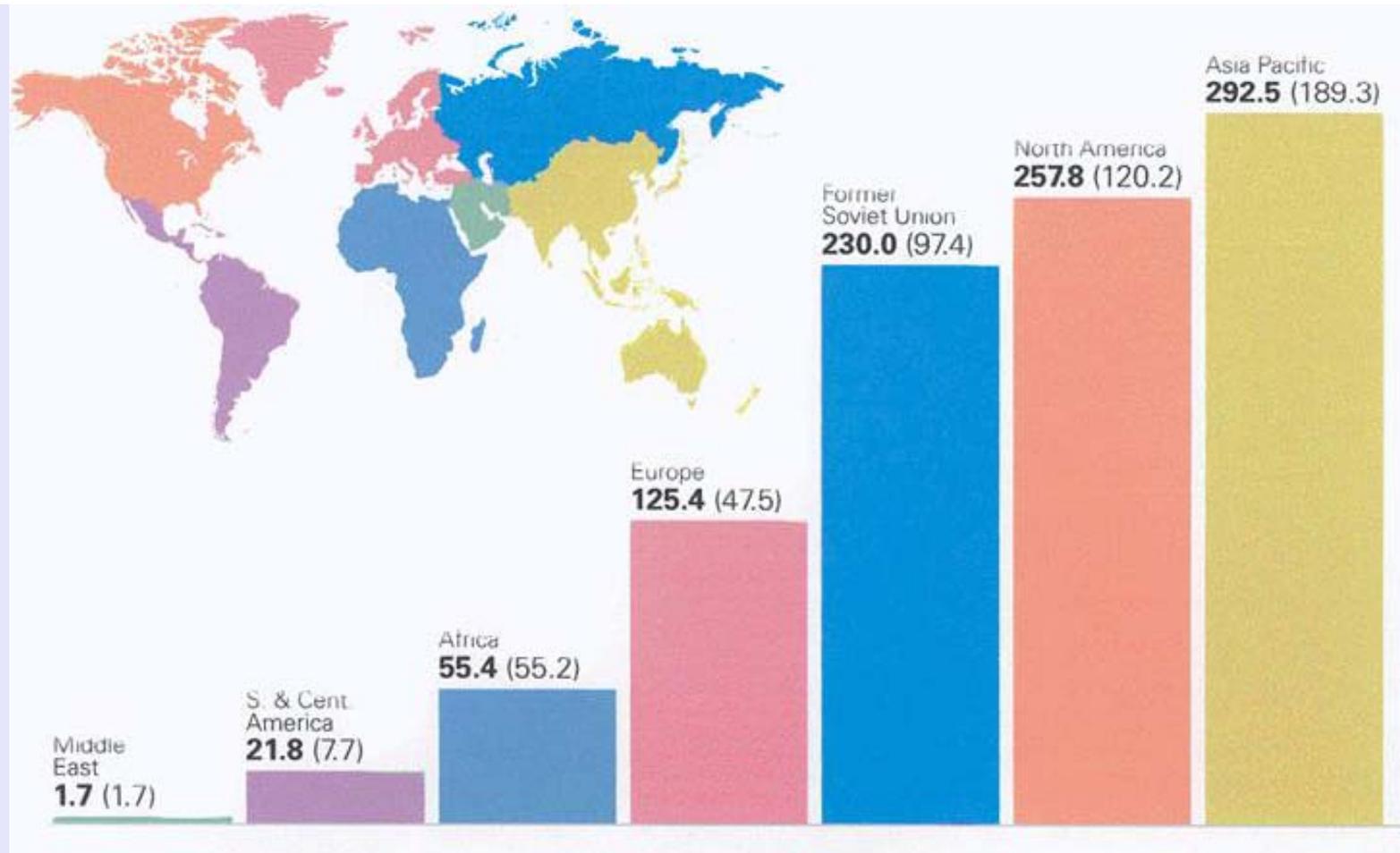
Quelle: BP Statistical Review of World Energy, 2002

Erdgas-Reserven in Terakubikmeter



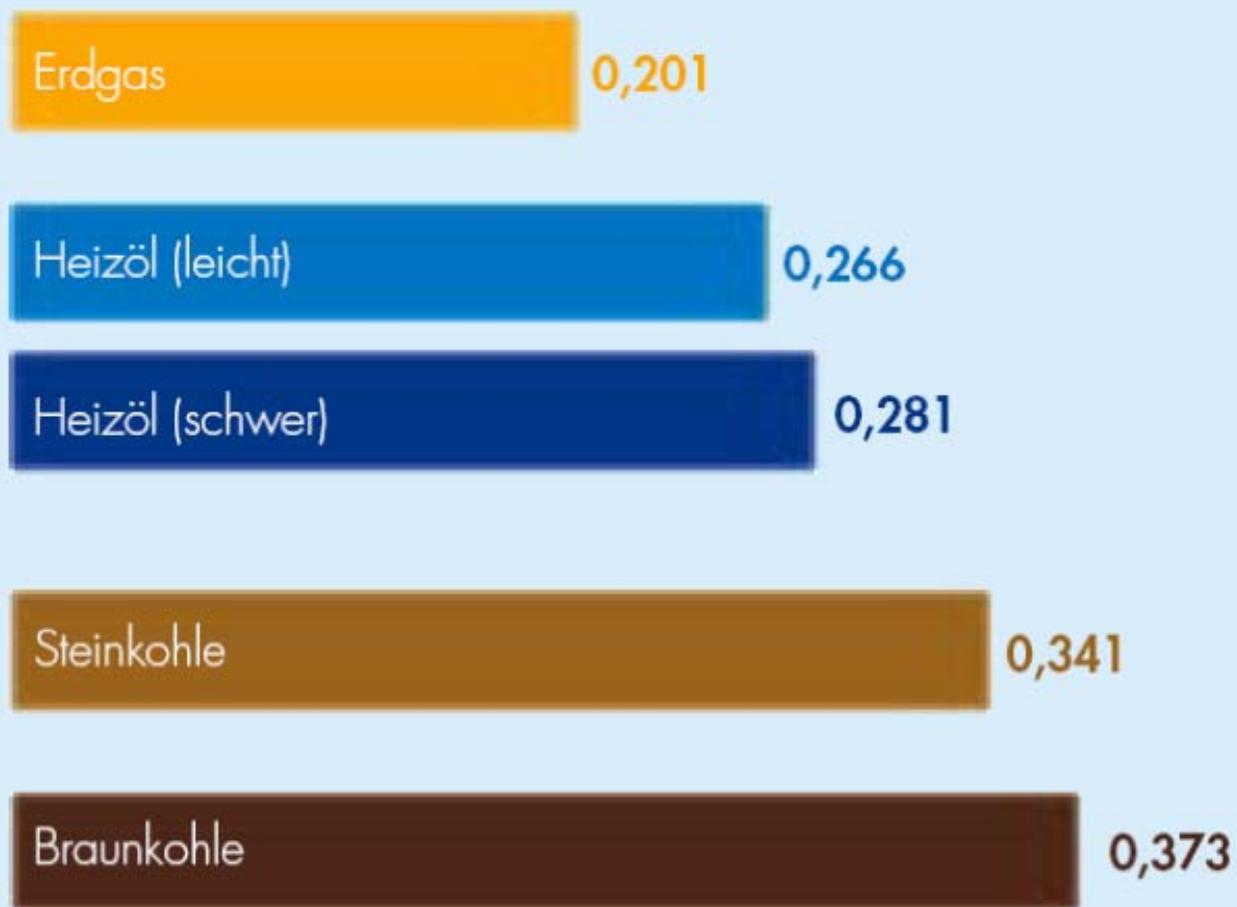
Quelle: BP Statistical Review of World Energy, 2002

Kohle-Reserven in Gigatonnen (Anteil der Steinkohle in Klammern)



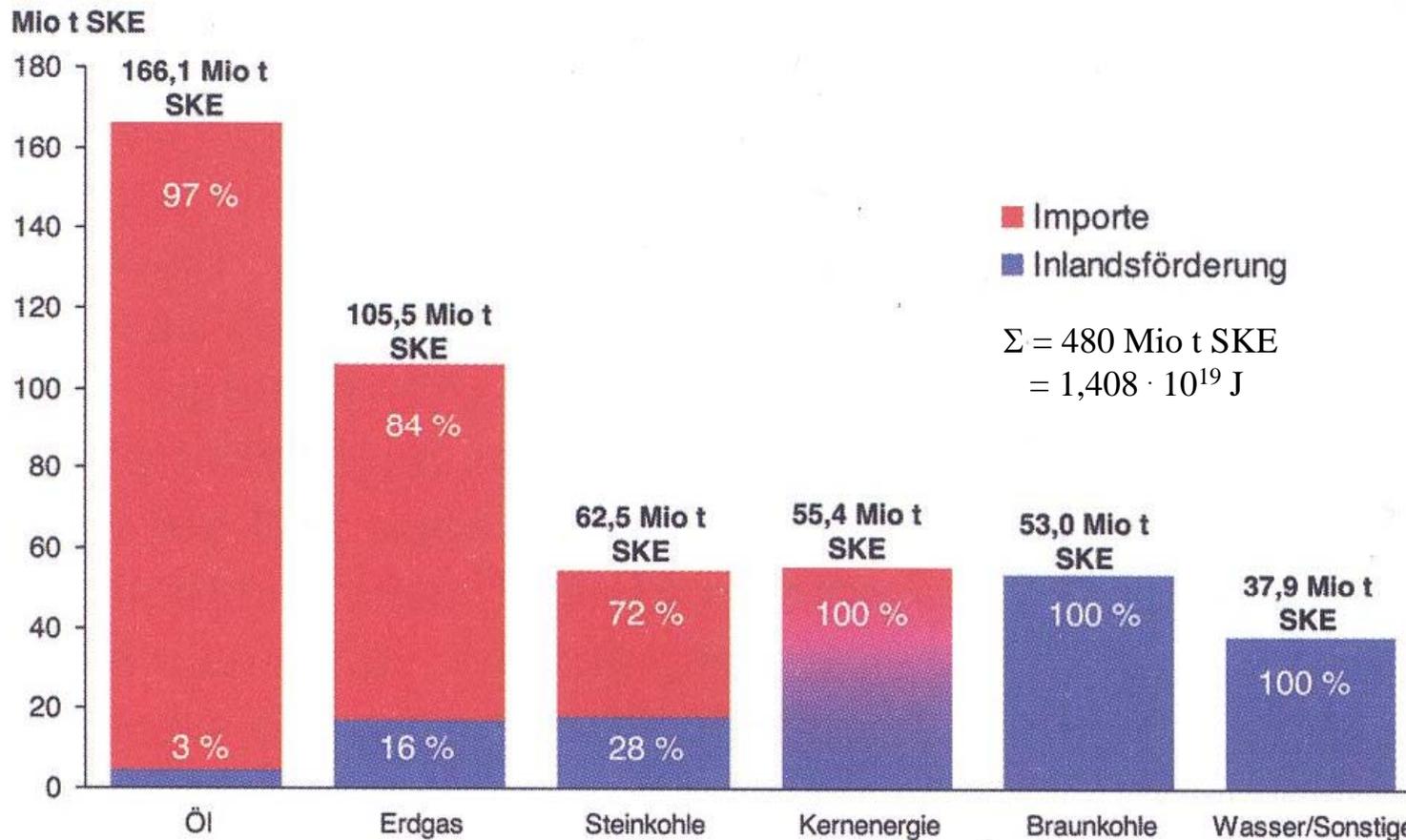
Quelle: BP Statistical Review of World Energy, 2002

CO₂-Emissionen fossiler Energieträger in kg/kWh (H_i)



Quelle: UBA / DEHST

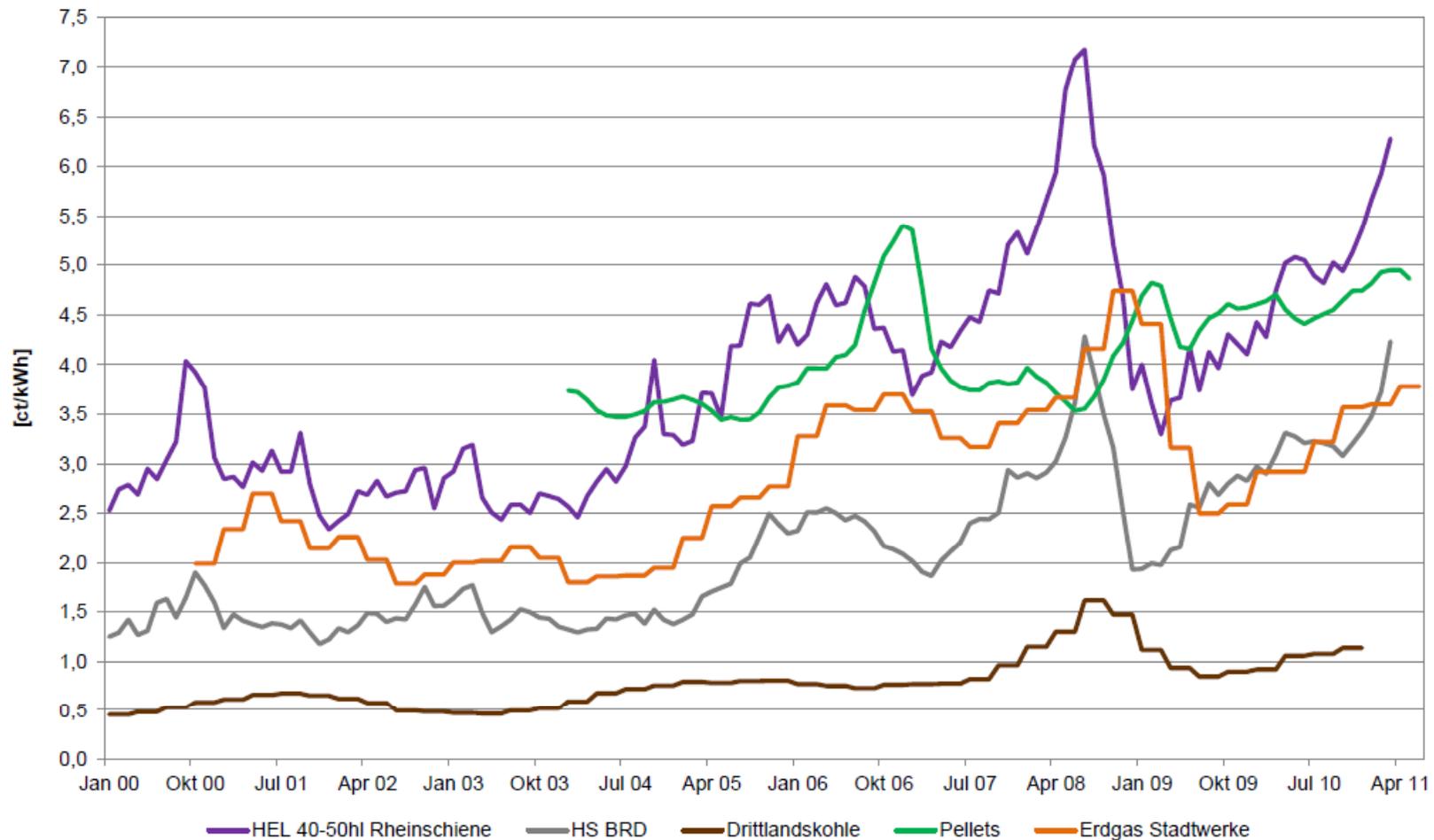
Primärenergieverbrauch Deutschlands und Abhängigkeit von Energieimporten im Jahr 2008



Quelle: Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen 02/2009 (Prozentzahlen als Anteile der jeweiligen Inlandsgewinnung am jeweiligen Primärenergieverbrauch errechnet)

Entwicklung der Brennstoffpreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland von 2000 bis 2011

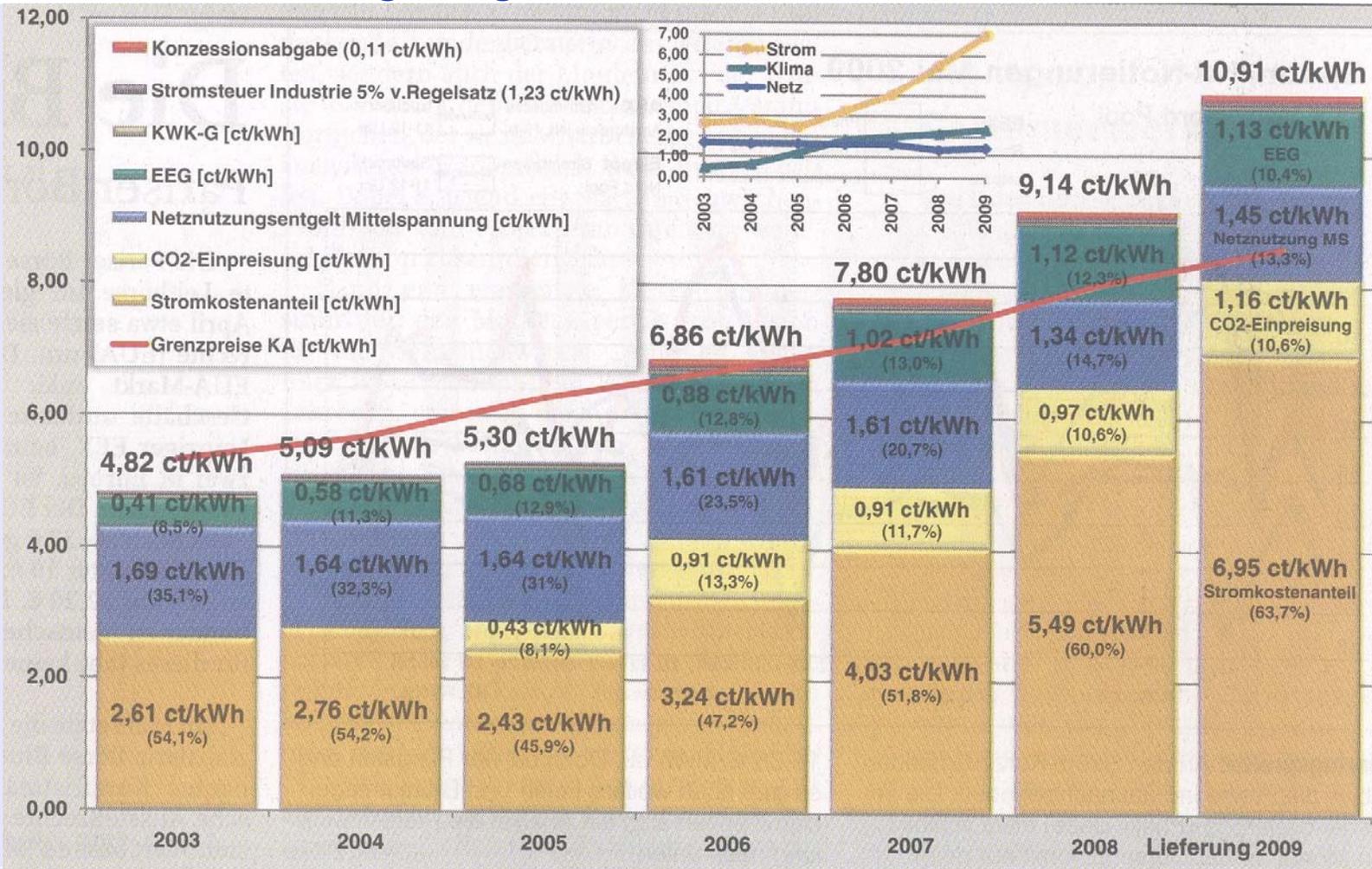
Nominale Preissteigerung in den letzten 10 Jahren: rund 8 %/a



Quelle: Mitteilung von ECOTEC, Meschede, April 2011

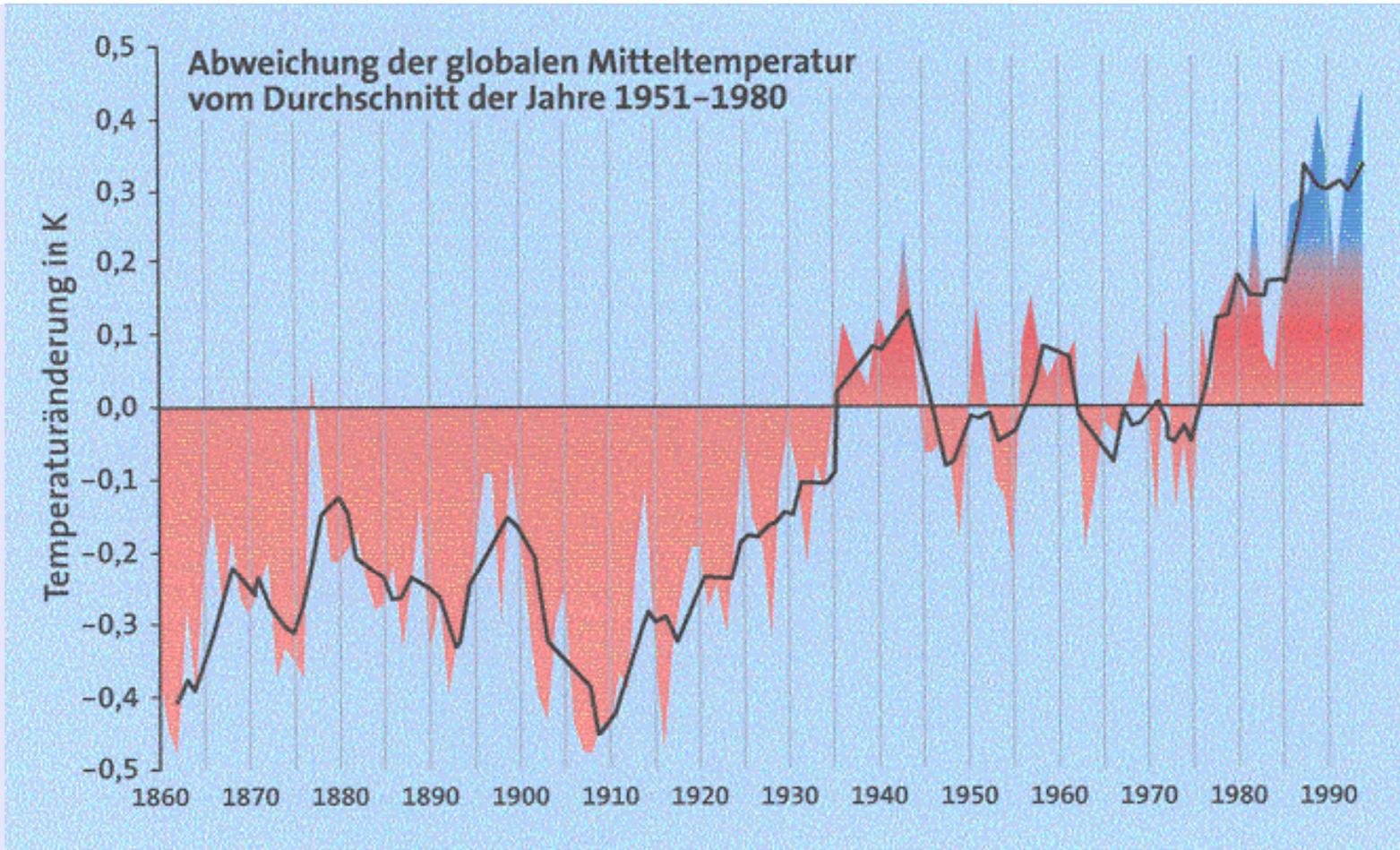
Entwicklung der Strompreise für Gewerbe- und Industriekunden in Deutschland von 2003 bis 2009

