

# Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen von Kraftwerken

Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail  
FH Südwestfalen, Meschede

Kolloquium der Uni Siegen und des VDI Siegen  
„Energietechnik sowie Fluid- und Thermodynamik“  
Universität Siegen, 23.10.03





# Reduktion der Kohlendioxid-Emissionen von Kraftwerken

**Prof. Dr.-Ing. Christoph Kail**  
**FH Südwestfalen, Meschede**

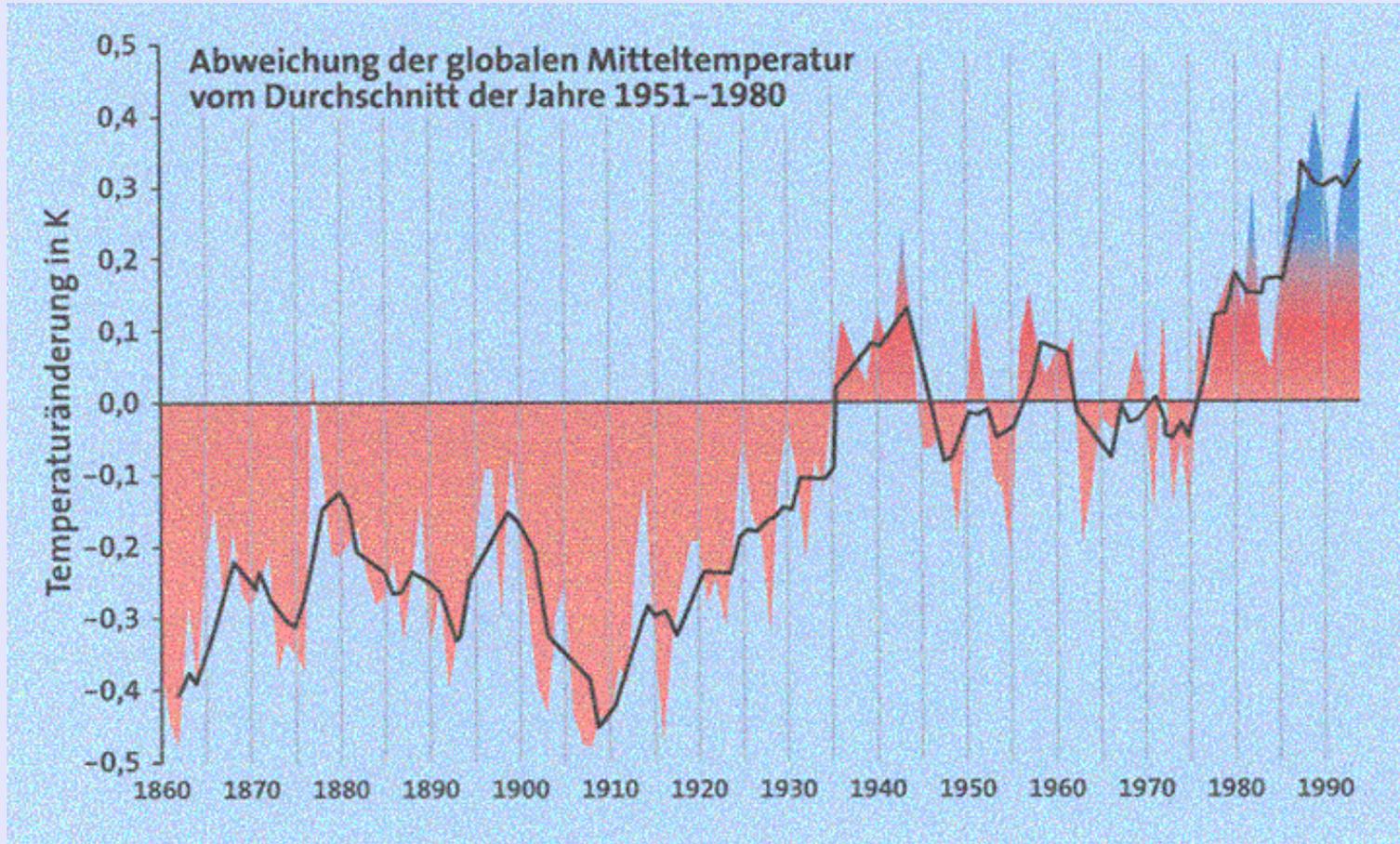
**Mescheder Hochschulreferate**  
**05.11.03, 18:00, Raum 8.1**