Nominale Preissteigerung in den letzten 10 Jahren: rund 8 %/a



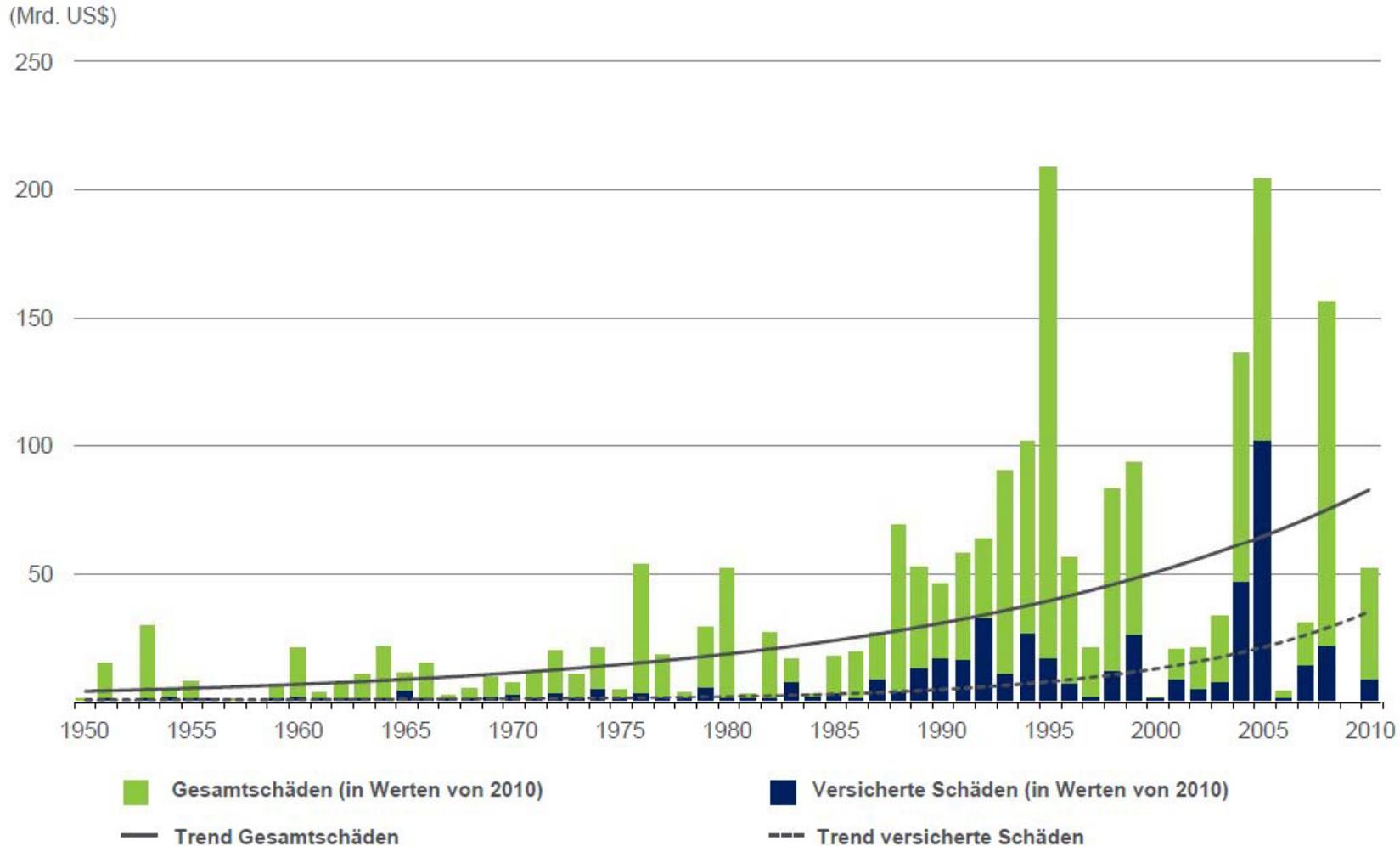
Quelle: ZfK, Juni 2009

Anstieg der globalen Mitteltemperatur



Quelle: Energien für das neue Jahrtausend, Studie von RAG und STEAG, 2002

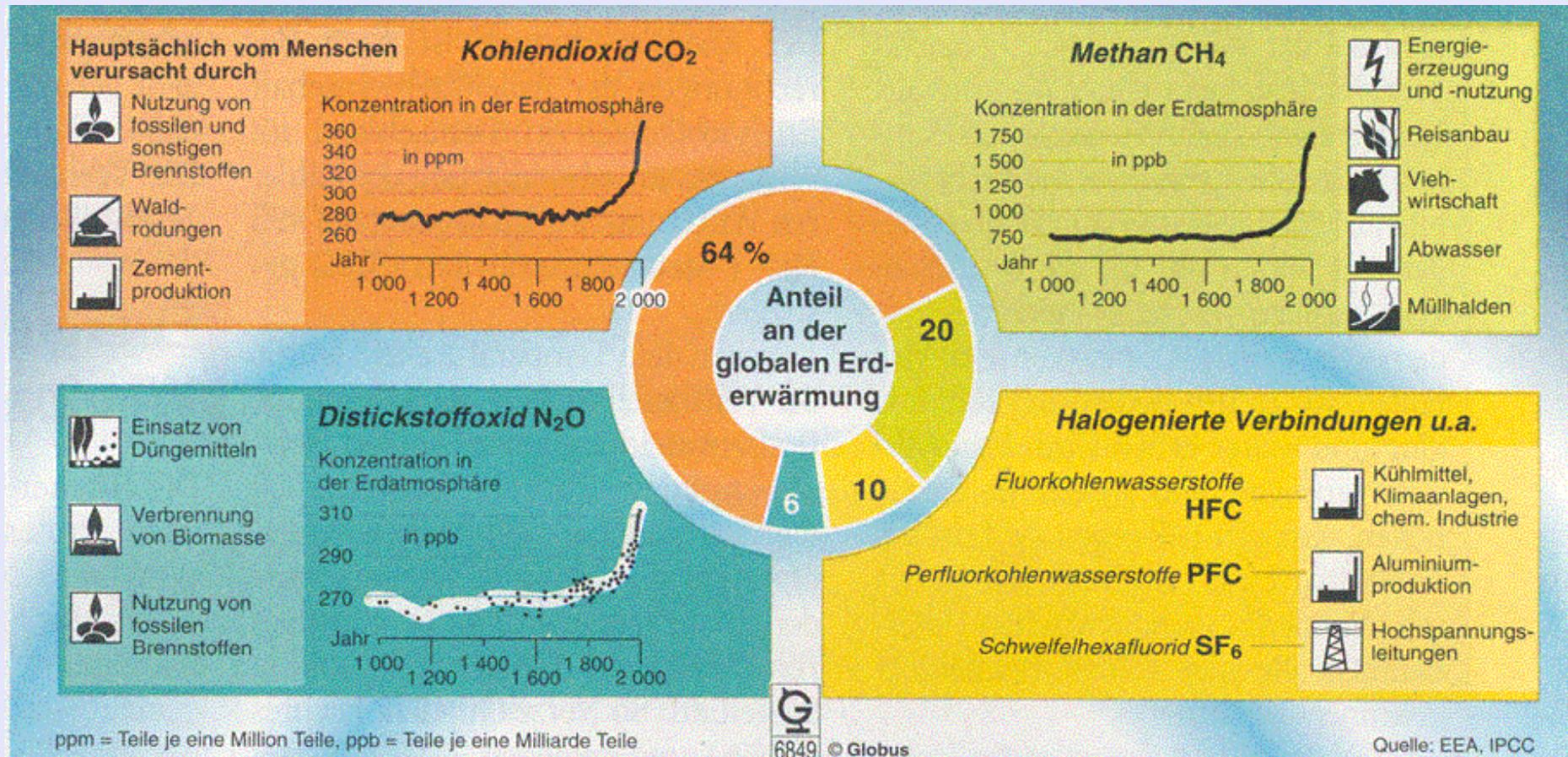
Volkswirtschaftliche und versicherte Schäden durch große Naturkatastrophen 1950 – 2010, weltweit



Quelle: Münchener Rück AG, 2011

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

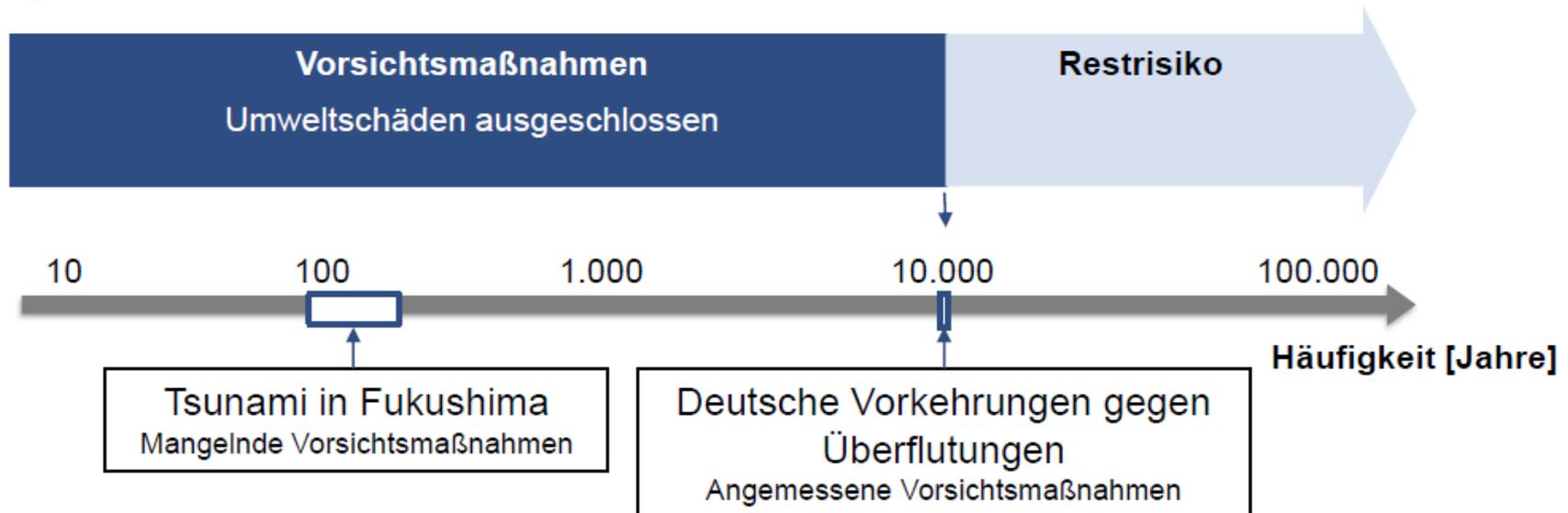
Anteile verschiedener Gase am Treibhauseffekt



Der Störfall im KKW Fukushima im März 2011 war Anlass für einen schnellen Ausstieg aus der Atomkraft in Deutschland

- > Das Unglück in Fukushima wurde durch einen Tsunami ausgelöst.
- > Tsunamis solchen Ausmaßes hätten in der Region Fukushima vorausgesehen werden müssen.
- > Folglich wiesen die beschädigten Kraftwerksteile erhebliche Mängel bei den Vorkehrungen gegen Auslegungstörfälle auf.

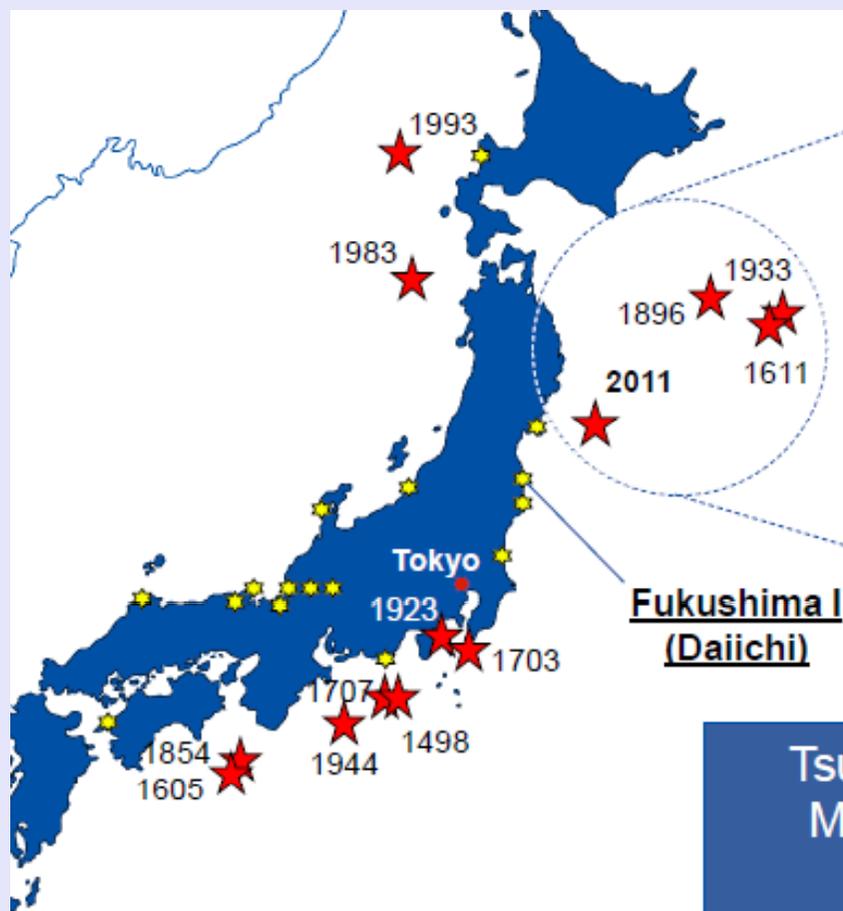
Der Unfall in Fukushima lag nicht im Bereich des Restrisikos!



Quelle: RWE AG, 2011

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Gewaltige Tsunamis sind an Japans Ostküste kein Einzelfall



Frühere Tsunamis an der Ostküste

Erdbeben	Max. Höhe [m]	Todesopfer
Sanriku 1611	25,0	5.000
Sanriku 1896	38,2	27.122
Sanriku 1933	29,0	3.022
Tohoku 2011	23,0	> 15.000

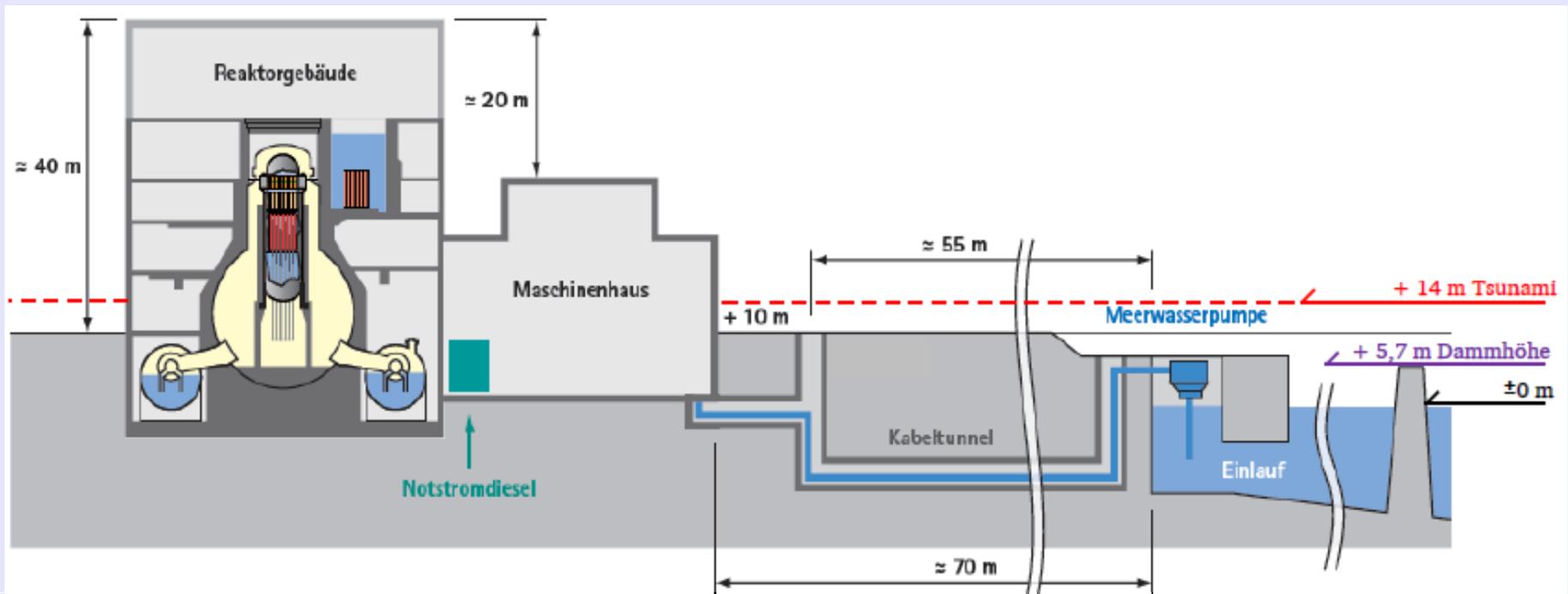
Tsunamis in einer Höhe von mehr als 10 Metern werden in Japan alle 30 Jahre beobachtet!

Quelle: RWE AG, 2011

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Auslöser der tragischen Ereignisse im KKW Fukushima waren das Tohoku-Beben und der folgende Tsunami

- Das Ausmaß des Tsunamis vom 11. März 2011 überstieg deutlich die Vorkehrungen gegen Auslegungsstörfälle.
- Die Betriebsanlagen wurden mehrere Meter überflutet.
- Der Ausfall der Notstromgeneratoren wurde durch eine Unterbrechung der Brennstoffzufuhr, der Luftversorgung oder durch Kurzschlüsse verursacht.



Quelle: RWE AG, 2011

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

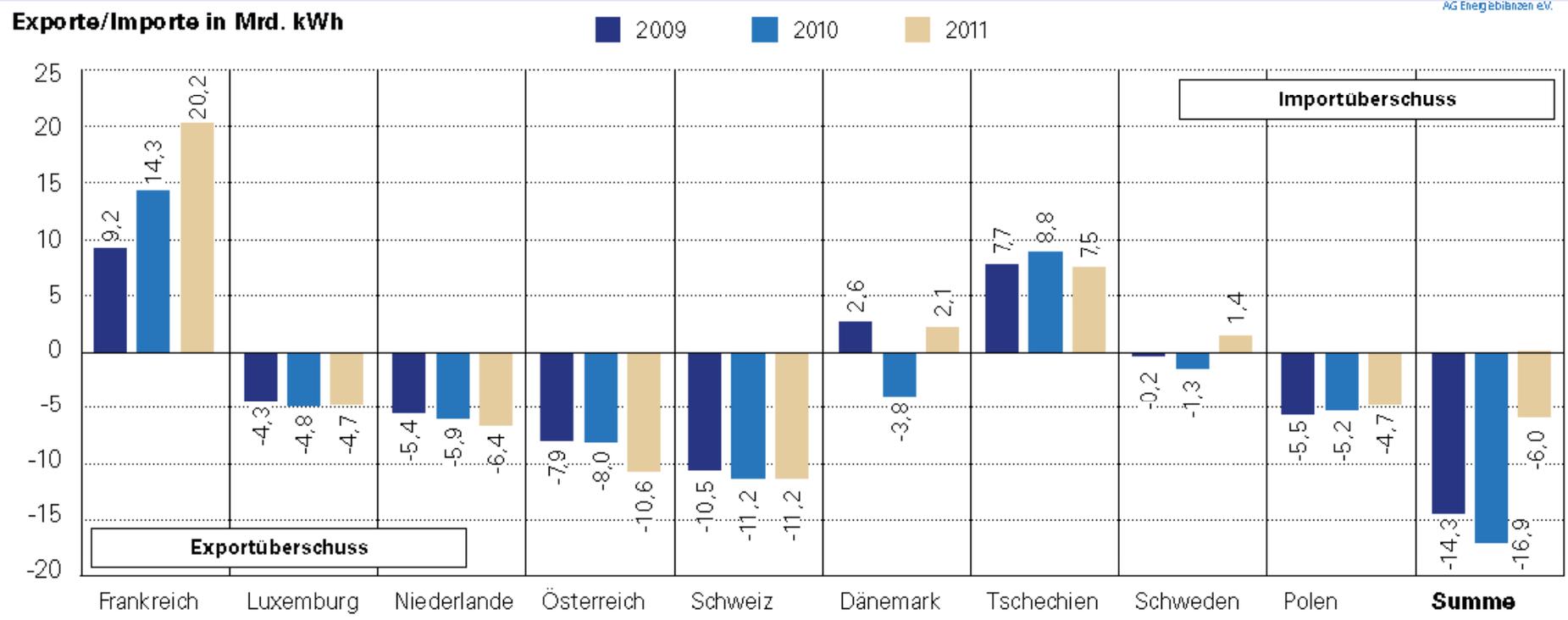
Flutung der Notstromdiesel des KKWs in Fukushima



Quelle: RWE AG, 2011

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Durch die Abschaltung der 7 ältesten Kernkraftwerke in 2011 ist der Strom-Exportüberschuss Deutschlands gesunken und es wurde vermehrt Atomstrom aus Frankreich importiert