# Gliederung

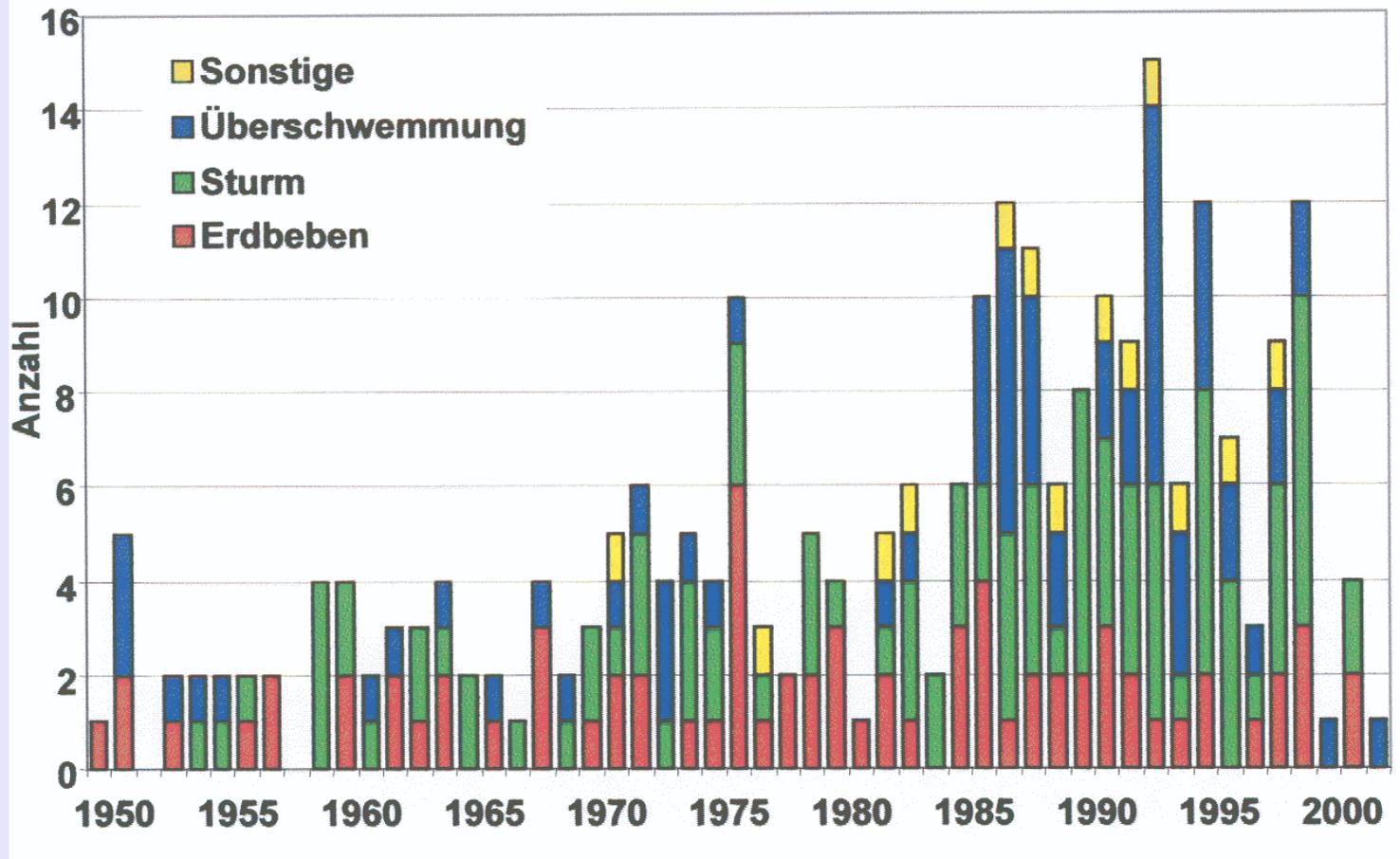
1. Klimaänderung und Naturkatastrophen
2. Status und Ziele der Emissionsreduktion klimarelevanter Gase in Deutschland und in der EU
3. Maßnahmen zur weiteren Reduktion energiebedingter Kohlendioxidemissionen
4. Auswirkungen der Emissionsreduktion auf die Stromerzeugungskosten
5. Zusammenfassung