Quelle: AG Energiebilanzen, 2012

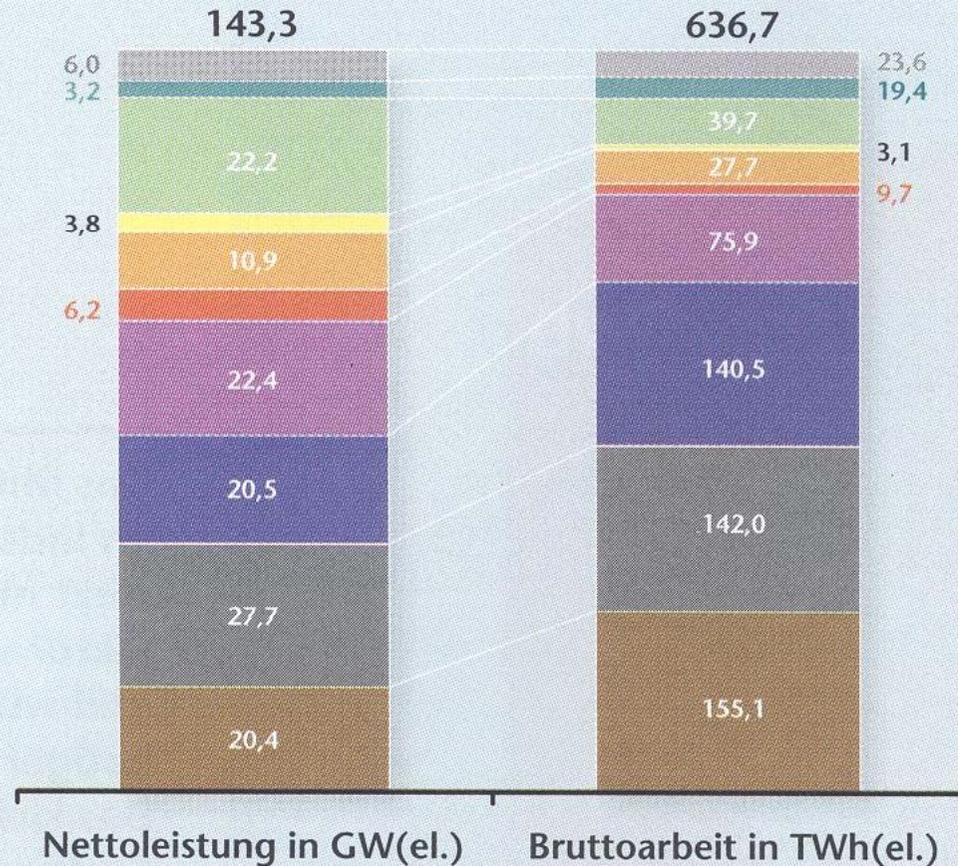
Die Abschaltung der 7 ältesten Kernkraftwerke hat den EEX-Terminmarkt für Strom nur kurzzeitig beeinflusst

Phelix-Base- und Phelix-Peakload-Year-Future in EUR/MWh



Installierte elektr. Leistung, Stromerzeugung und jährl. äquivalente Volllastbetriebsstunden der versch. Kraftwerkstypen in Deutschland im Jahr 2007

- Sonstige
- Biomasse
- Windenergie
- Photovoltaik
- Wasserkraft
- Heizöl
- Erdgas
- Kernenergie
- Steinkohle
- Braunkohle



Jährliche äquivalente Volllastbetriebsstunden

= jährliche Stromerzeugung / Nennleistung

Biomasse	6062 h/a
Windenergie	1788 h/a
Photovoltaik	816 h/a
Wasserkraft	2541 h/a
Heizöl	1565 h/a
Erdgas	3388 h/a
Kernenergie	6854 h/a
Steinkohle	5126 h/a
Braunkohle	7603 h/a

Quellen: BDEW, BMU, Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen, Stand 2007



Strategien für eine nachhaltige und wettbewerbsfähige Energieversorgung

- Verminderung des Nutzenergieverbrauches
- Erhöhung der Effizienz von Energiewandlung und -anwendung
- Vermehrte Nutzung erneuerbarer Energien
- Verstärkter Einsatz kohlenstoffarmer Energierohstoffe
- Rückhaltung und Speicherung von Kohlendioxid

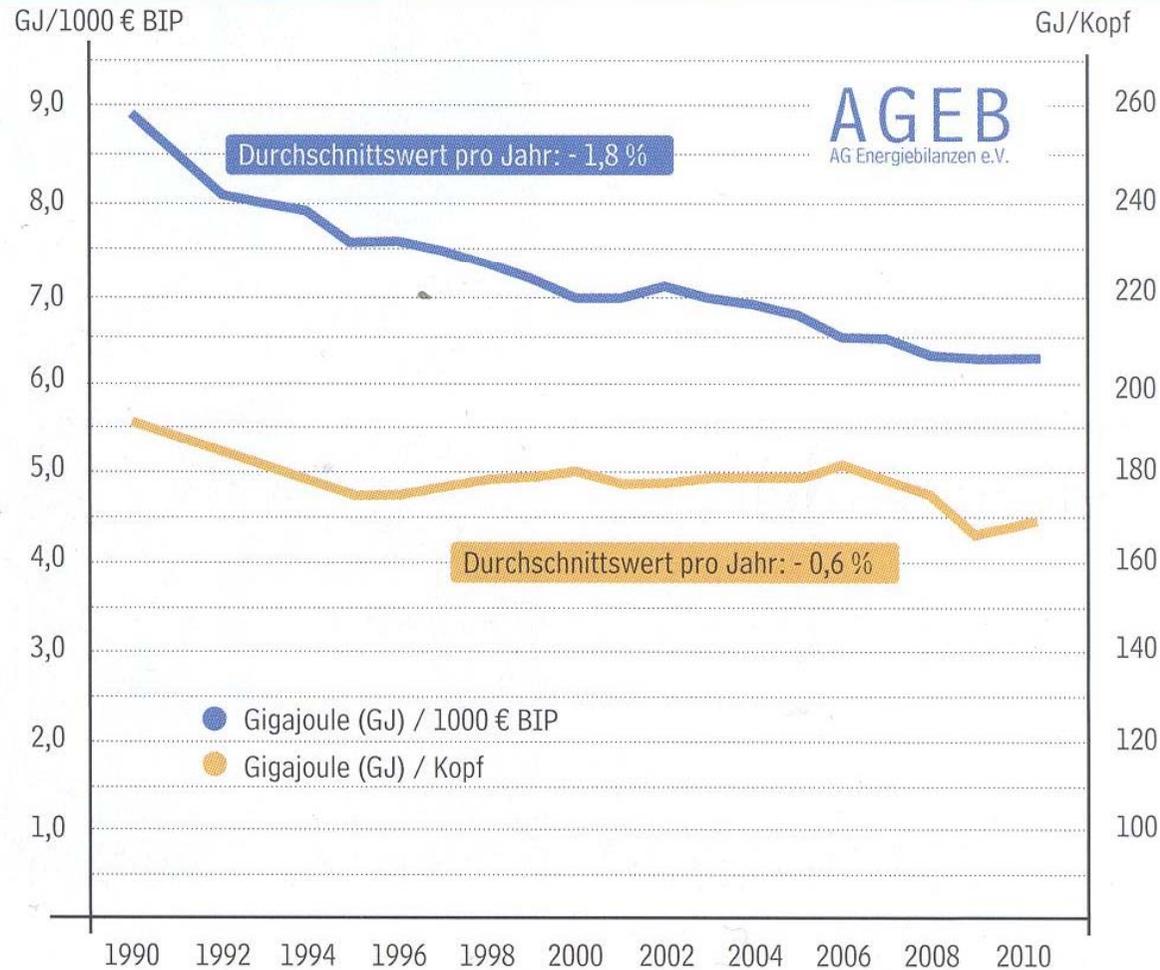
Magisches Dreieck der Energiepolitik

Umwelt / Nachhaltigkeit

**Wettbewerbsfähigkeit
/ Markt**

**Versorgungssicherheit
/ Geopolitik**

Entwicklung der gesamtwirtschaftlichen Energieeffizienz in Deutschland von 1990 bis 2010



Quelle: BWK Bd. 63 (2012) Nr. 1/2

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Erdgas-GUD-Kraftwerk Irsching

Block 4, Neubau 2011, 578 MW_{el}, Wirkungsgrad 60,75 %, CO₂ 330 g/kWh_{el}



Bild: Siemens AG

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Steinkohlekraftwerk Westfalen (Hamm-Uentrop)

Block D und E, Neubau 2011, 2 x 765 MWel, Wirkungsgrad > 46%,
Dampfzustände FD 285 bar / 600 °C, ZÜ 62 bar / 610 °C

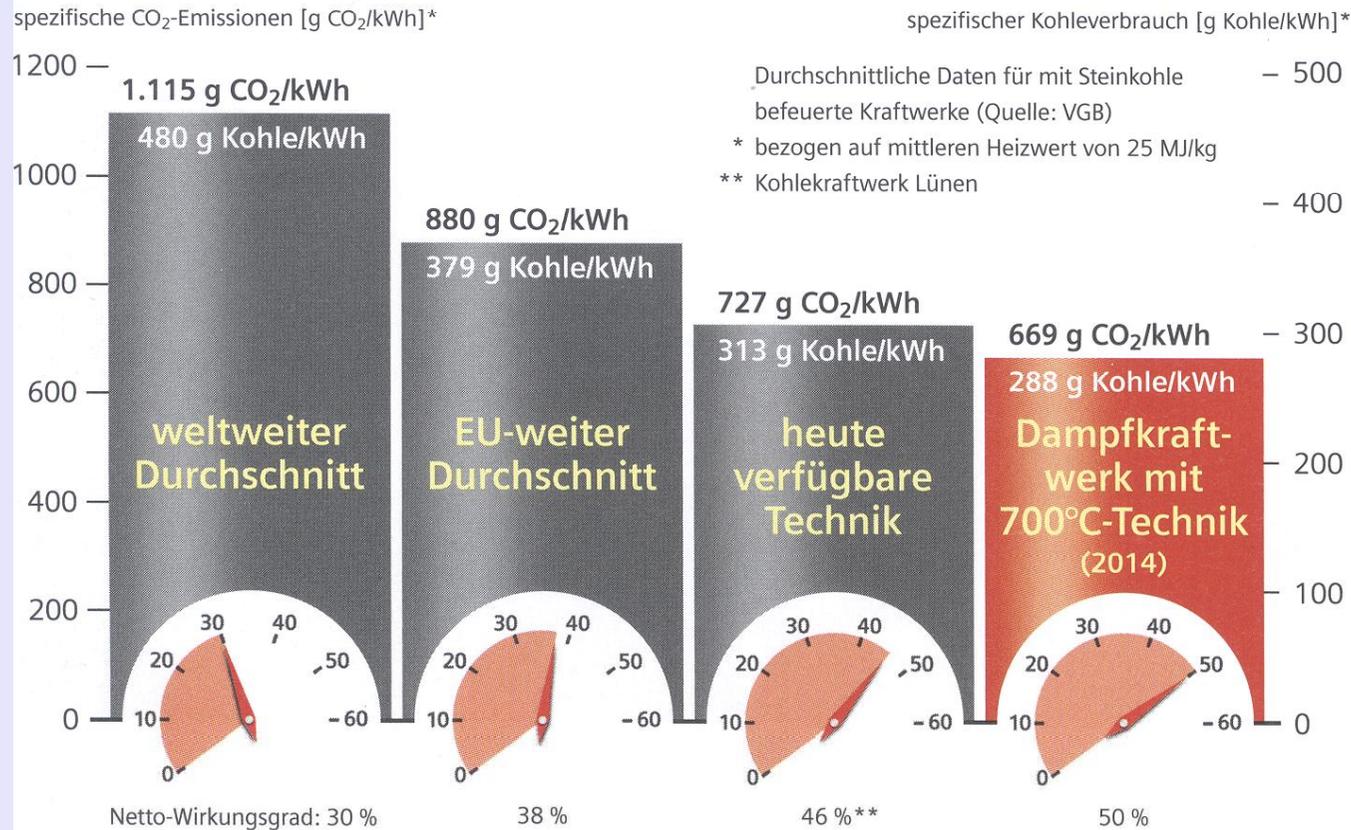


Bild: RWE

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Spezifische CO₂-Emissionen steinkohlebefeuerteter Dampfkraftwerke

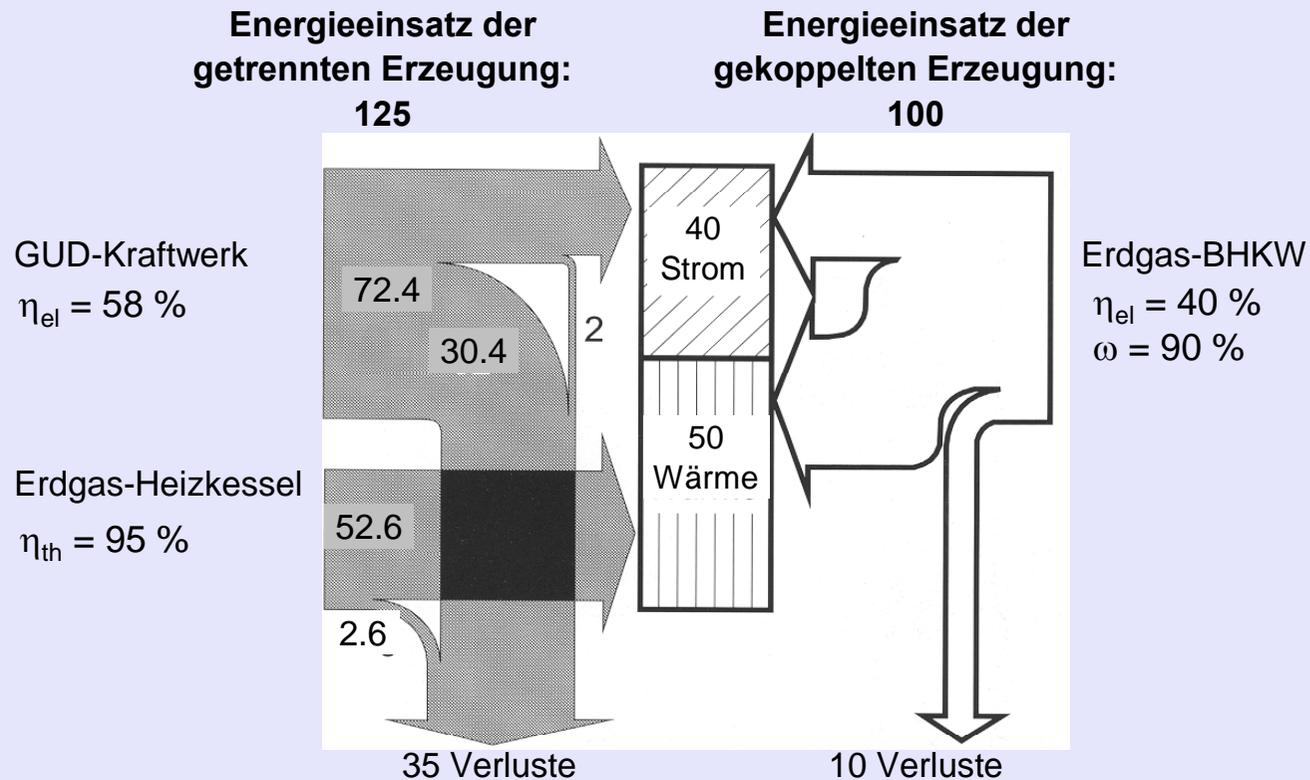
Effizienzgewinn bei Kohlekraftwerken



Klimafreundlich: Mit steigendem Wirkungsgrad sinken der Kohleverbrauch und die CO₂-Emissionen.

Quelle: Siemens AG, Pictures of the Future, Frühjahr 2008

Primärenergieeinsparung durch Kraft-Wärme-Kopplung am Beispiel eines Blockheizkraftwerkes (BHKW)



⇒ **Primärenergieeinsparung: $(125 - 100) / 125 = 20\%$**



Studie über den Einsatz eines BHKWs am Standort Soest der FH Südwestfalen

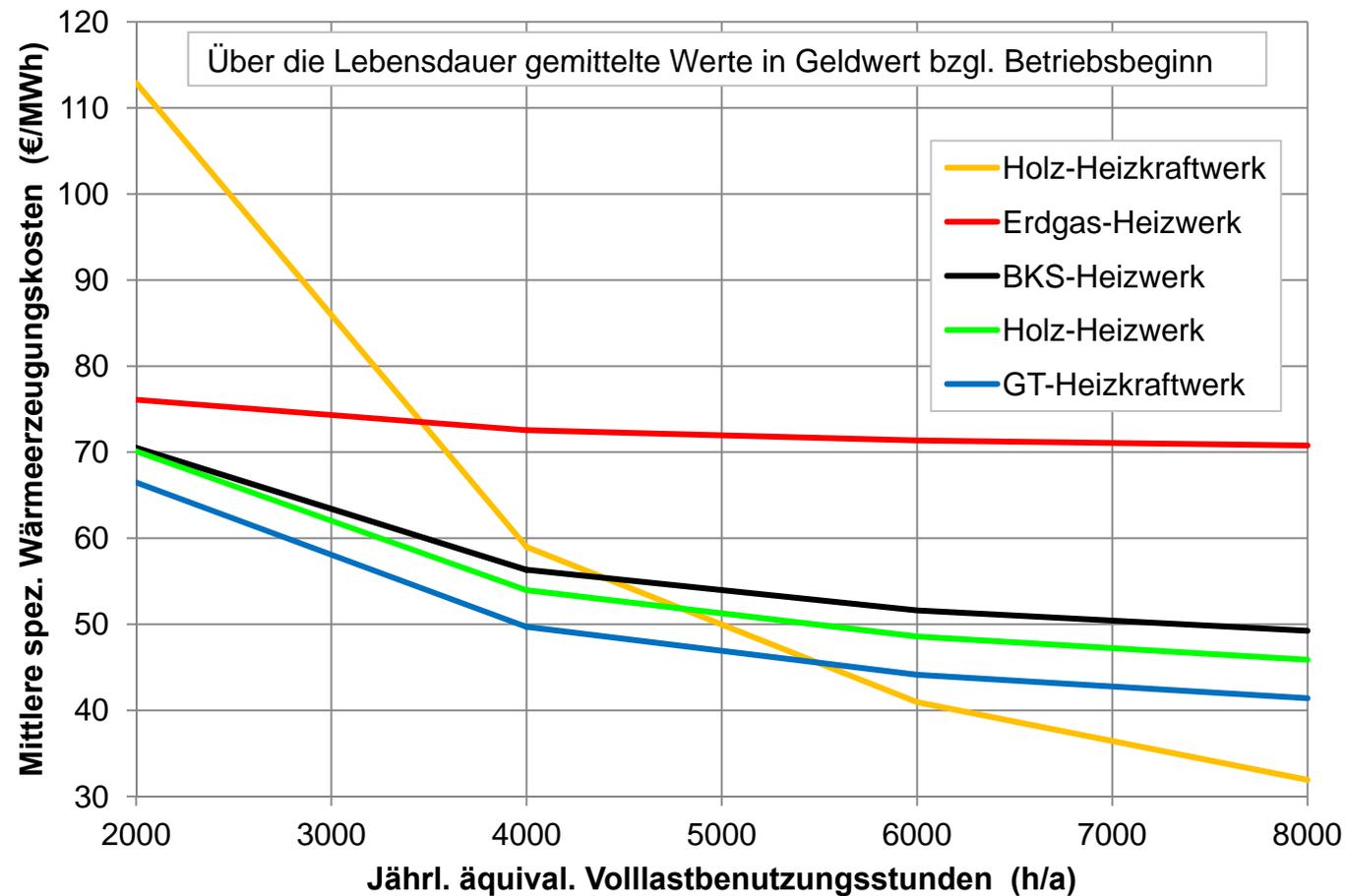
Daten des Blockheizkraftwerkes

- elektr. Leistung: 50 kW
- Wärmeleistung: 82 kW
- elektr. Wirkungsgrad: 34 %
- Gesamtwirkungsgrad: 90 %
- Gesamtinvestition: 100 000 €

Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsrechnung

- Amortisationszeit: 6 Jahre
- Kumulierter Kostenvorteil nach 15 Jahren Laufzeit: 200 000 €
- Reduktion der CO₂-Emissionen: 84 t/a

Studie über die optimale Energieversorgung eines Industriebetriebs (Feuerungsleistung 10 MW – 20 MW)



Zukunftstechnologie Brennstoffzelle

(Bsp.: MCFC, $P = 345 \text{ kW}_{el}$, $Q = 230 \text{ kW}_{th}$, $\eta = 47 \%$, $\omega = 87 \%$)