# Anstieg der globalen Mitteltemperatur im letzten Jahrhundert



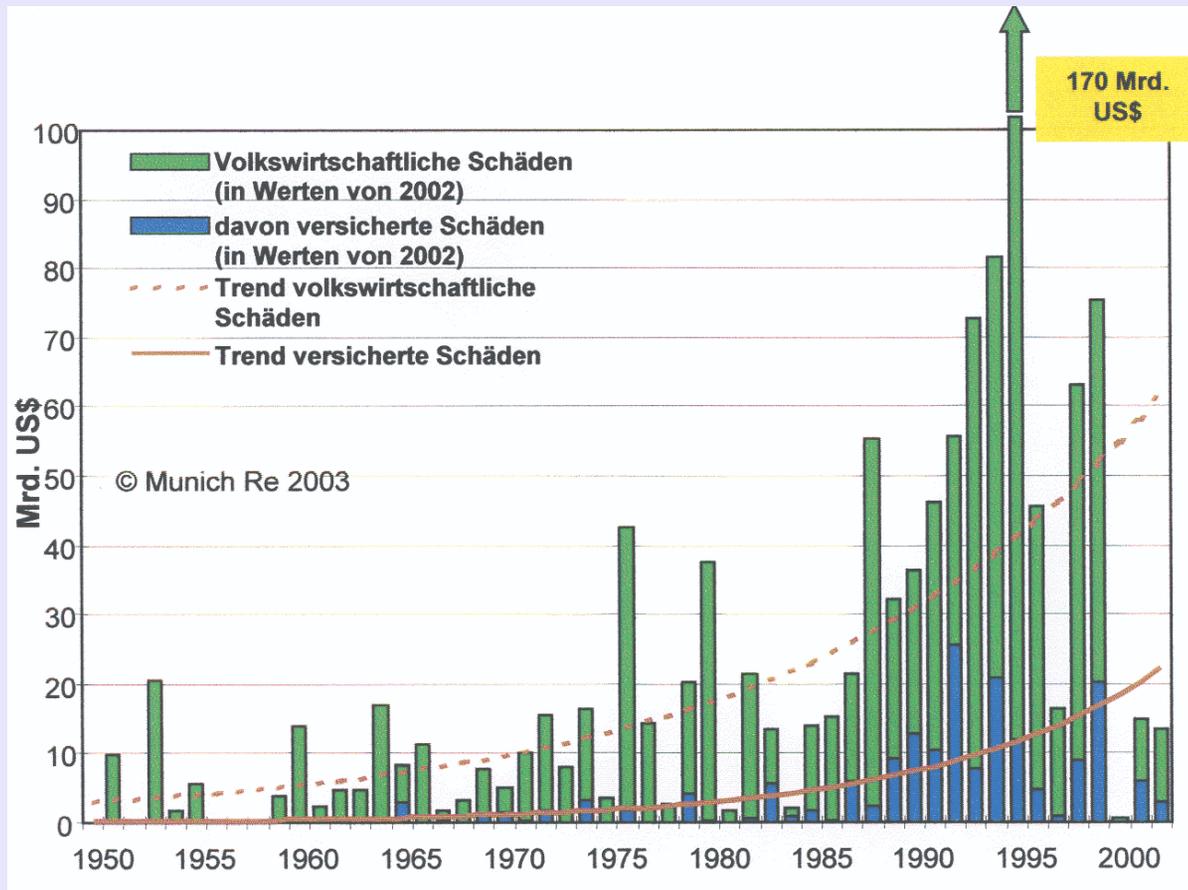
Quelle: Energien für das neue Jahrtausend, Studie von RAG und STEAG, 2002