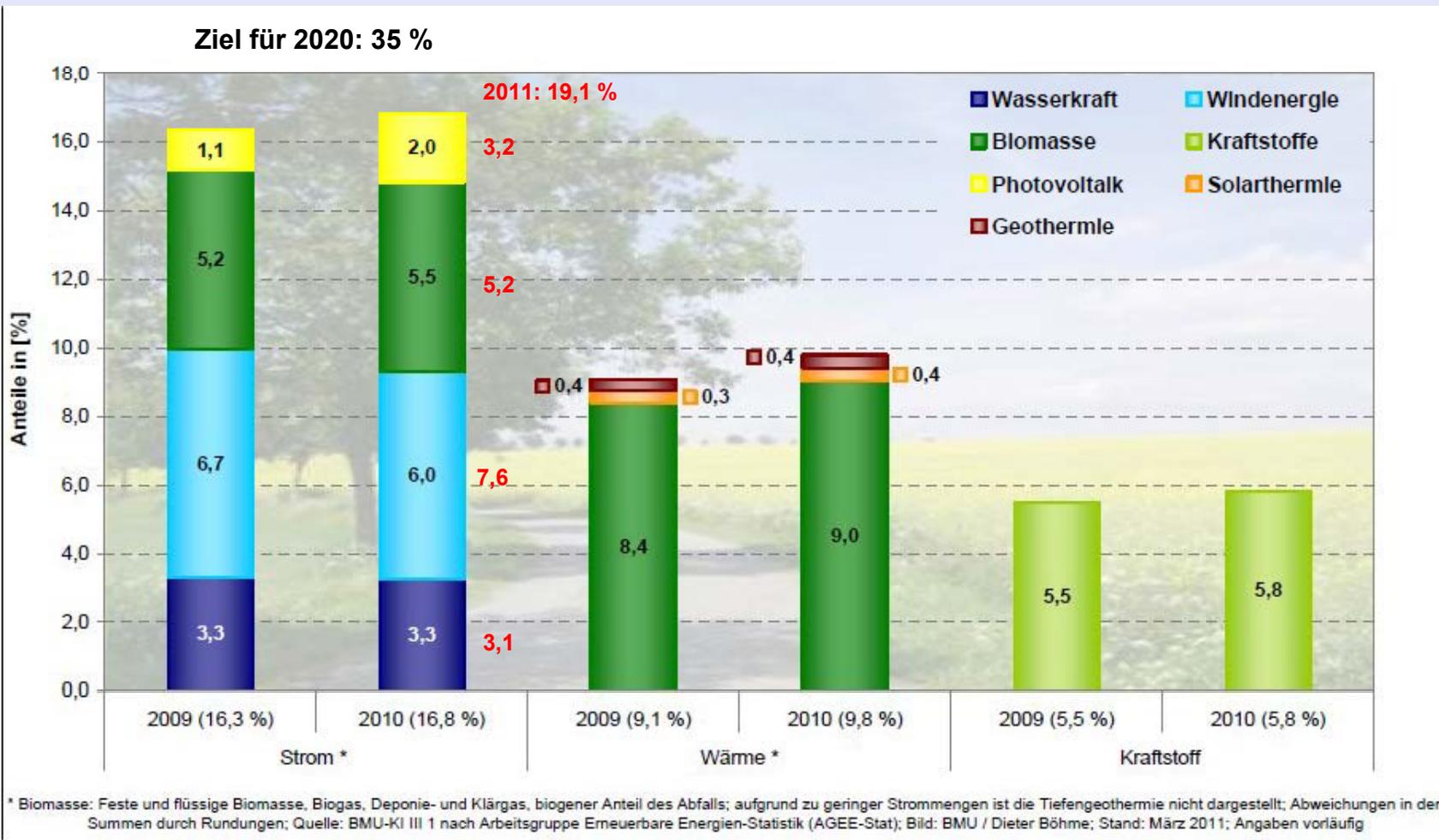


Einstellung der Geschäftstätigkeit des Brennstoffzellenbereichs von Tognum Ende 2011

Flächenbedarf in der Sahara für die Erzeugung der benötigten Nutzenergie aus Solarenergie



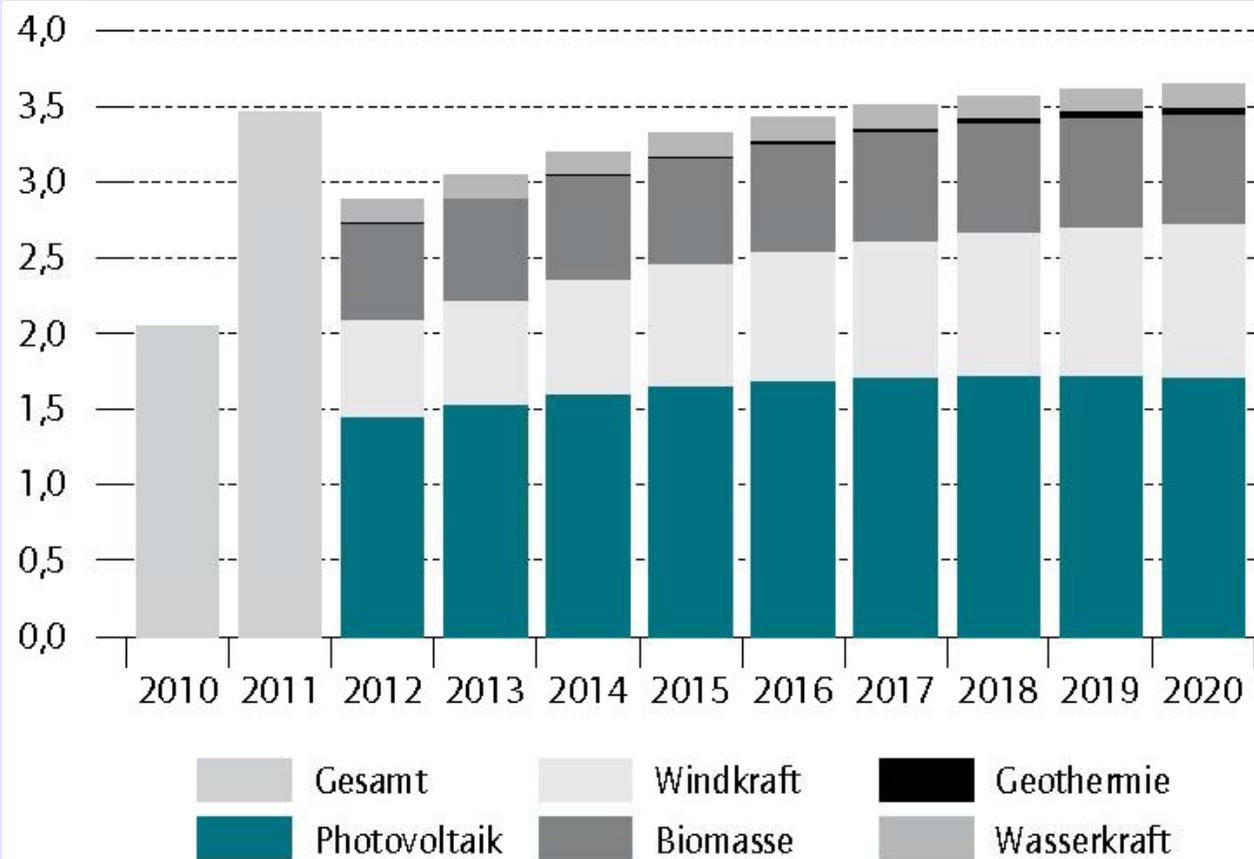
Anteile erneuerbarer Energien am Endenergieverbrauch in Deutschland 2009/2010



Quelle: BMU, Erneuerbare Energien 2010

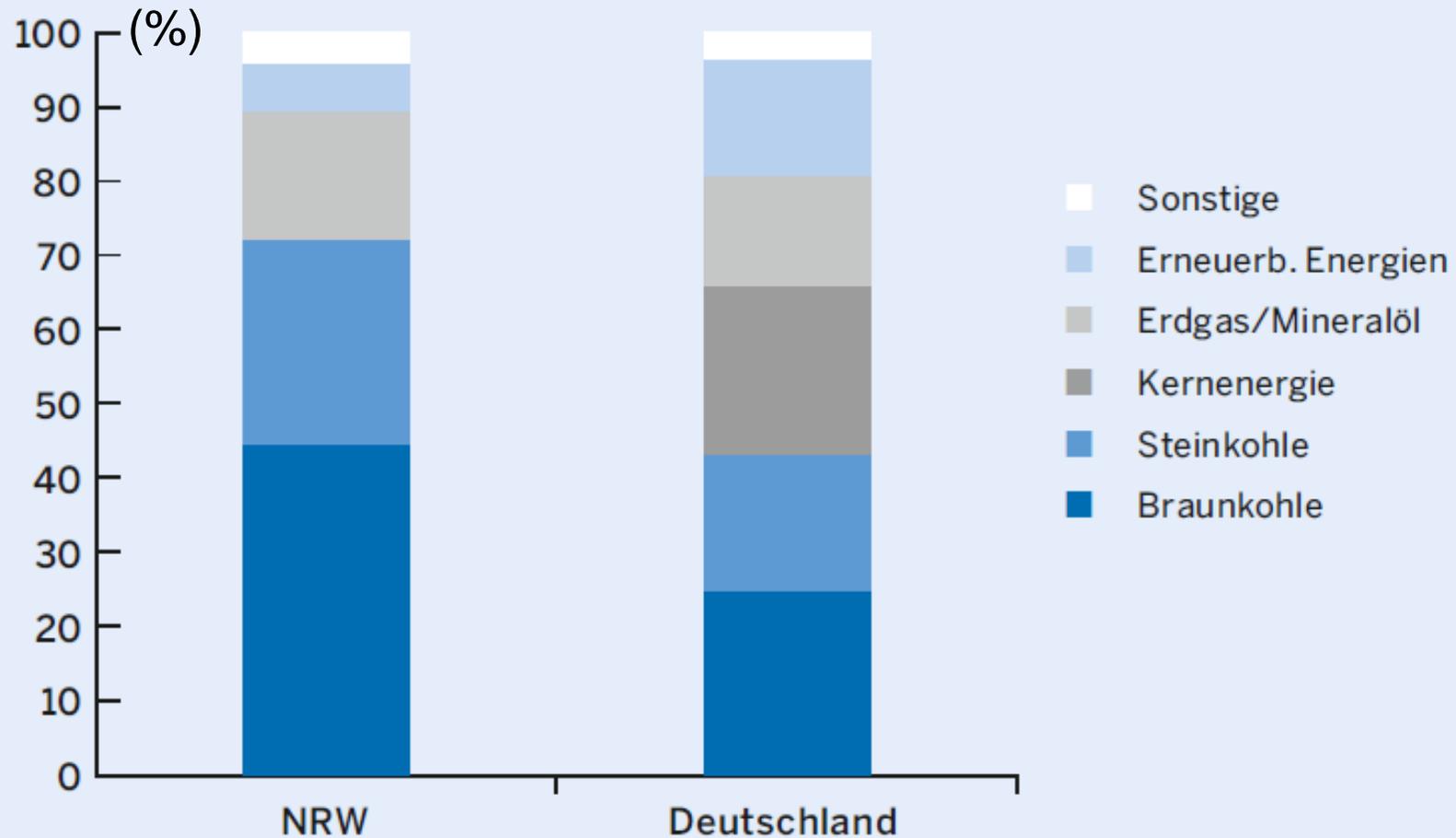
Entwicklung der EEG-Umlage 2010 und 2011 sowie Vorausschätzung bis 2020

Cent pro kWh, inflationsbereinigt



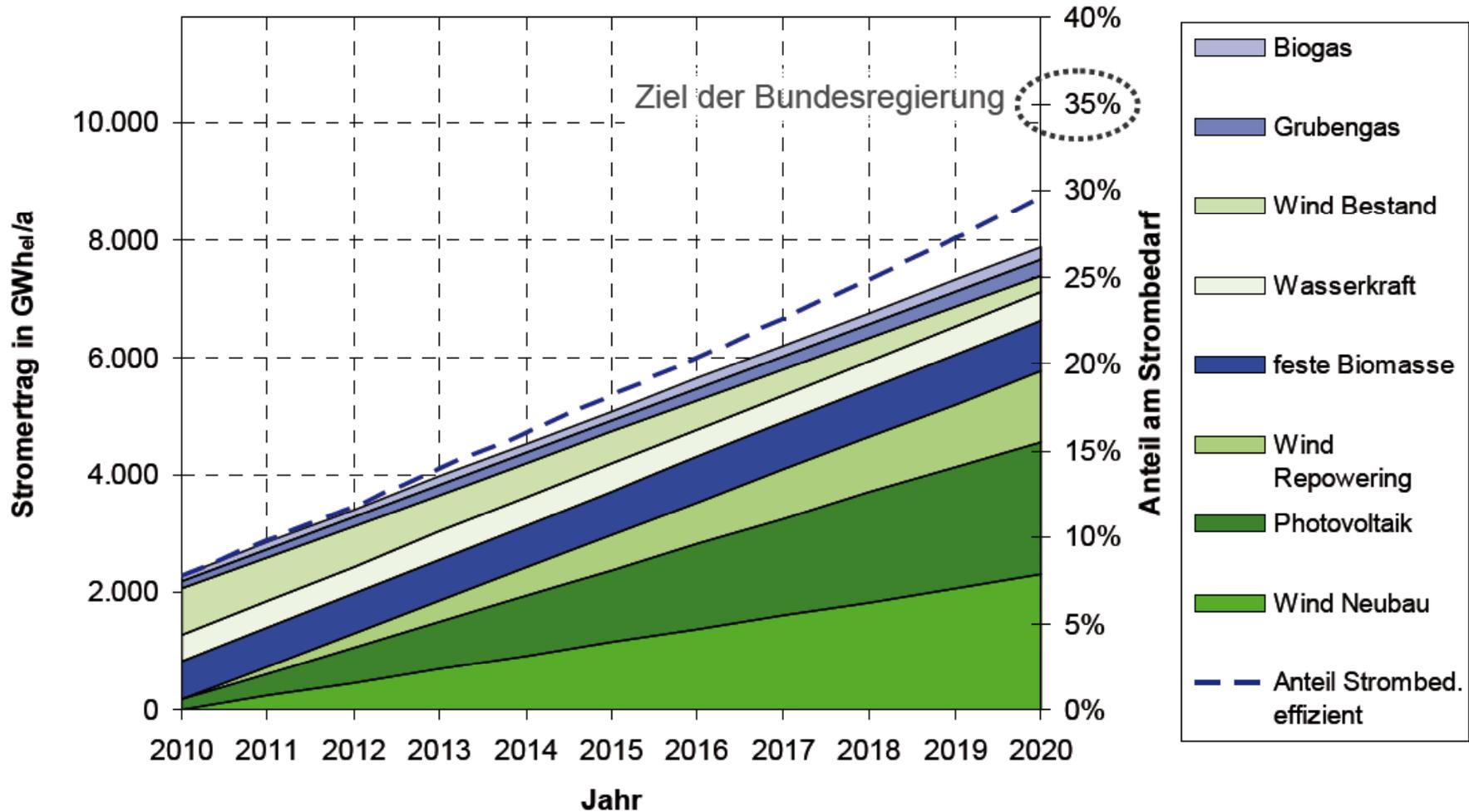
Quellen: Übertragungsnetzbetreiber (für 2010 und 2011); Berechnungen des DIW Berlin (für 2012 bis 2020).

Struktur der Stromerzeugung in NRW und Deutschland im Jahr 2009



Quelle: EnergieAgentur.NRW, 2011

Beitrag und Ausbau der erneuerbaren Energieträger zur Stromerzeugung im Regierungsbezirk Arnsberg

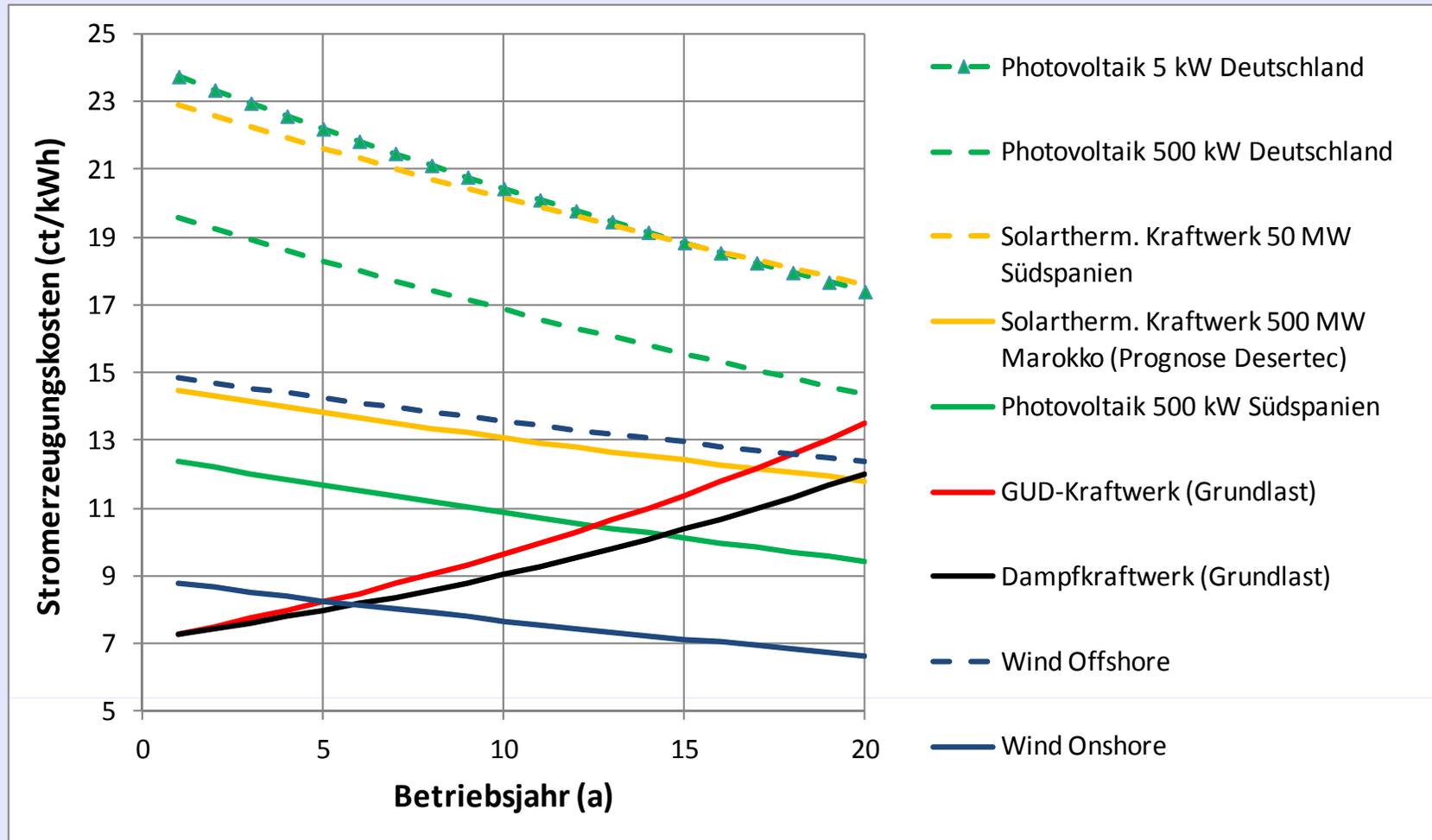


Quelle: Studie von Siemens für die Bezirksregierung Arnsberg, 2011

Wirtschaftlichkeit und Verfügbarkeit verschiedener Kraftwerkstypen (Neubau 2012)

Kraftwerkstyp	Elektr. Leistung (MW)	Elektr. Wirkungsgrad (%)	Spez. Investition (€/kW)	Äquival. Volllaststunden (h/a)	Nutzungsdauer (a)	Kapitalkosten (ct/kWh)	Brennstoffkosten (ct/kWh-H _i)	CO ₂ -Kosten (30 €/t CO ₂) (ct/kWh-el)	Kosten f. Betrieb u. Wartung (ct/kWh)	Stromerzeugungskosten 1. J. (ct/kWh)
GUD-Kraftwerk (Erdgas)	800	60	750	4000 - 7500	25	0,8 - 1,5	3,0	1,0	0,5	7,3 - 8,0
Dampfkraftwerk (Steinkohle)	800	46	1500	4000 - 7500	30	1,5 - 2,7	1,2	2,2	1,0	7,3 - 8,6
Wind Onshore	3		1400	1800	20	6,8			2,0	8,8
Wind Offshore	5		3600	4000	20	7,8			7,0	14,8
Photovoltaik										
Deutschland	0,005		2200	850	25	20,2			3,5	23,7
Deutschland	0,5		1800	850	25	16,6			3,0	19,6
Südspanien	0,5		1800	1500	25	9,4			3,0	12,4
Solarthermisches Kraftwerk mit Speicher										
Südspanien	50		8000	3700	25	16,9			6,0	22,9
Marokko (Prognose Desertec)	500		4000	3700	25	8,5			6,0	14,5

Inflationsbereinigter Verlauf der Stromerzeugungskosten verschiedener Kraftwerkstypen (Neubau 2012)



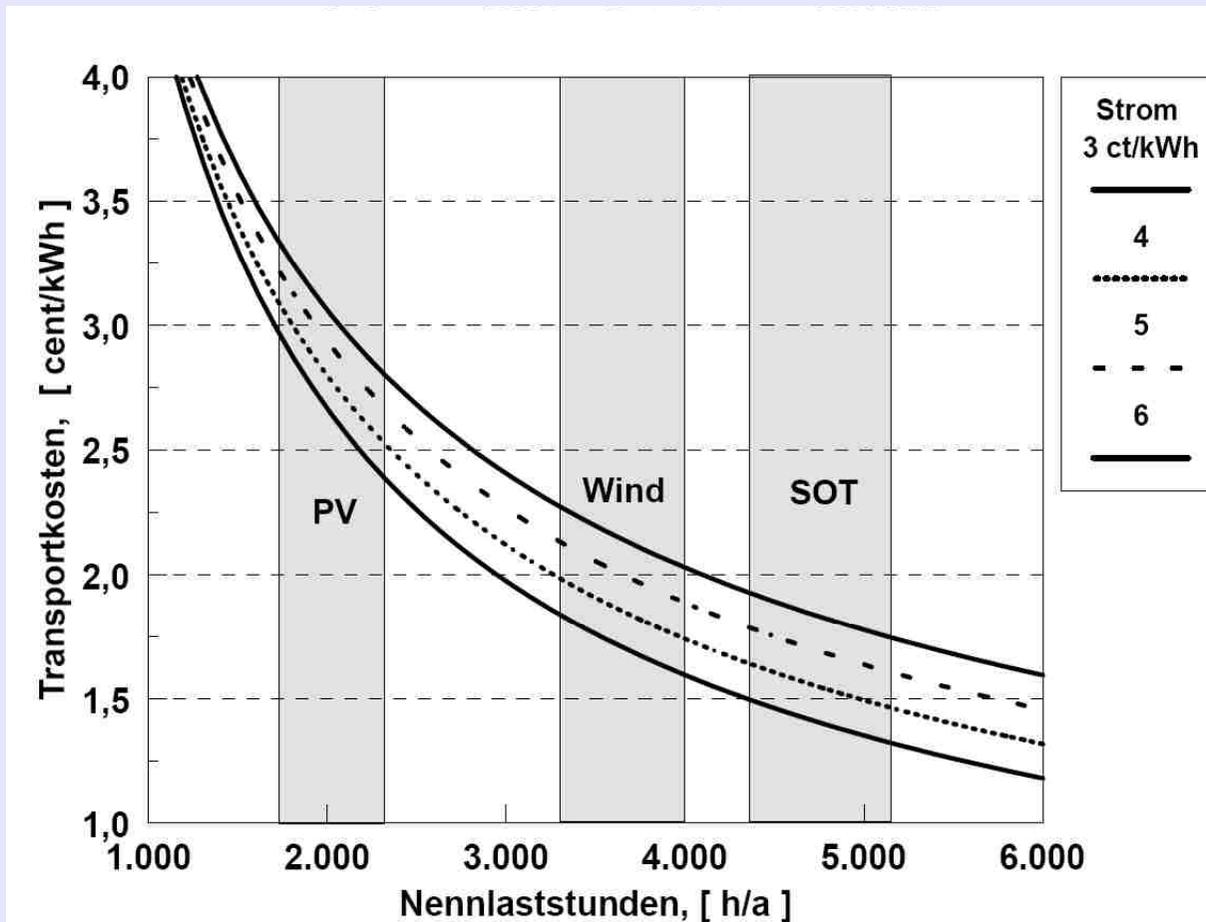
Die fluktuierende Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien erfordert Maßnahmen zur Verstärkung