# Große Naturkatastrophen 1950 – 2002, weltweit



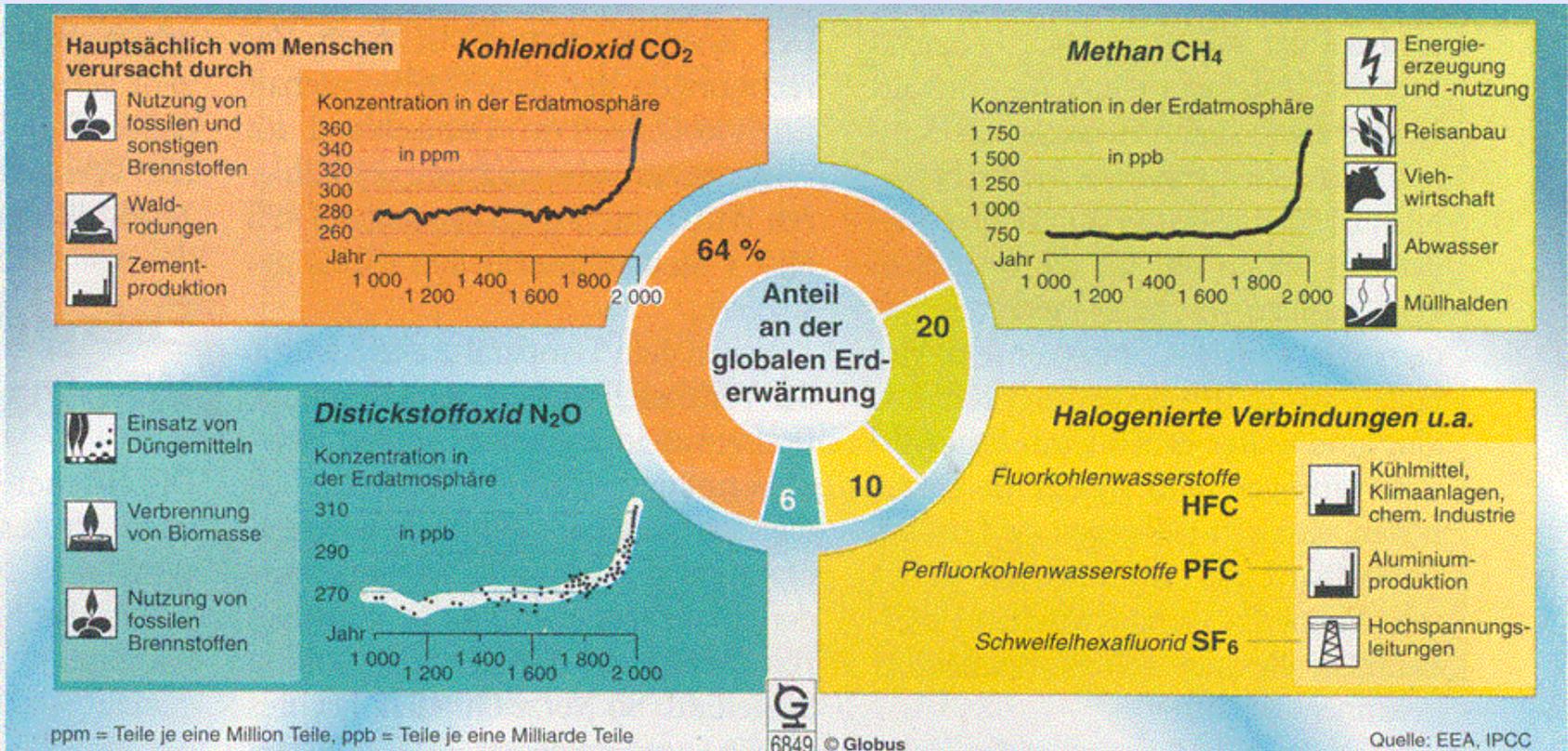
Quelle: GeoRisikoForschung, Münchener Rück, 2003

# Volkswirtschaftliche und versicherte Schäden durch große Naturkatastrophen 1950 – 2002, weltweit



Quelle: GeoRisikoForschung, Münchener Rück, 2003

# Anteile verschiedener Gase am Treibhauseffekt



# Emissionsreduktion klimarelevanter Gase in der EU und in Deutschland

## Verpflichtung der EU auf der UN-Klimavertragsstaatenkonferenz 1997 in Kyoto

- Reduktion des Ausstoßes von Treibhausgasen im Zeitraum 2008 bis 2012 gegenüber 1990 um 8 %
- Lastenverteilung innerhalb der EU:  
Emissionsminderungsverpflichtung Deutschlands: 21 %

## Status der Emissionsreduktion in Deutschland 2003

- Stagnation bei einer Reduktion von rund 19 %

## Maßnahme der EU zur Förderung weiterer Emissionsreduktionen

- Einführung eines Handels mit Emissionsrechten ab 2005 in der EU (ab 20 MW Feuerungsleistung)