- **Weiträumiger Ausbau der Stromnetze von Skandinavien bis zum Mittelmeer, um Windenergie, Wasserkraft und Solarenergie verbinden zu können**
- **Bau von Stromspeichern**
- **Bau von flexiblen Gas- und Kohle-Kraftwerken mit hohen zulässigen Laständerungsgeschwindigkeiten und kurzen Startzeiten**
- **Speicherung von Strom in Elektrofahrzeugen (notw. Voraussetzung: Smart Grid)**
- **Ausbau von Smart Grid und Smart Home, um den Stromverbrauch in Abhängigkeit von der Stromerzeugung steuern zu können**

Vernetzung der erneuerbaren Energien zur Kompensation der fluktuierenden Stromerzeugung



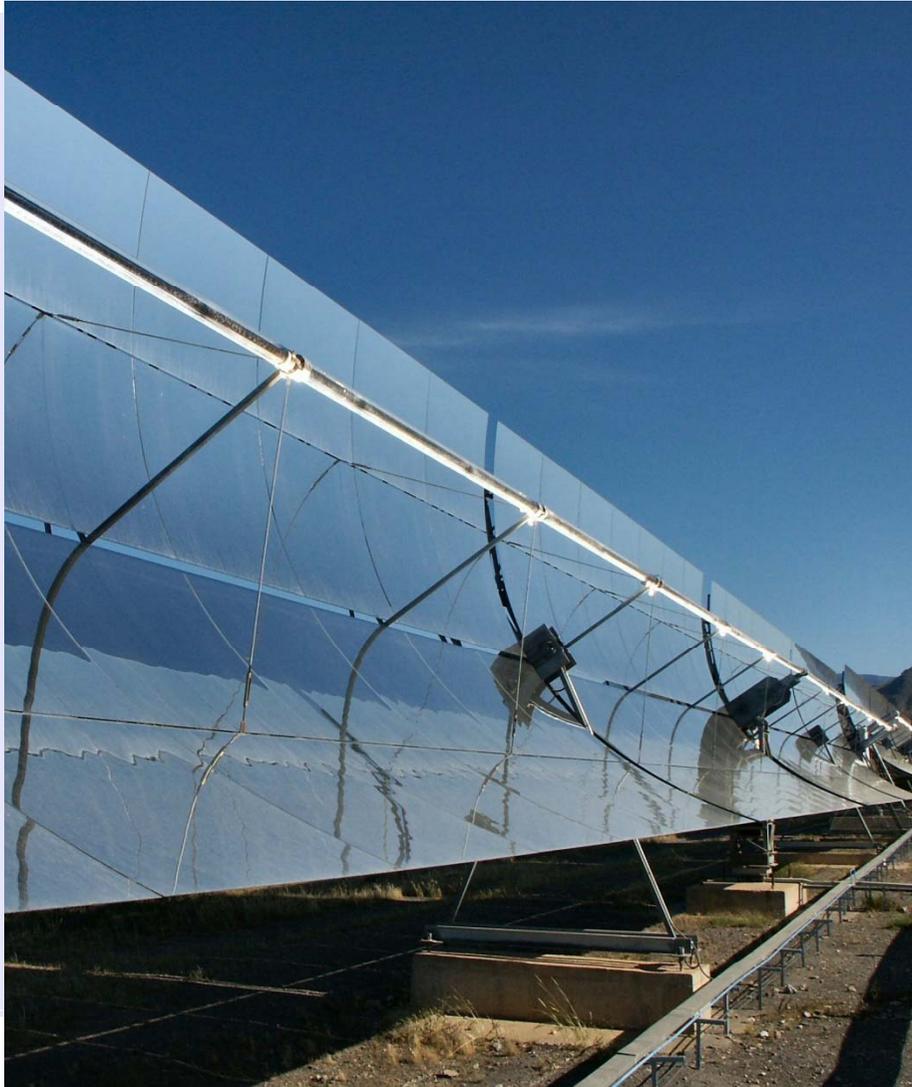
Stromtransportkosten einer Hochspannungsgleichstromübertragung mit 3000 km Entfernung



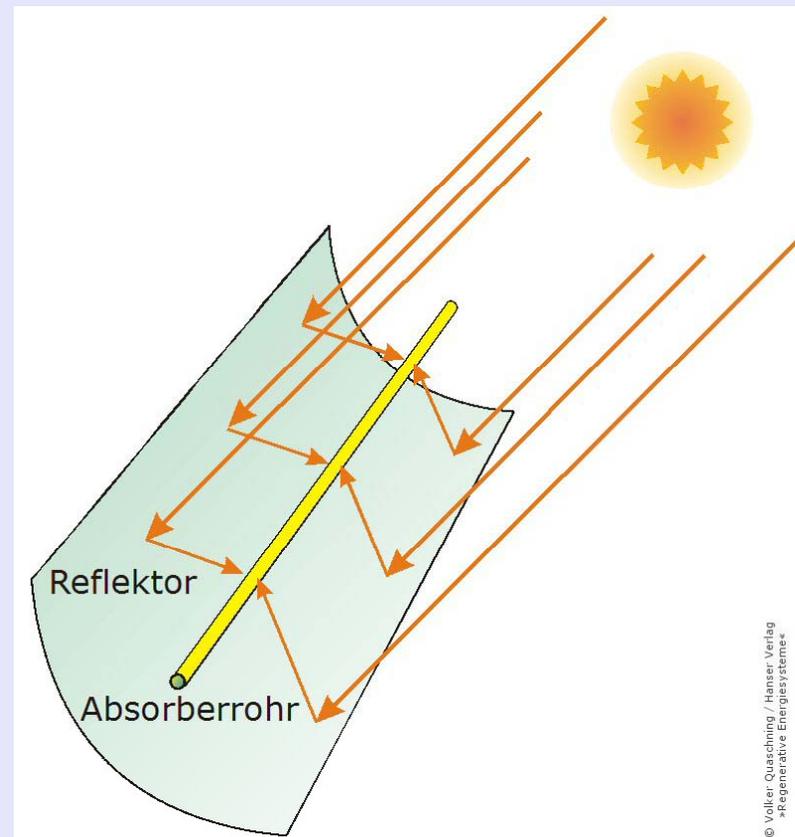
Bruttoleistung 4 800 MW, Transportverluste 12 %

Quelle: BMU, Ökologisch optimierter Ausbau erneuerbarer Energien in Deutschland, 2004

Parabolrinnenkollektor eines solarthermischen Dampfkraftwerkes



© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

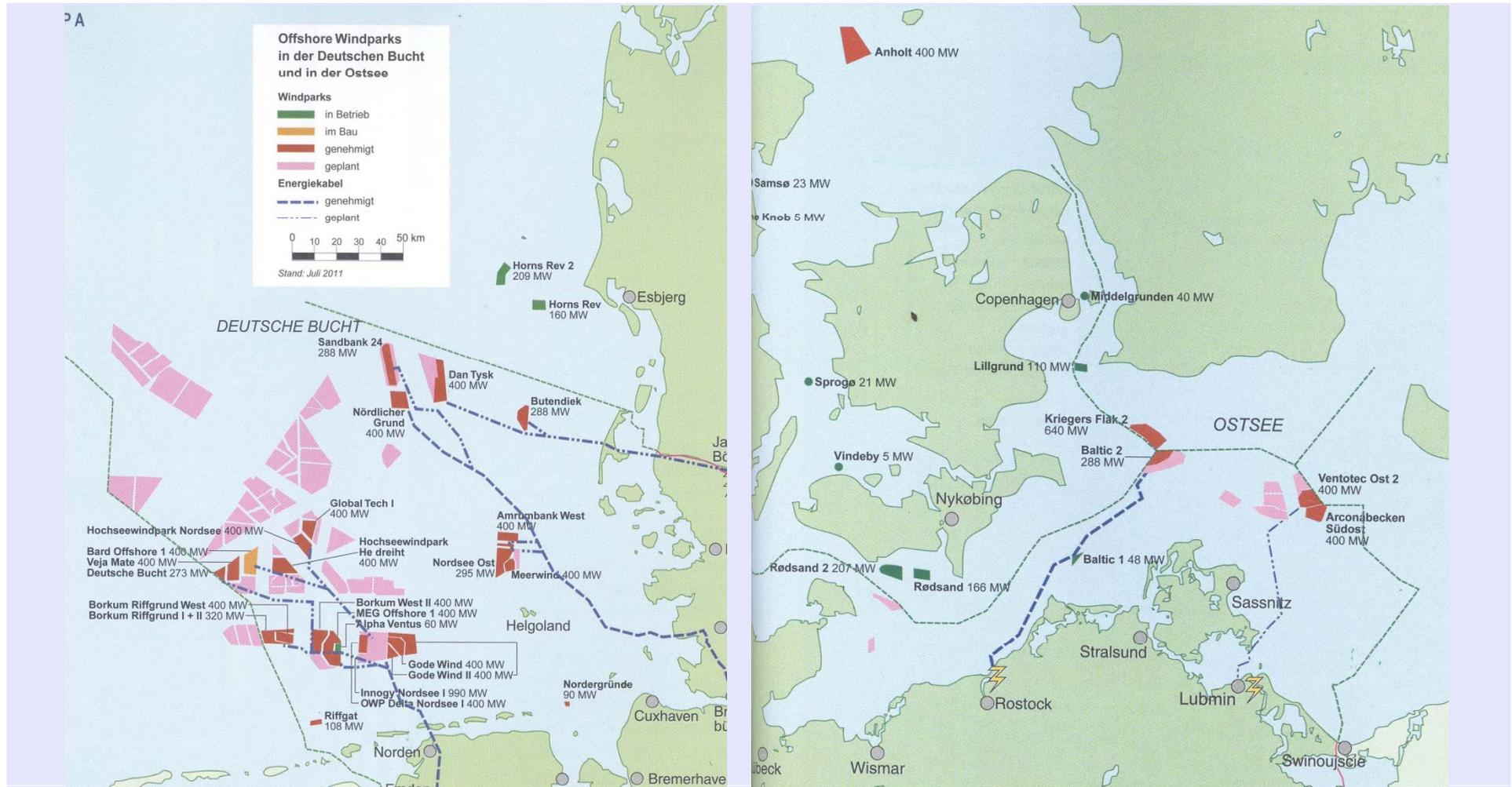


© Volker Quaschning / Hanser Verlag
»Regenerative Energiesysteme«

Offshore-Windpark



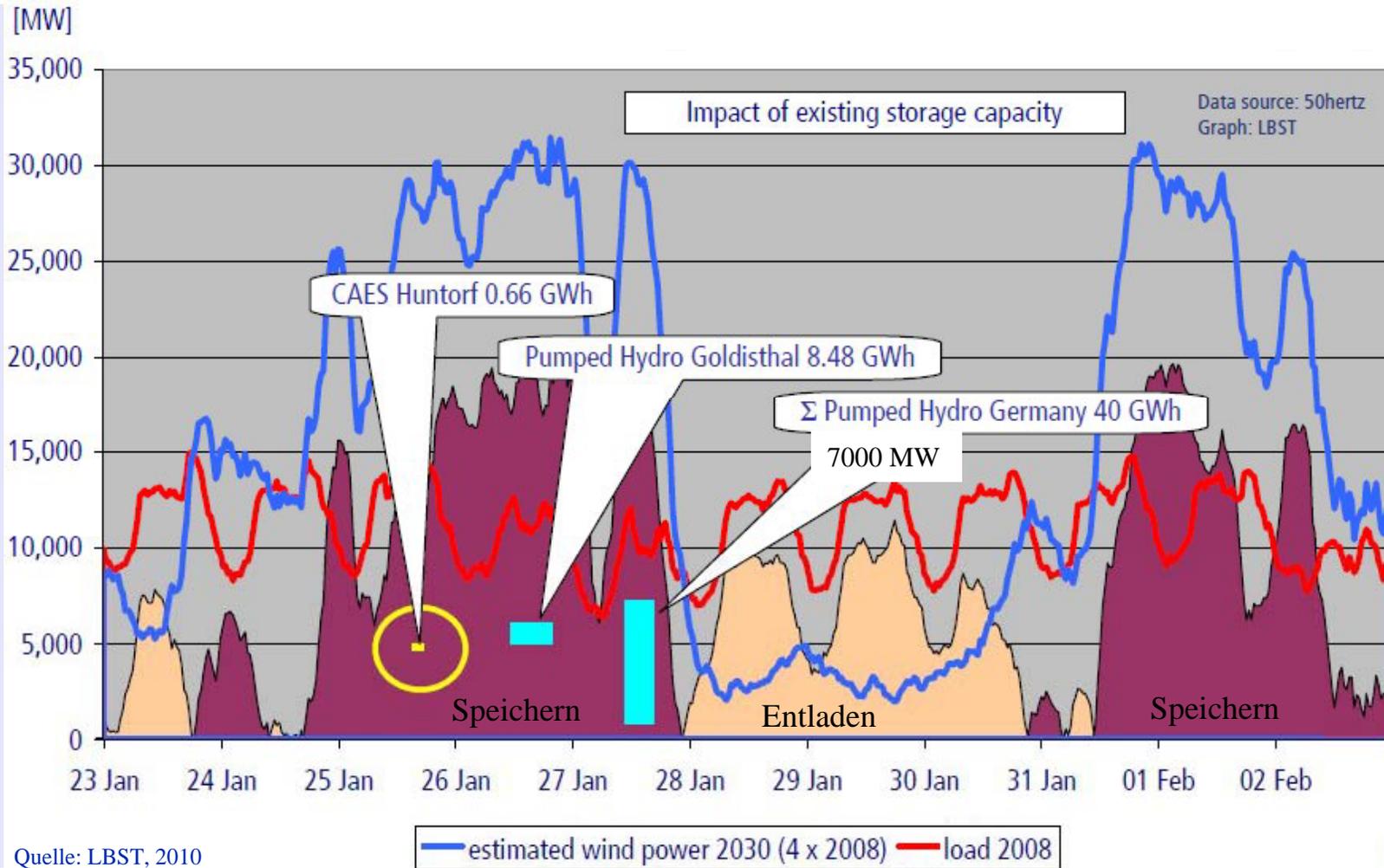
Offshore-Windinstallationen in der Nord- und Ostsee



Quelle: Sonne, Wind & Wärme, 29.07.2011

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Prognose über die Einspeisung von Windstrom ins Vattenfall-Netz im Jahr 2030 und die Notwendigkeit der Speicherung von Strom



Pumpspeicherkraftwerk Herdecke (153 MW, 590 MWh, Wirkungsgrad 78 %, Anfahrzeit 60 s)



Quelle: RWE

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Bestehende und geplante Pumpspeicherkraftwerke (>50 MW) in Deutschland



Gesamtinvestition eines Pumpspeicherkraftwerks:
rund 1100 €/kW

Quelle: ZfK, Sept. 2011

Druckluftspeicherkraftwerk CAES (A-CAES)

Zentrale Speicherkraftwerke

Bsp.: CAES Huntorf

321 MWel für 2 Stunden,
Anfahrzeit 8 min,
300 000 m³ in 700 m Tiefe,
Druck 70 bar



© EON – Druckluftspeicherkraftwerk Huntorf

Technologie

- Drucklufterzeugung mittels (adiabater) elektr. Kompressoren
- Druckluftspeicherung in Erdkavernen, (Wärmespeicherung)
- Rückverstromung mittels Erdgas-Turbinen (Turbinen)

Vorteile

- CAES: mäßiger Gesamtwirkungsgrad (42 - 54 %)
- A-CAES: voraus. guter Gesamtwirkungsgrad (60 - 70 %)
- freie Skalierbarkeit von Ein-/Auspeicherleistung, Kapazität

Nachteile

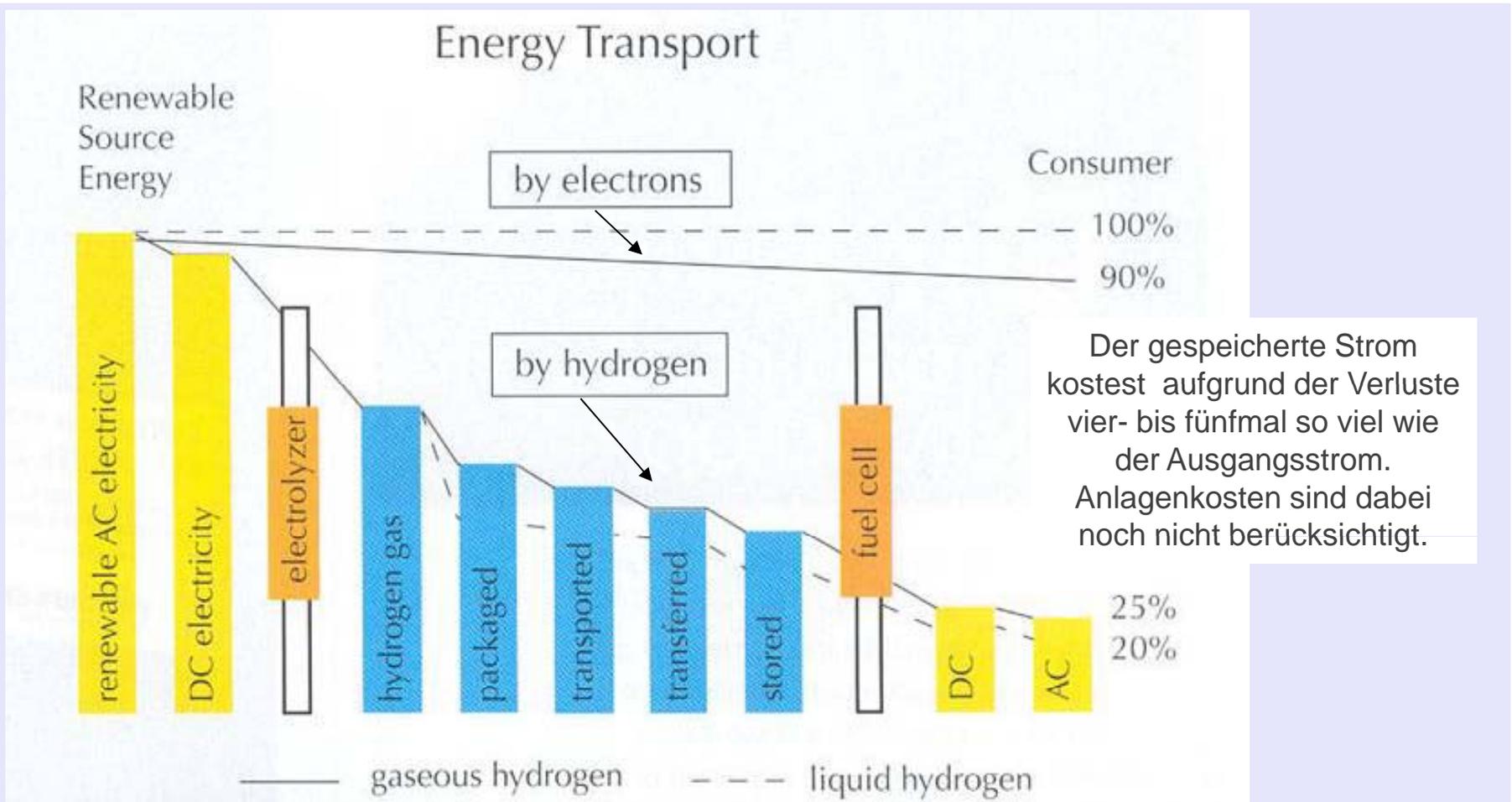
- geringe Energiedichte
- Kavernenbau notwendig

Anwendung

- kurz-/mittelfristig: tageszyklische Speicherdienstleistung
- mittel-/langfristig: Anstatt Windparks abzuregeln, speichern im Tageszyklus