# Maßnahmen zur Reduktion der energiebedingten Kohlendioxid-Emissionen

1. Reduktion des **Nutzenergieverbrauches**
2. Erhöhung der **Effizienz** von Energiewandlung und Energieanwendung
3. Stärkere Nutzung **kohlenstoffarmer Primärenergien**, wie z. B. Erdgas, und **kohlenstofffreier Primärenergien**, wie z. B. Kernkraft und Erneuerbare Energien.
4. **Rückhaltung und Speicherung** des bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehenden Kohlendioxids

# Maximale elektrische Wirkungsgrade fossil befeuerter Kraftwerke – Status 2003 und Prognose für 2010

## Technologien der Gegenwart

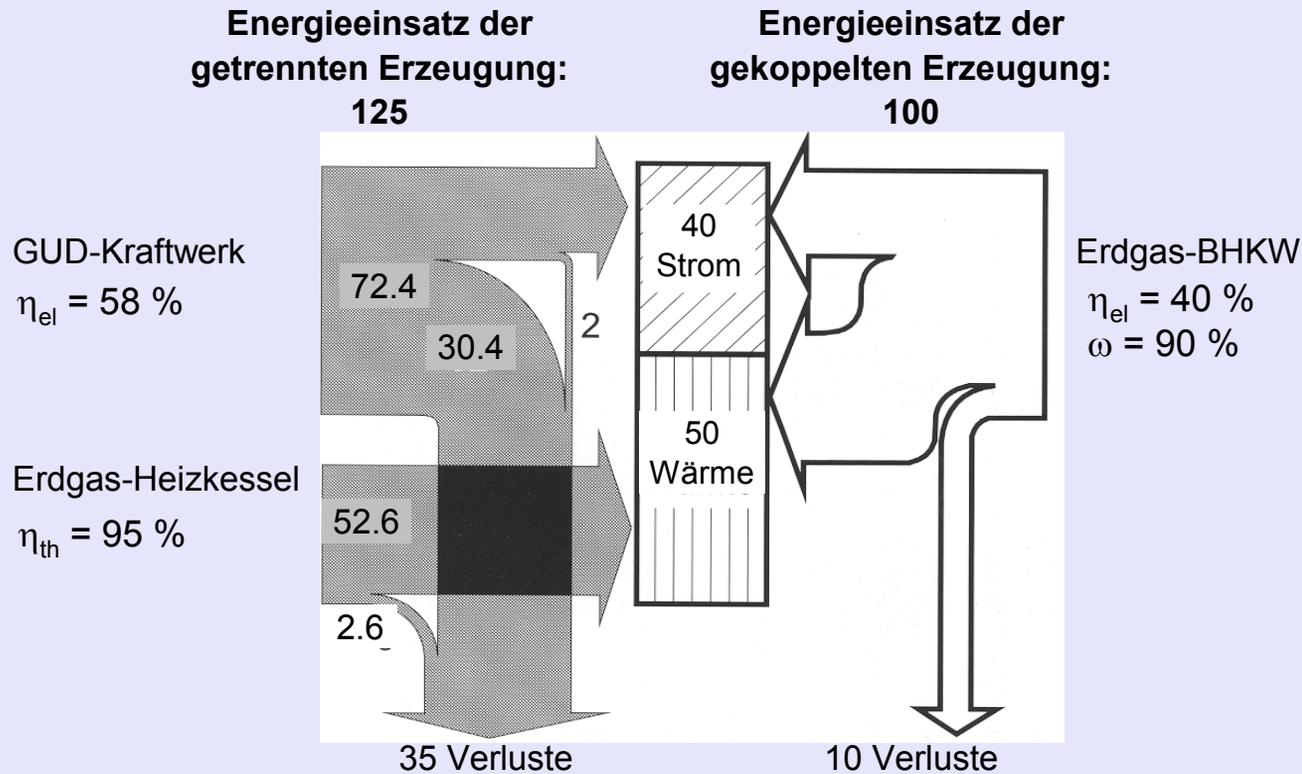
- **Dampfkraftwerk, Steinkohle: 46 %** (Prognose: 48 %)
- **Gas- und Dampfkraftwerk (GUD), Erdgas: 58 %** (Prognose: 60 %)
- **Verbrennungsmotor, Diesel: 44 %** (Prognose: 46 %)
- **Gasturbine, Erdgas: 38 %** (Prognose: 40 %)

## Zukunftstechnologien (?)

- **Brennstoffzellen, Erdgas**
  - **Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEM): 36 %** (39 %)
  - **Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC): 48 %** (Prognose: 52 % )
  - **Solid Oxide Fuel Cell (SOFC): 47 %** (Prognose: 52 % )
  - **SOFC + Gasturbine: 55 %** (Prognose: 60 % )

Bei gleichzeitiger Erzeugung von Strom und Heizwärme (Kraft-Wärme-Kopplung) können alle Kraftwerkstechnologien Brennstoffausnutzungsgrade von rund 85 % erreichen!

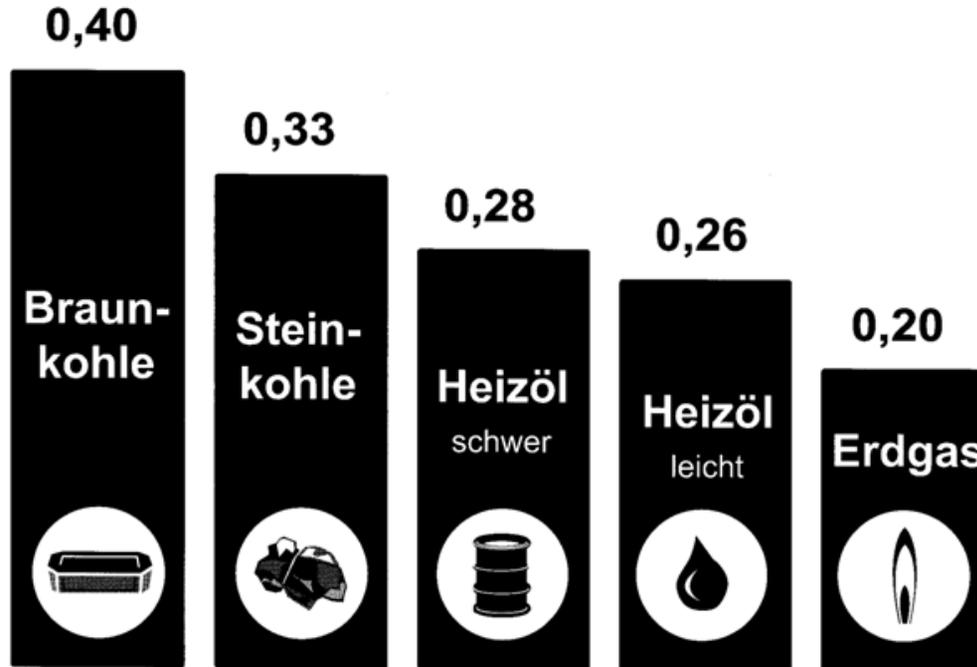
# Primärenergieeinsparung durch Kraft-Wärme-Kopplung am Beispiel eines Blockheizkraftwerkes (BHKW)