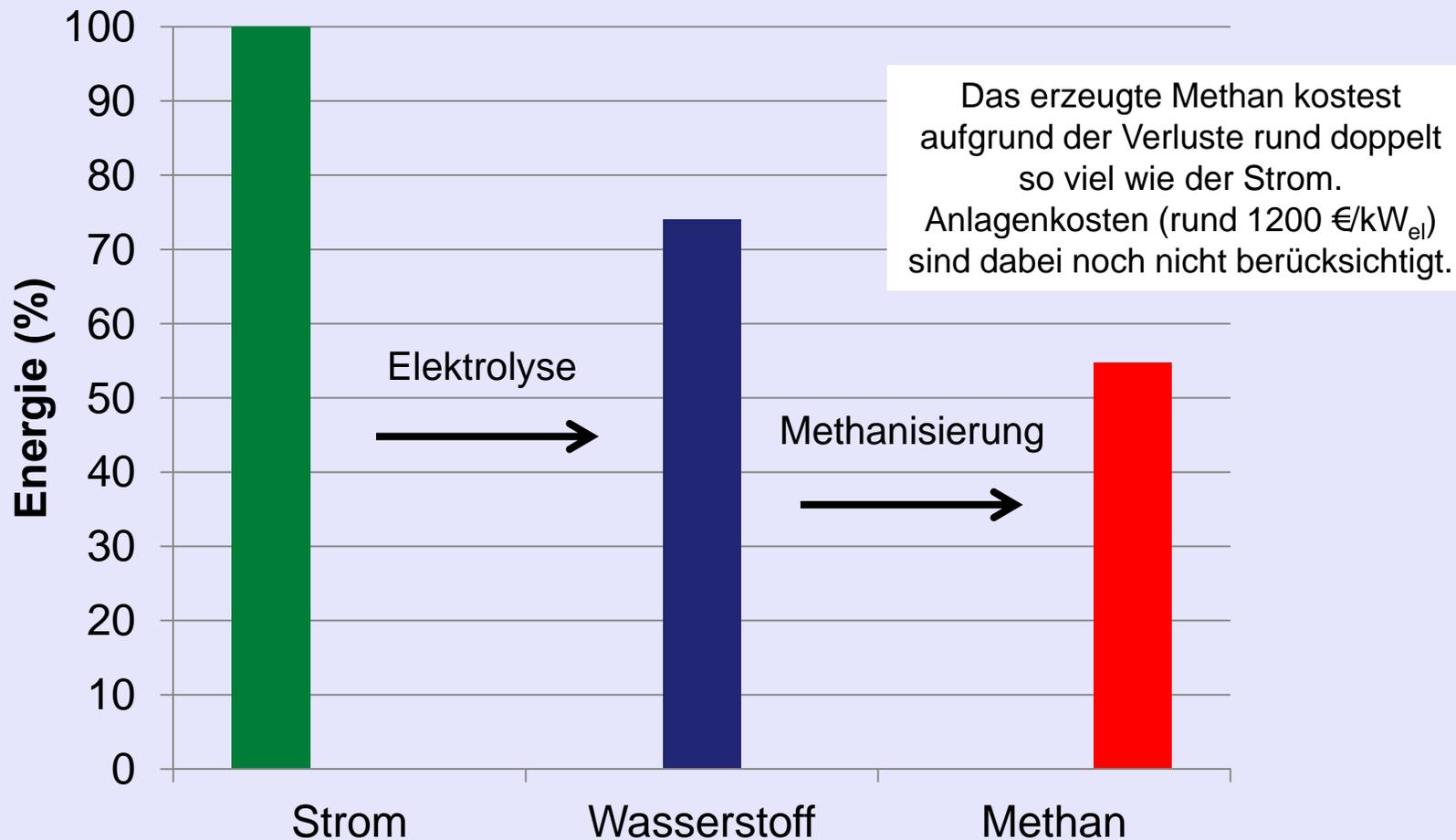
Quelle: Fraunhofer UMSICHT, 2011

Wirkungsgradkette der Speicherung von Strom in Wasserstoff

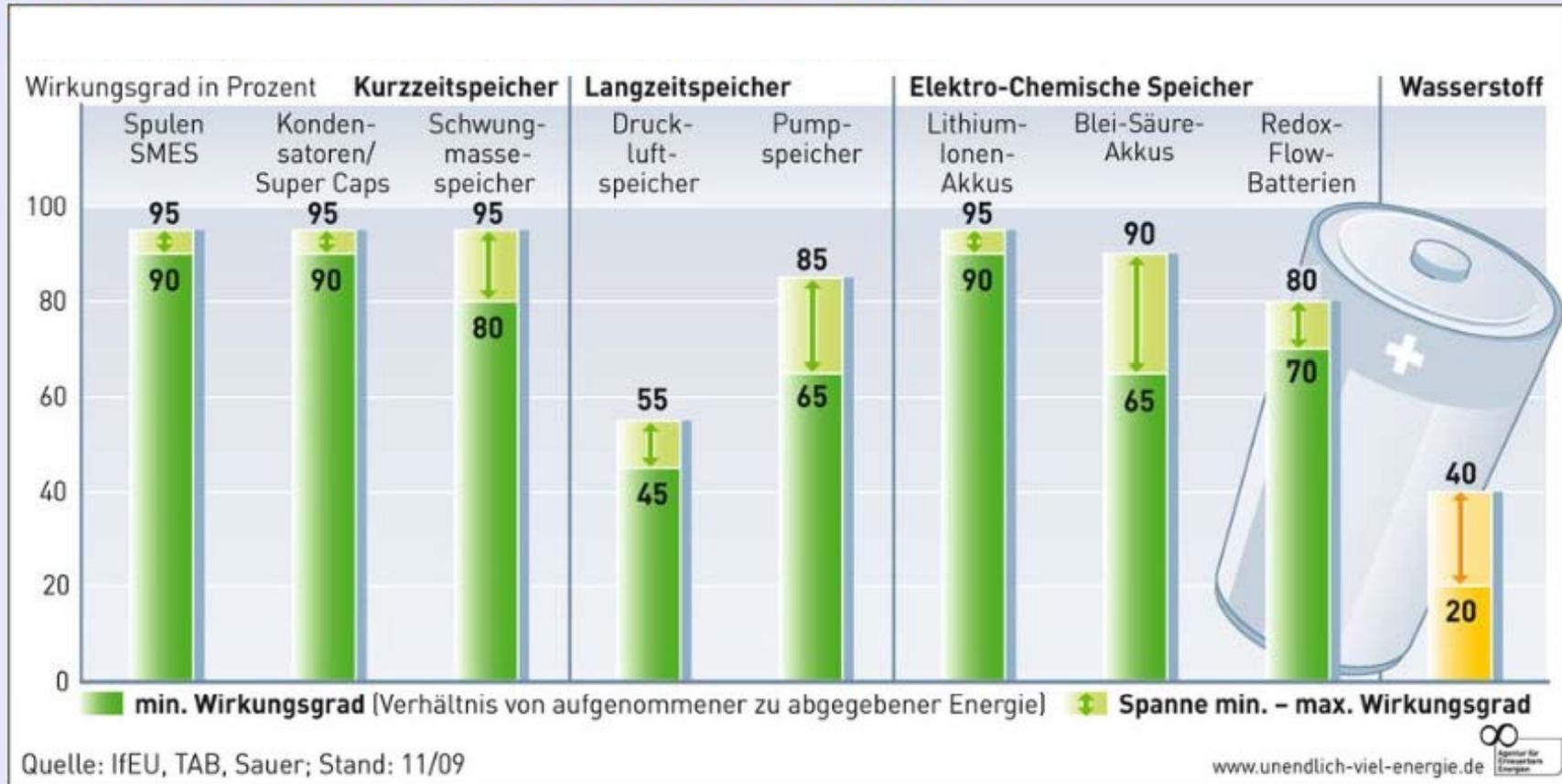


Quelle: PEI, September 2004

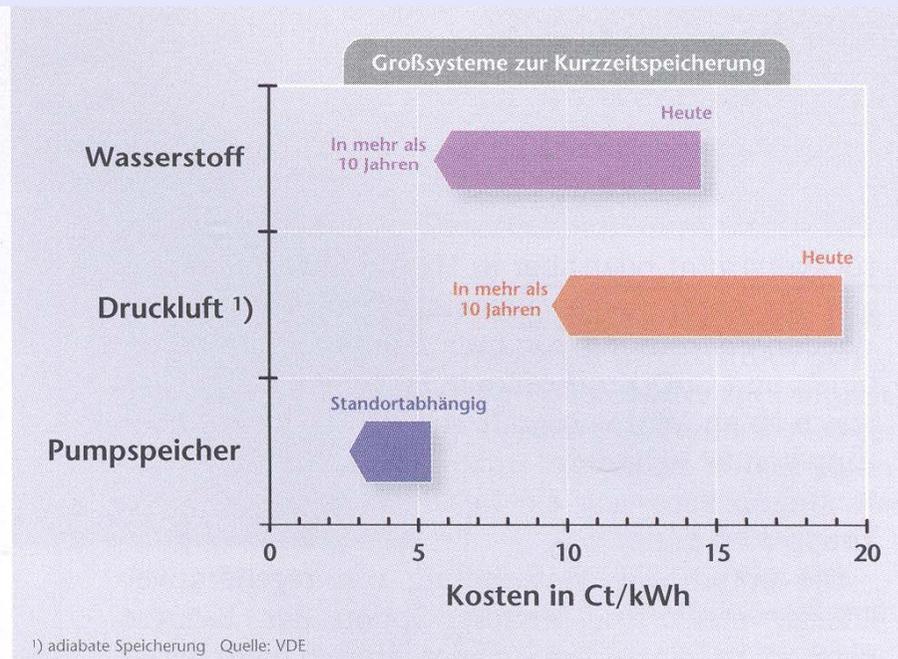
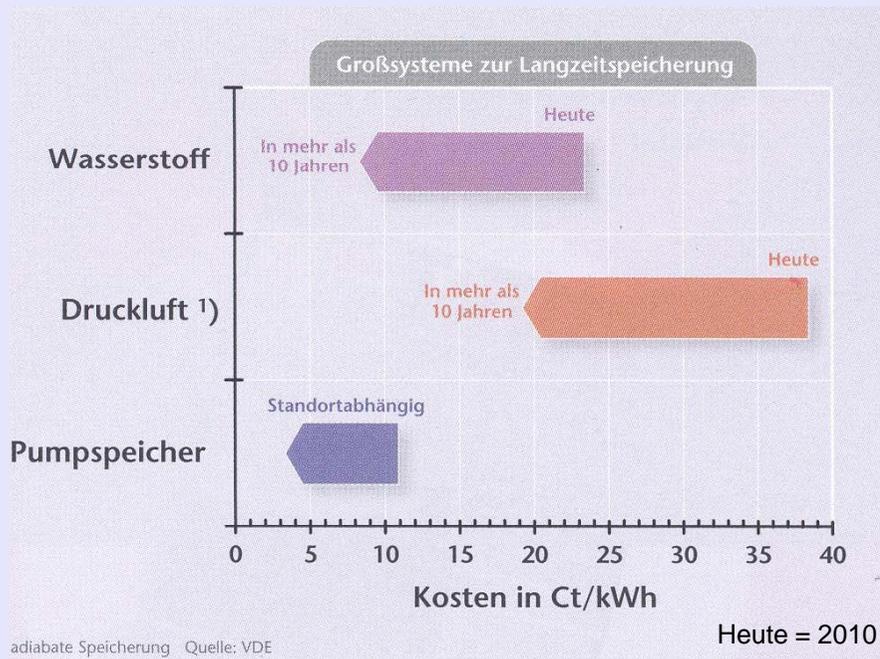
Wirkungsgradkette der Erzeugung von Methan aus Strom (Power-to-Gas)



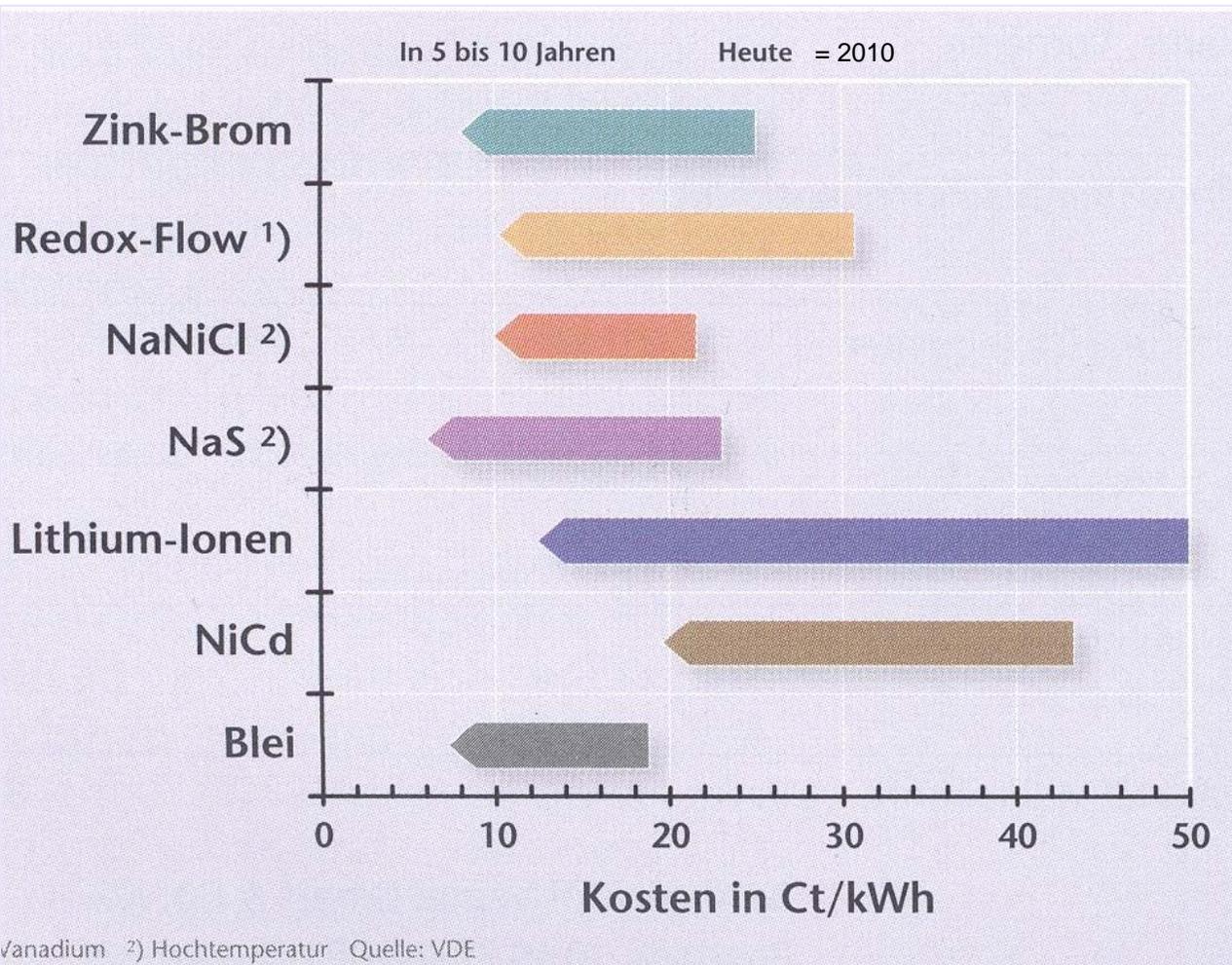
Wirkungsgrade verschiedener Stromspeicher



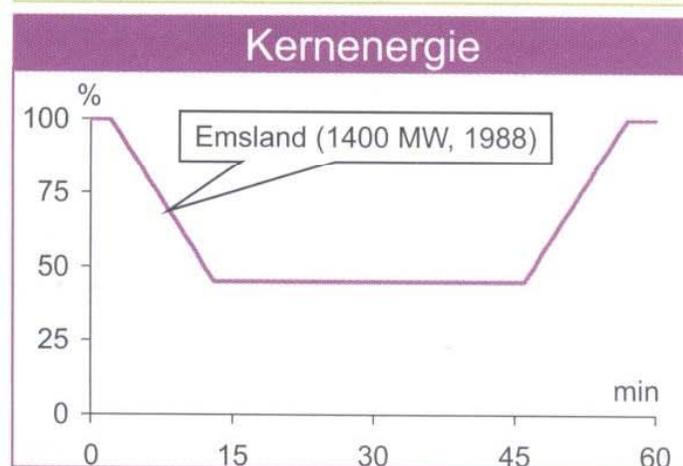
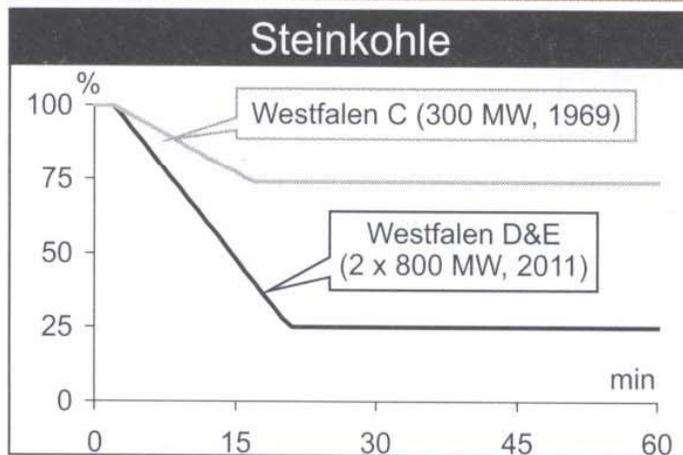
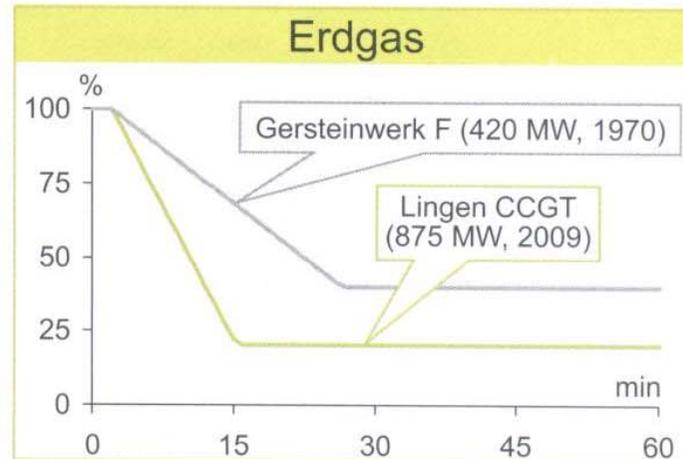
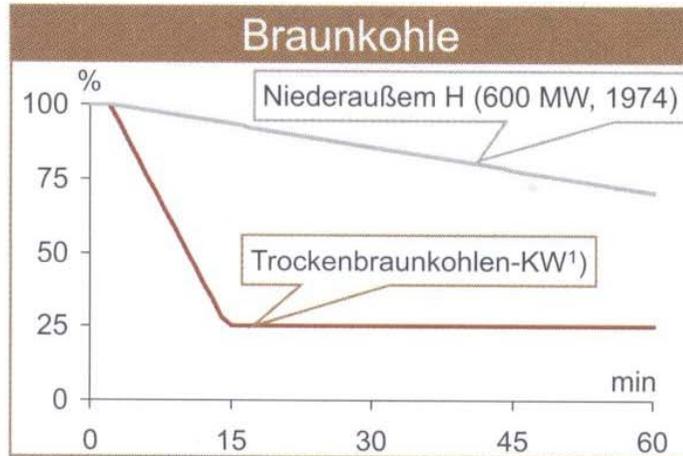
Kosten der Lang- und Kurzzeitspeicherung von elektrischer Energie



Kosten der Speicherung von elektrischer Energie in Akkumulatoren



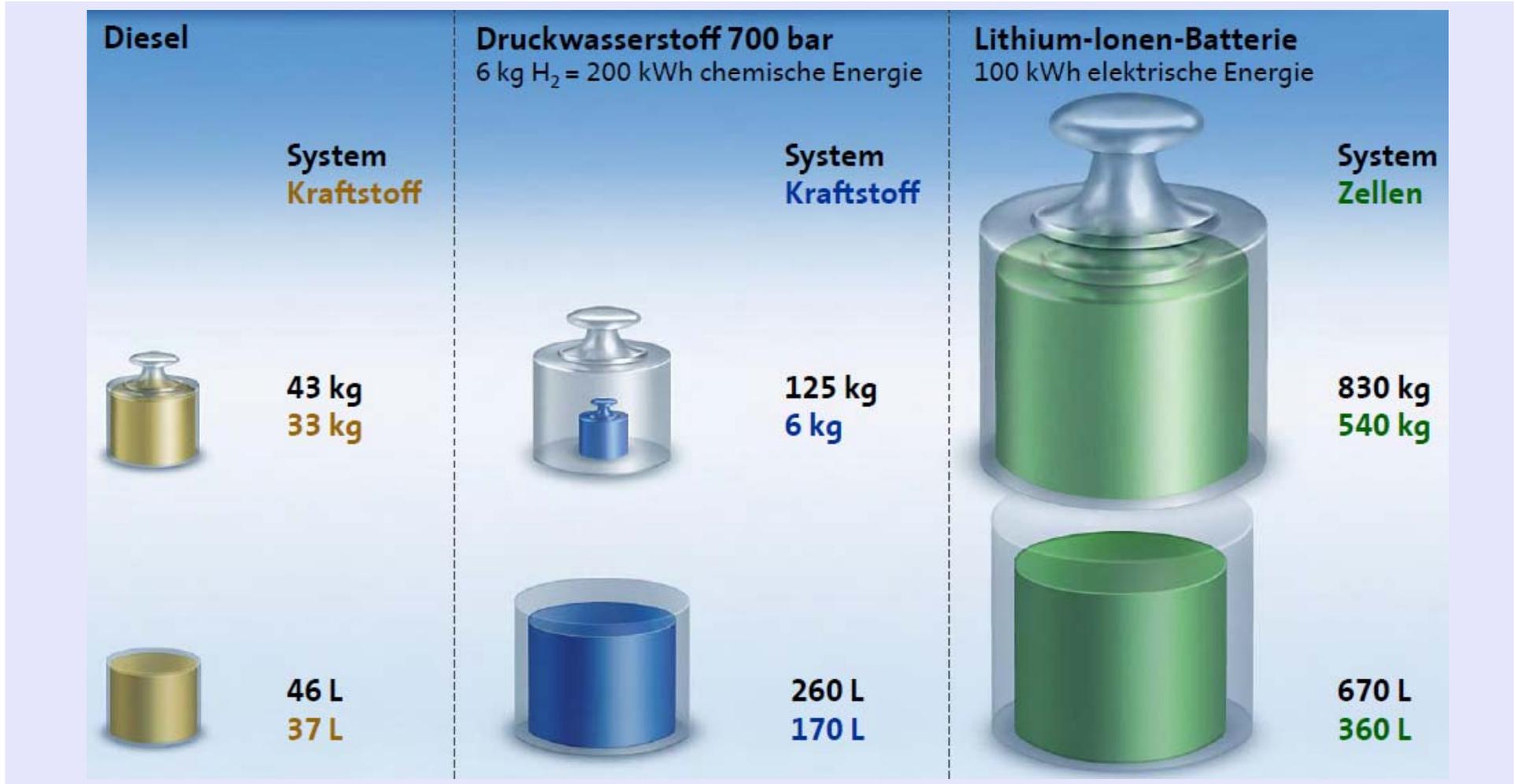
Moderne, flexible Großkraftwerke zur Kompensation der fluktuierenden Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien



¹) in der Entwicklungsphase

Quelle: BWK Bd. 62 (2010) Nr. 11

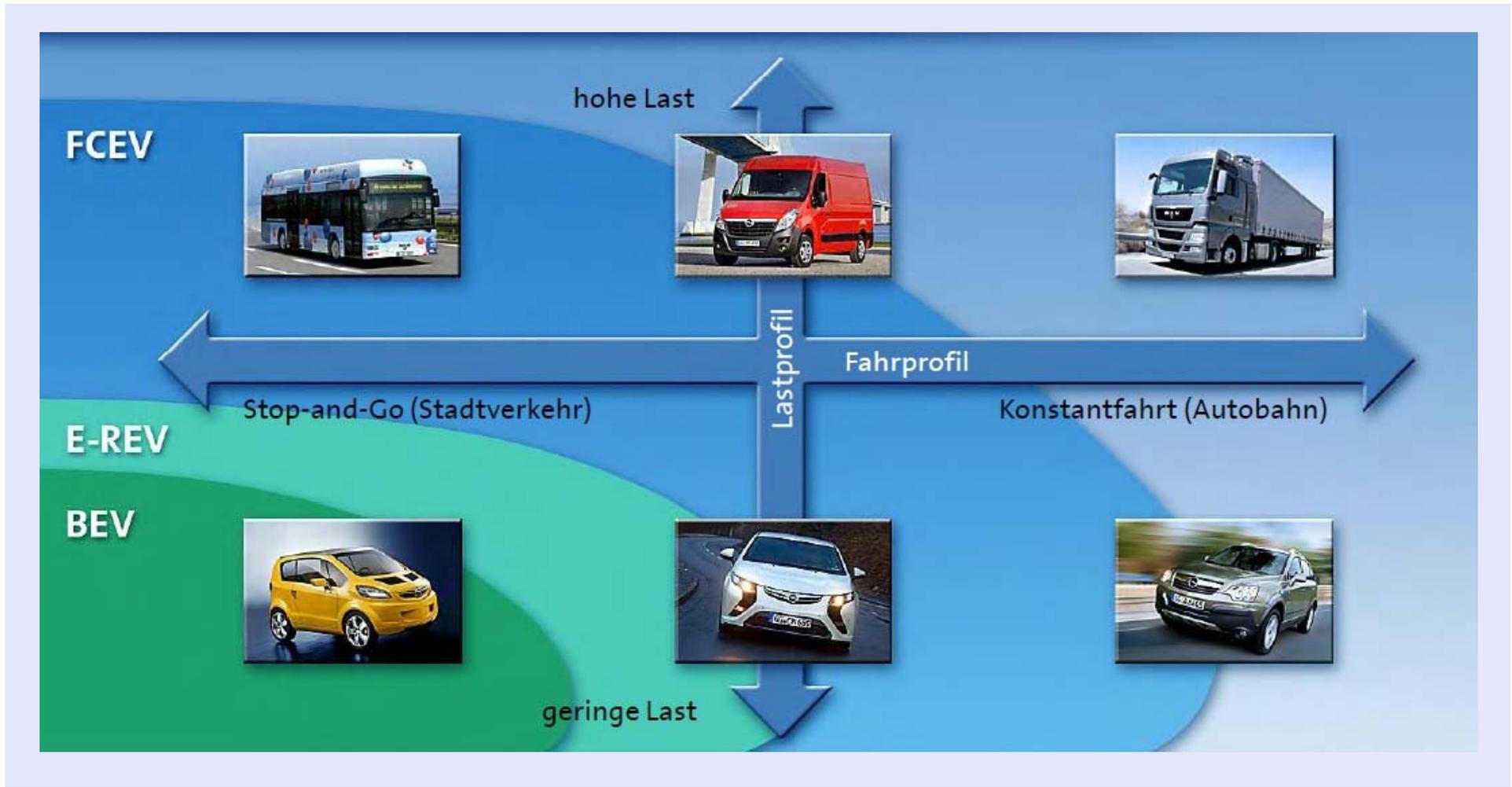
Energiespeicherung im Fahrzeug für 500 km Reichweite



Quelle: Opel, 2010

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

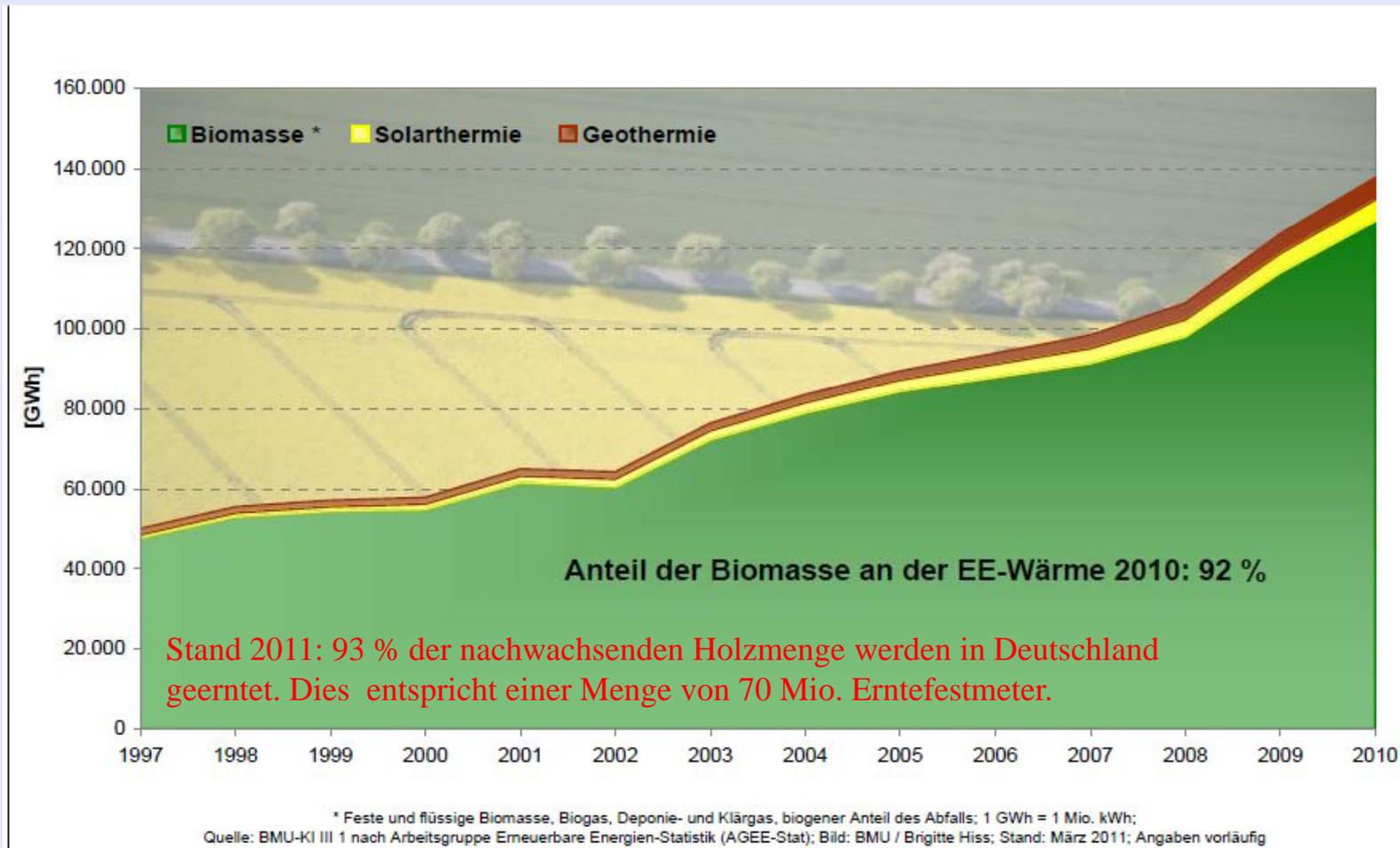
Anwendungsfelder für verschiedene Antriebskonzepte



Quelle: Opel, 2010

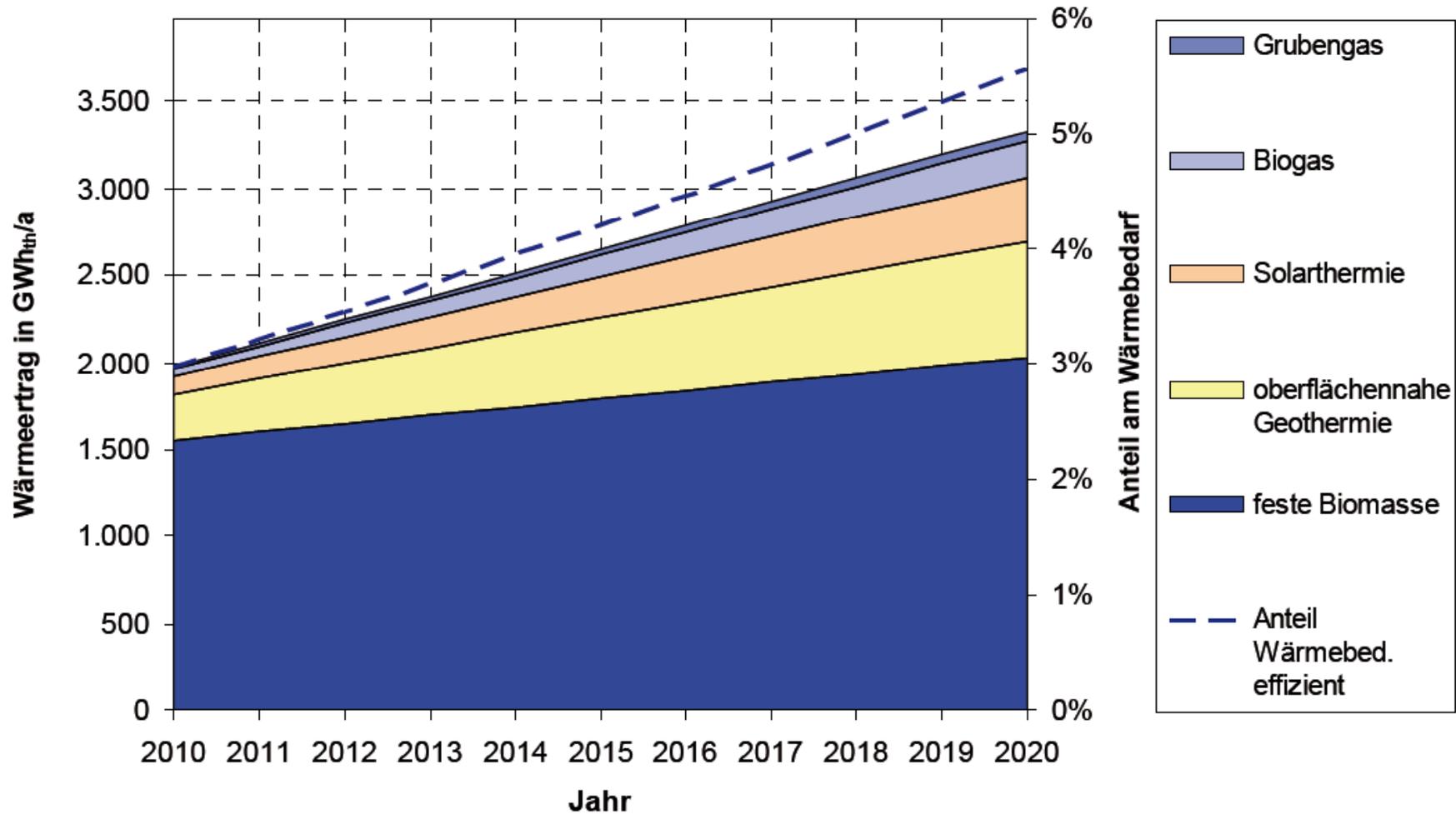
© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Zeitliche Entwicklung der Wärmeerzeugung aus erneuerbaren Energien



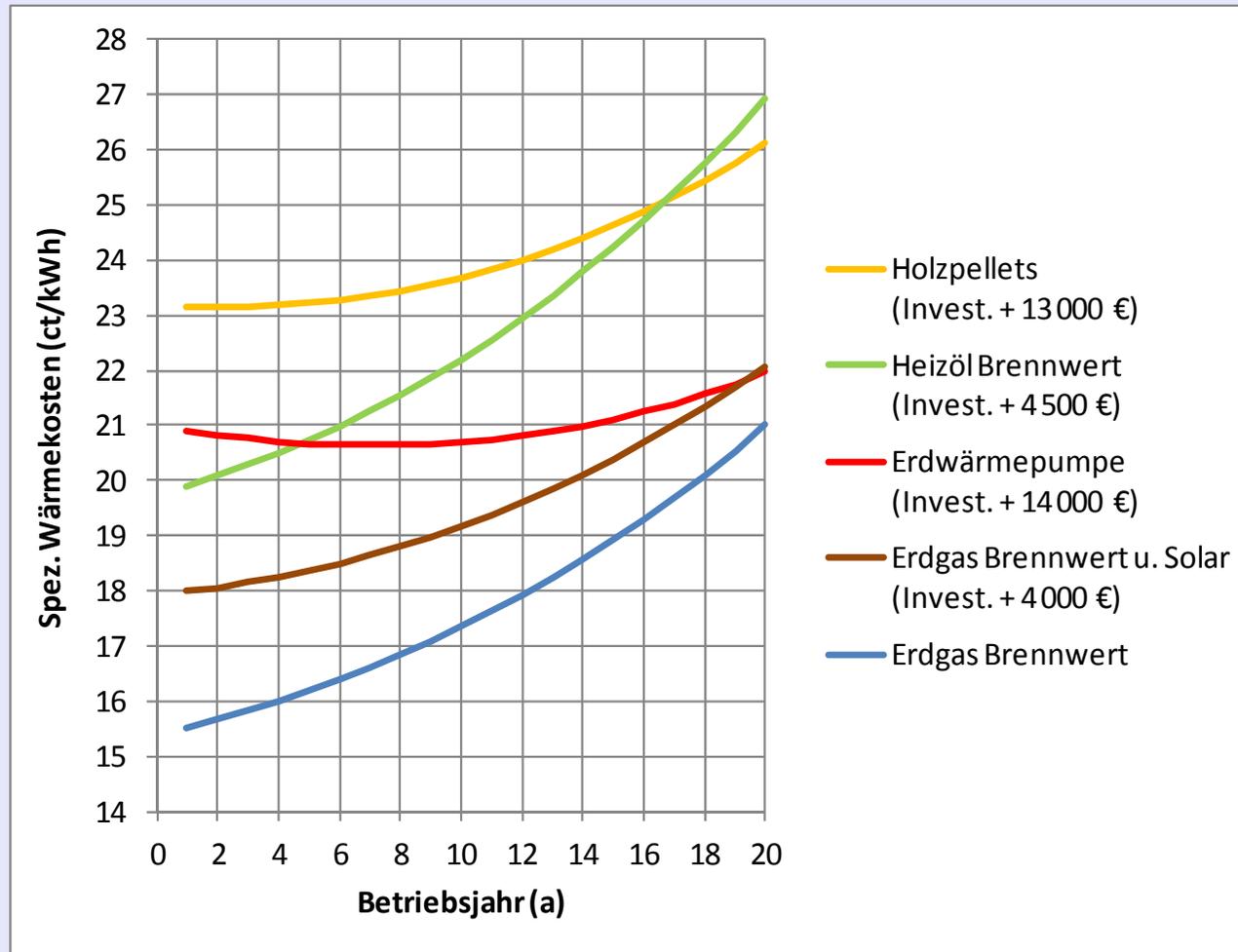
Quelle: BMU, Erneuerbare Energien 2010 + VDI nachrichten vom 07.10.2011

Beitrag und Ausbau der erneuerbaren Energieträger zur Wärmeerzeugung im Regierungsbezirk Arnsberg



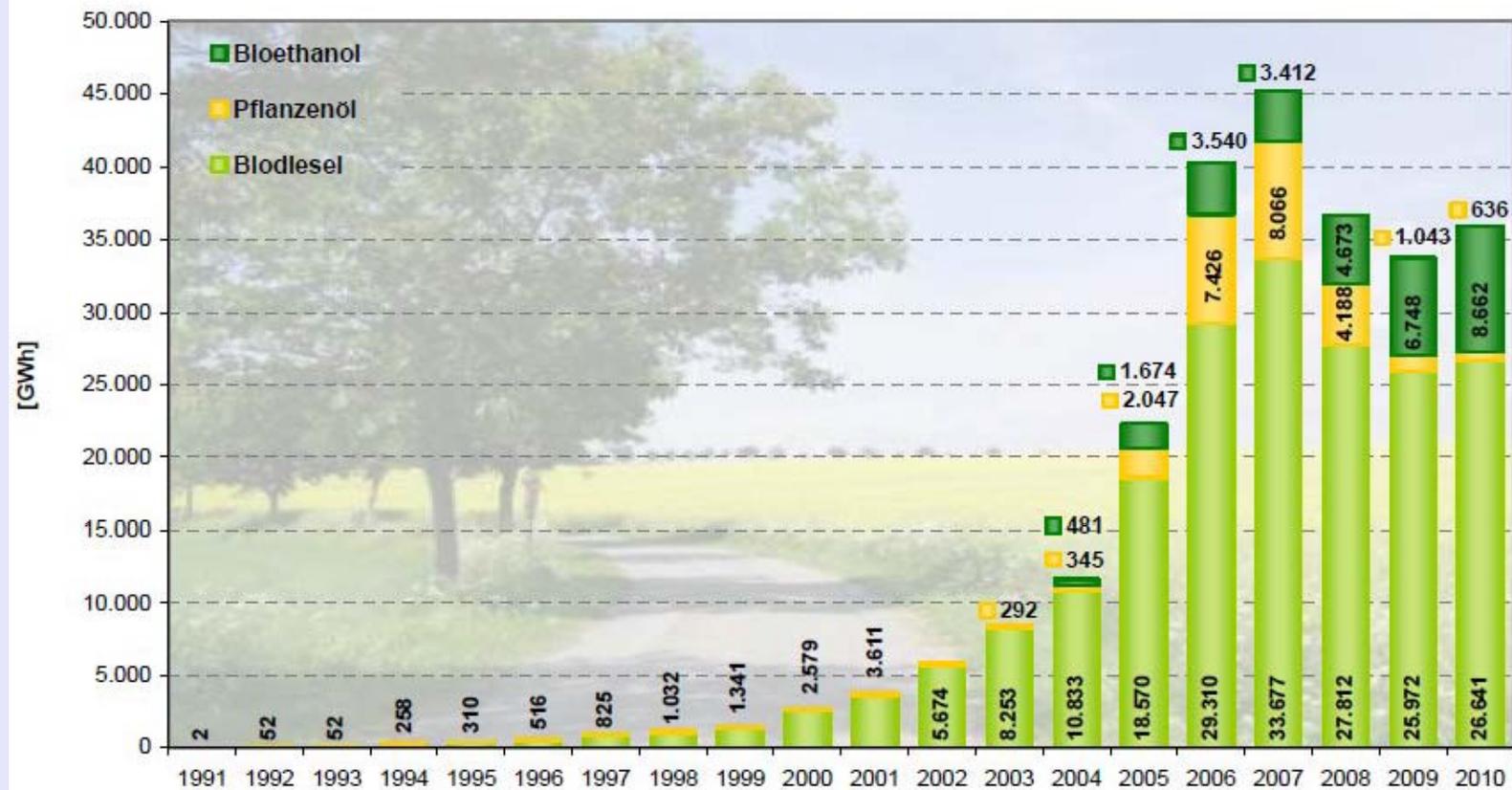
Quelle: Studie von Siemens für die Bezirksregierung Arnsberg, 2011

Spezifische Wärmeerzeugungungskosten verschiedener Heizsysteme für ein Einfamilienhaus (Neubau 2012)



Die solare Wärme-
erzeugung mit Photo-
voltaik wird schon bald
günstiger sein als die
mit Solarkollektoren.
Unkomplizierter ist sie
ohnehin.

Beitrag erneuerbarer Energien an der Kraftstoffbereitstellung in Deutschland

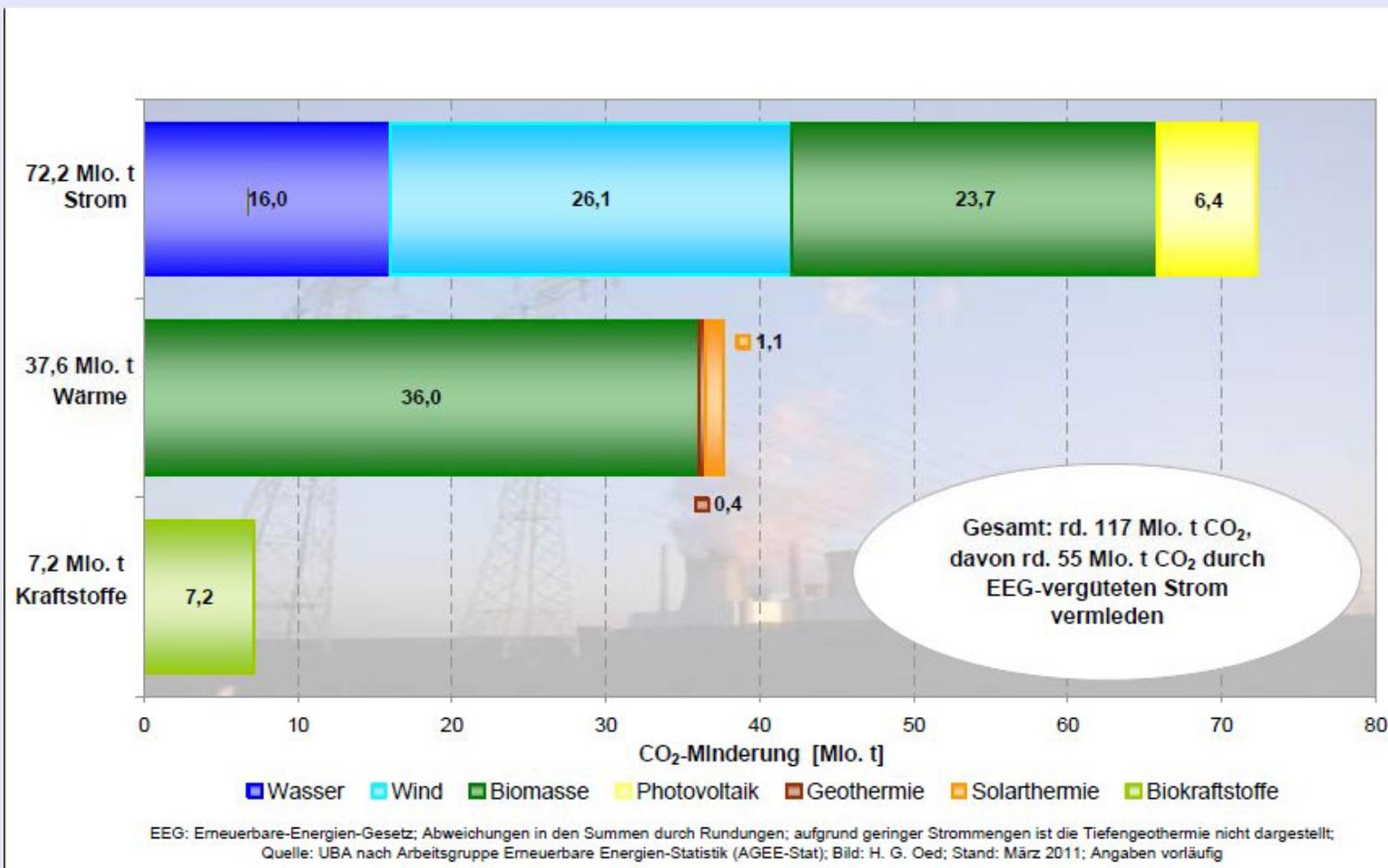


Keine Biokraftstoffe im Jahr 1990; Pflanzenöl bereits seit 1992 für biogene Kraftstoffe verwendet, Bioethanol seit 2004; 1 GWh = 1 Mio. kWh;
 Quelle: BMU-KI III 1 nach Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat); Bild: BMU / Dieter Böhme; Stand: März 2011; Angaben vorläufig