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

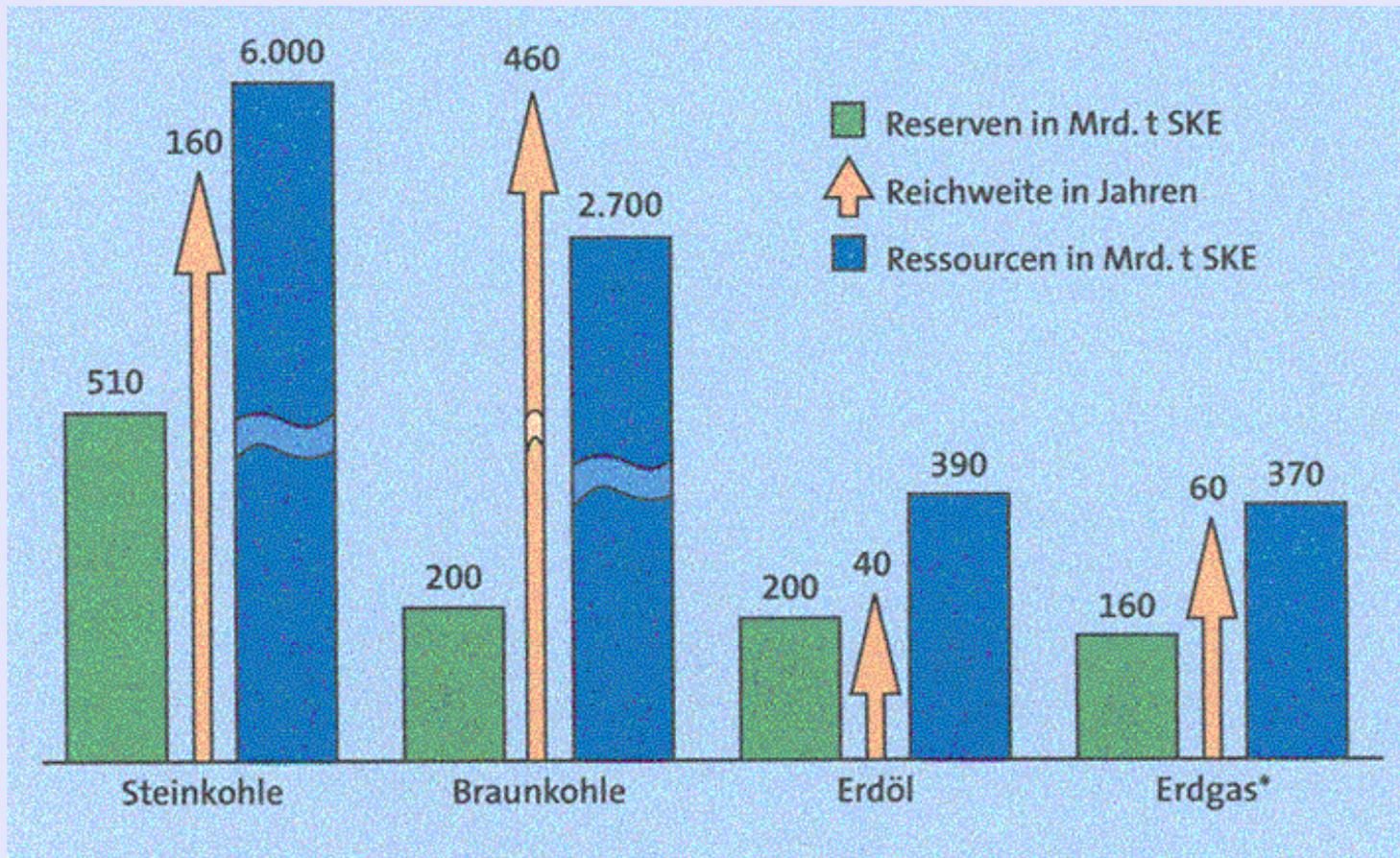
# CO<sub>2</sub>-Bildung bei der Verbrennung fossiler Energieträger

in kg CO<sub>2</sub>/kWh Brennstoffeinsatz (H<sub>u</sub>)



Quelle: Schlussbericht der Enquetekommission des Deutschen Bundestages  
"Schutz der Erdatmosphäre", Oktober 1994

# Weltweite Vorräte an Primärenergieträgern



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

# Beitrag erneuerbarer Energien zur Energieversorgung in Deutschland im Jahr 2002

	Anteil an der Gesamterzeugung (%)	Anteil am Primär- energieverbrauch (%)
Stromerzeugung	8,1	1,3
Wärmeerzeugung	3,6	1,4
Kraftstoff	0,8	0,1
<b>gesamt</b>		<b>2,8</b>

Durch erneuerbare Energien wurden im Jahr 2002 CO<sub>2</sub>-Emissionen von rund 50 Mio. t (5 %) vermieden.

## Ziele der Bundesregierung

Anteil an der Stromerzeugung bis 2010 (2020): 12,5 % (20 %)

Anteil am Primärenergieverbrauch bis 2010 (2020): 4,2 % (10 %)

Quelle: BMU, Erneuerbare Energien in Zahlen, März 2003

# Belastung der Stromkunden durch das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)

Jahr	Mrd. €
1998	0,28
1999	0,26
2000	0,86
2001	1,18
2002	1,65
2003*	1,94

\*geschätzt

Im Jahr 2002 wurden entsprechend EEG rund 25 Mrd. kWh mit durchschnittlich 8,9 ct/kWh vergütet (Marktpreis 2,5 ct/kWh). Die Belastung der Stromkunden betrug demnach rund 0,3 ct/kWh. Für Privathaushalte ergaben sich dadurch Zusatzkosten in Höhe von rund 10 €/a.

Quelle: VDEW, 2003

# Konzepte zur Rückhaltung des bei der Verbrennung fossiler Brennstoffe entstehenden Kohlendioxids

## 1. Abtrennung vor der Verbrennung (Pre-Combustion Capture)

Erzeugung eines wasserstoffreichen Brenngases durch Reformierung, Pyrolyse, partielle Oxidation oder Vergasung. Das Kohlendioxid kann mit vergleichsweise geringem Aufwand vor der Verbrennung aus dem Brenngas abgetrennt werden.