Quelle: BMU, Erneuerbare Energien 2010

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

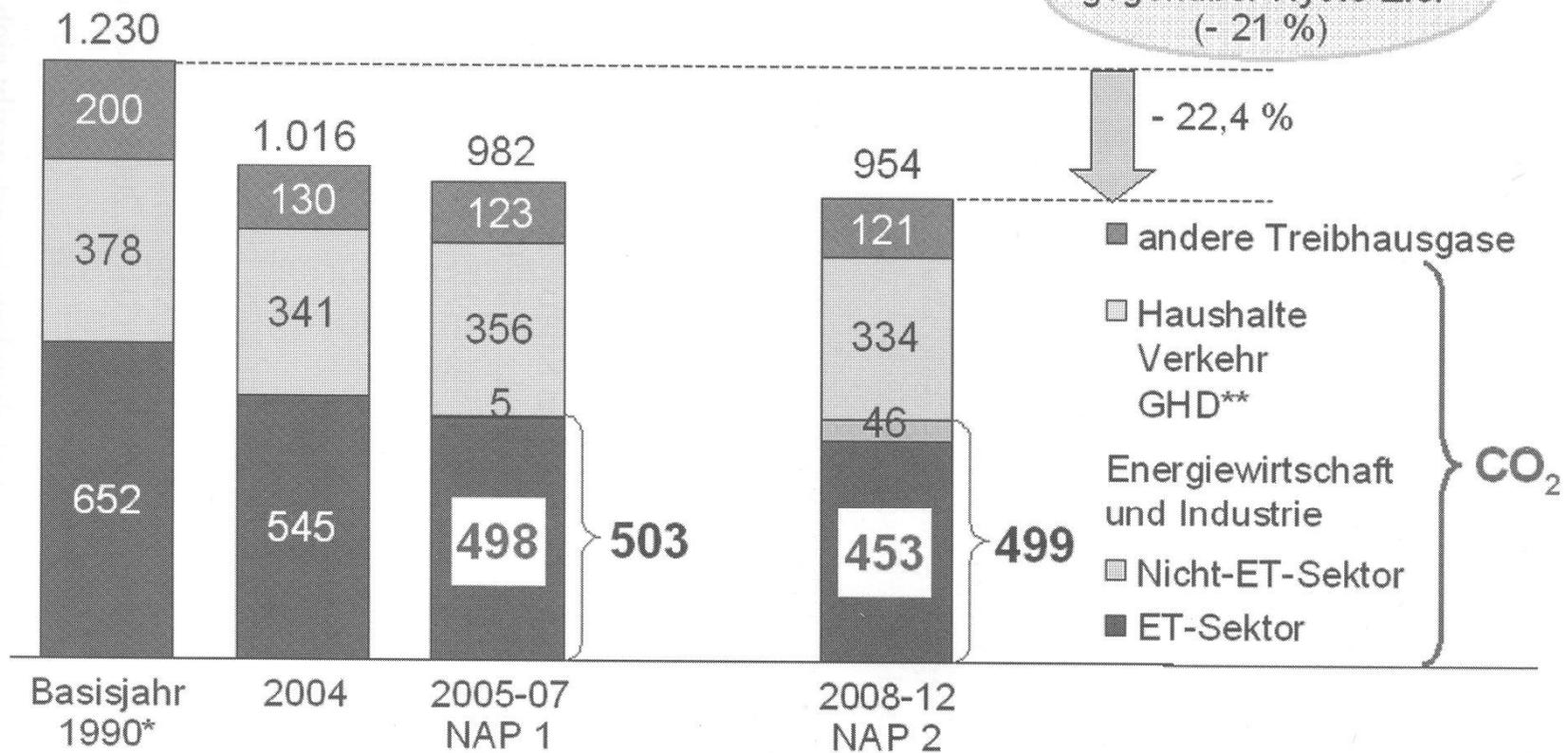
Vermiedene CO₂-Emissionen durch die Nutzung erneuerbarer Energien in Deutschland im Jahr 2010



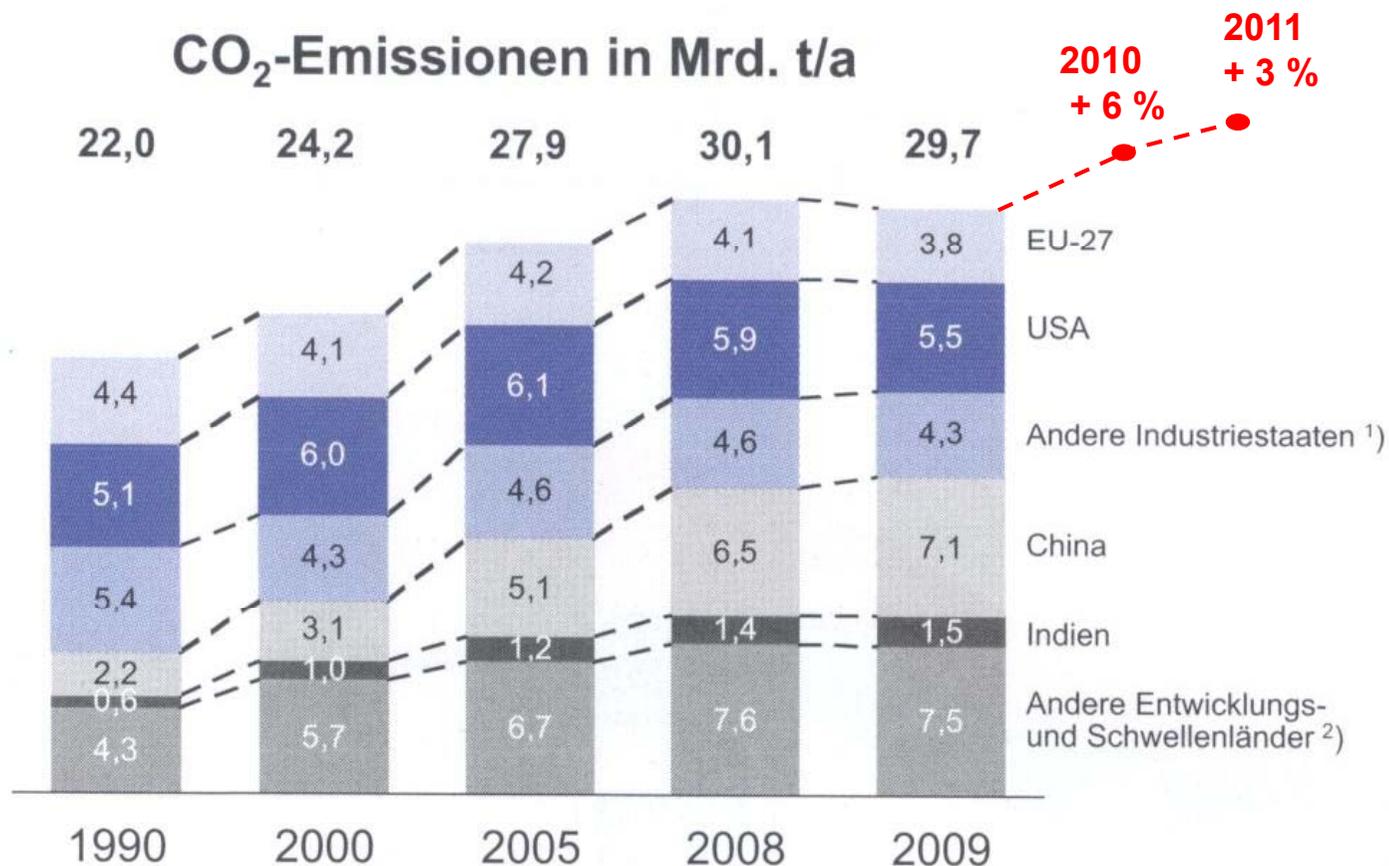
Quelle: BMU, Erneuerbare Energien 2010

Treibhausgas-Emissionsbudgets in Deutschland

Emissionen in Mio. t CO₂-Äquivalenten pro Jahr



Weltweite energiebedingte CO₂-Emissionen von 1990 bis 2009



¹⁾ Annex-I-Staaten ²⁾ Nicht-Annex-I-Staaten Quelle: H.-J. Ziesing, ET 09/2010

Quelle: BWK Bd. 62 (2010) Nr. 11



Neuregelungen der dritten Handelsperiode des EU-Emissionshandels ab 2013

- nur noch ein gemeinsames europäisches CO₂-Emissionsbudget
- Jahr für Jahr wird dies um 1,74 Prozent reduziert
- Energiesektor muss CO₂-Emissionsrechte vollständig erwerben
- Auktionsquote für die Industrie steigt von 20 % in 2013 auf 70 % in 2020

Eckdaten des RWE-Projekts „450 MW CO₂-freies Kraftwerk“ (IGCC-CCS: Integrated Gasification Combined Cycle – Carbon Capture and Storage)

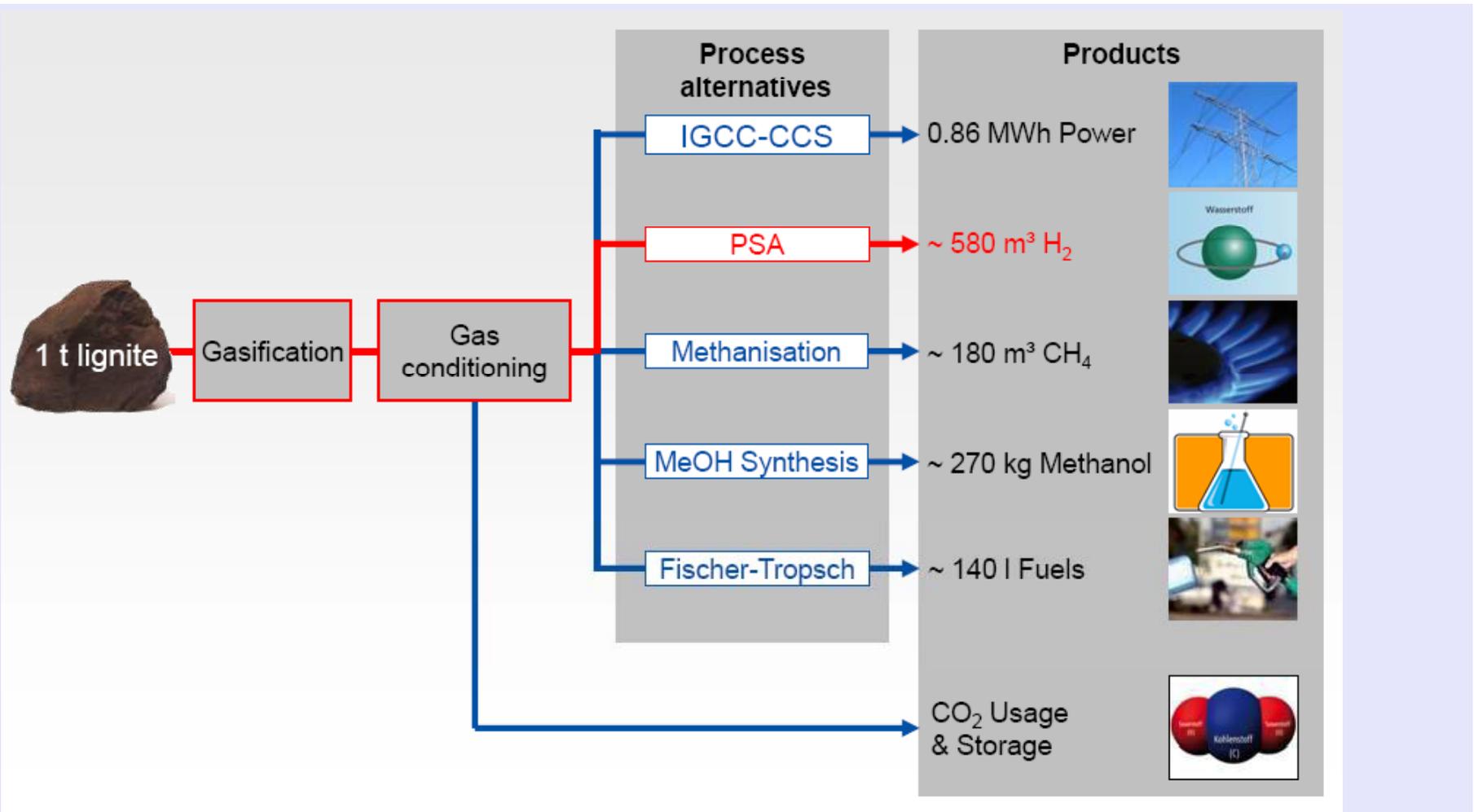


- Basic technology: IGCC (Integrated Gasification Combined Cycle)
- Capacity: 450 MW_{gross}, 320 MW_{net}
- H₂ production: ~ 21 t/h (~ 230,000 Nm³/h)
- CO₂ capture rate: > 90% of produced CO₂
- CO₂ storage: ~ 2.6 m t/a
- CO₂ pipeline: ~ 500 km from power plant to the storage

Gesamtinvestition: 2,2 Mrd. € (Kraftwerk: 1,6 Mrd. €, Pipeline: 0,4 Mrd. €, Speicher: 0,2 Mrd. €)

Quelle: RWE AG

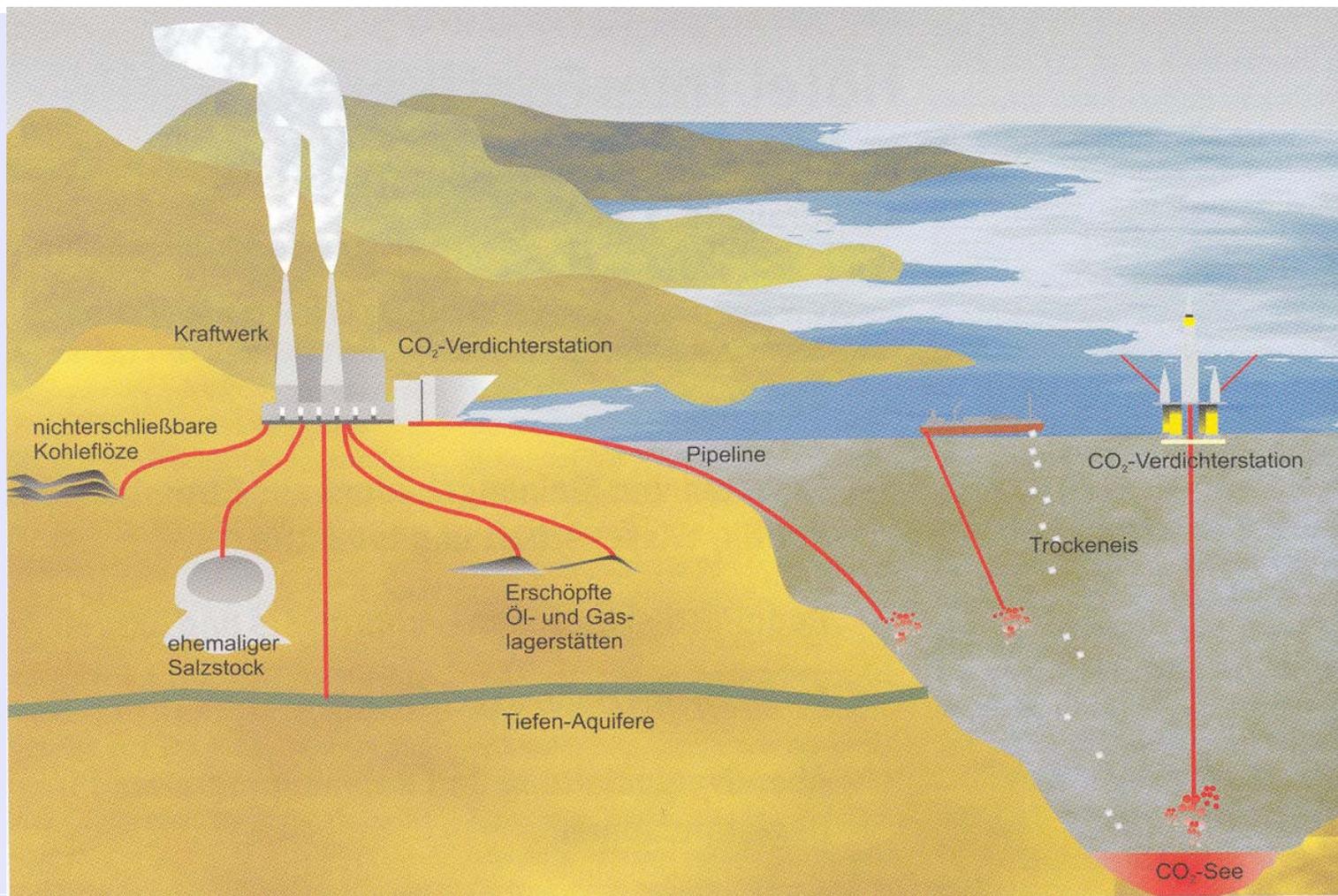
Zusätzliche Optionen der Kohlevergasung für Zeiten unsicherer und teurer Gas- und Ölimporte



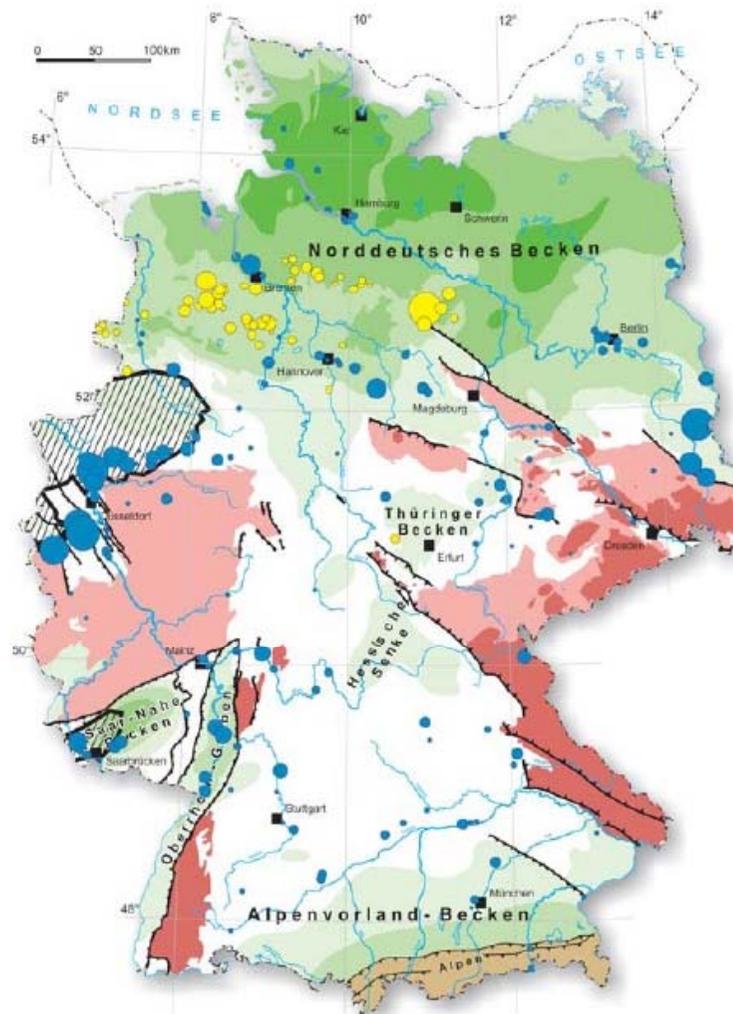
Quelle: RWE AG, 2010

© Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail

Varianten der Speicherung von Kohlendioxid



CO₂-Quellen und -Senken in Deutschland



Bedeutende CO₂-Quellen ● Kraftwerke, Hütten- und Zementwerke, ● 0,2 → ● 20 Mt/a Raffinerien u.a.

Regionen mit Speichermöglichkeiten



Steinkohle - Flöze

Erdgas - Felder

Regionen ohne bedeutende Speichermöglichkeiten

- metamorphe Gesteine
- magmatische und hoch-metamorphe Gesteine
- Speichergesteine nicht oder in zu geringen Tiefen vorhanden

Quelle: BGR - Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2008



Fazit 1/2

- Windenergie ist diejenige erneuerbare Energie, die in Deutschland, NRW und Südwestfalen das größte Ausbaupotenzial bietet und relativ niedrige Stromerzeugungskosten aufweist.
- Wasserkraft und Biomasse weisen bei guter Verfügbarkeit ebenfalls günstige Kosten auf, haben jedoch nur beschränkte Ausbaupotenziale (25 % bis 50 %).
- Solarenergie führt aufgrund der eher geringen Solarstrahlung in Deutschland, NRW und vor allem in Südwestfalen bei mäßiger Verfügbarkeit zu relativ hohen Erzeugungskosten.
- Ein weiträumiger Ausbau der Netze ist erforderlich, um die steigenden Anteile „erneuerbaren Stroms“ aufnehmen zu können und der fluktuierenden Erzeugung entgegenzuwirken.



Fazit 2/2

- Die Fluktuation der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien sollte auch durch den Bau von Stromspeichern sowie von neuen Gas- und Kohlekraftwerken kompensiert werden. Die Themen Smart Grid und Smart Home sollten darüber hinaus vorangetrieben werden.
- Effizienztechnologien (z. B. Kraft-Wärme-Kopplung) sollten verstärkt eingesetzt und weiterentwickelt werden.
- Die Abtrennung und Speicherung des Kohlendioxids aus Kraftwerken sollte vorangetrieben werden, da auf Gas- und Kohlekraftwerke mittelfristig (> 50 Jahre) nicht verzichtet werden kann.
- Gelingt die Energiewende, die erst einmal erhebliche Kosten verursacht (ca. 175 Mrd. € von 2011 bis 2020), so eröffnen sich neue Exportmöglichkeiten für die deutsche Industrie.



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!

Gerne stehe ich für Fragen zur Verfügung, jetzt
oder später unter kail@fh-swf.de

Der Vortrag steht auf meiner Internetseite
(www.fh-swf.de) zum Download zur Verfügung.