## 2. Abtrennung nach der Verbrennung (Post-Combustion Capture)

Abtrennung des Kohlendioxids nach der Verbrennung aus den Verbrennungsgasen durch Absorption, Adsorption oder Membrantrennung.

**Verminderung des Abtrennungsaufwandes durch Erhöhung des Kohlendioxidanteils und Reduktion der Anzahl anderer Stoffe in den Verbrennungsgasen:**

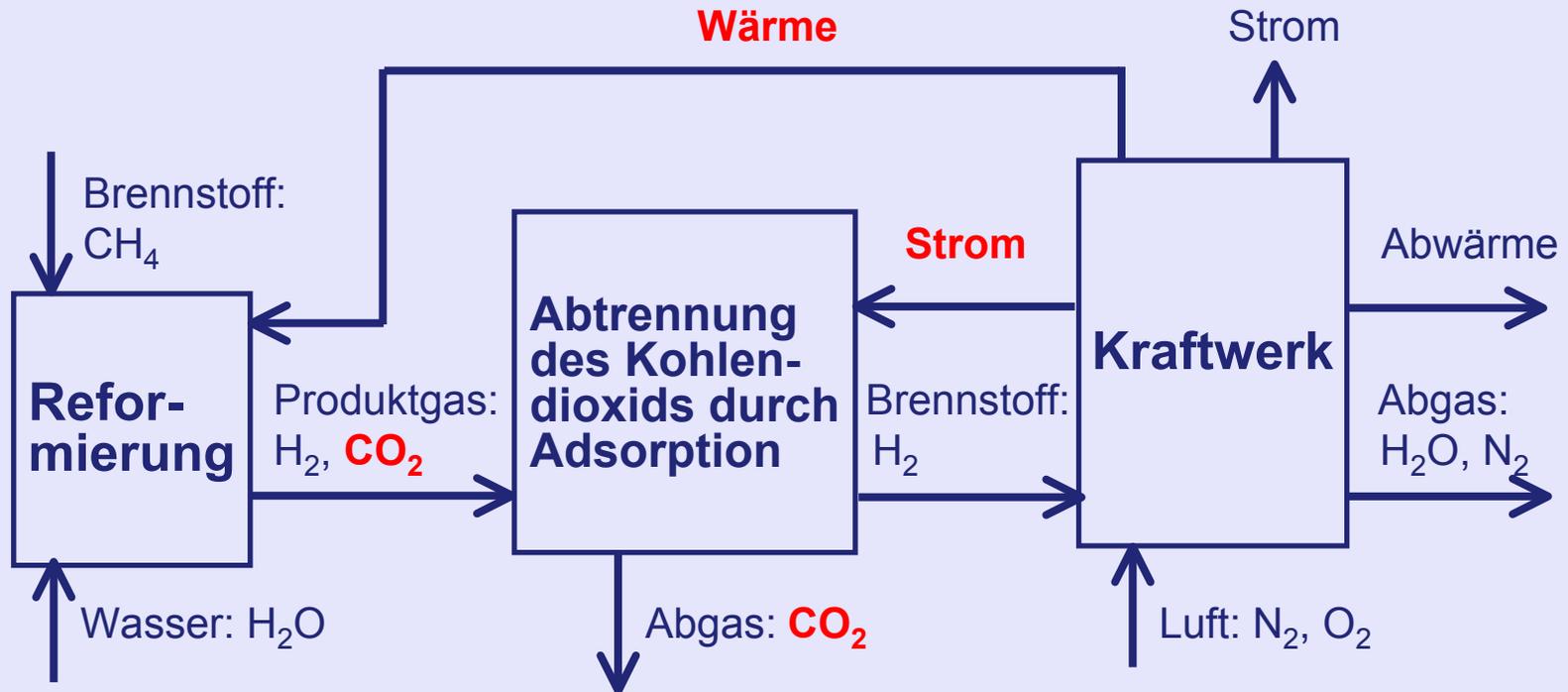
### a) Verbrennung mit reinem Sauerstoff (Oxy-Fuel Firing)

Gewinnung des Sauerstoffs durch kryogene Luftzerlegung, Adsorption oder Membrantrennung. Zumischung von zurückgeführten Verbrennungsgasen oder Wasserdampf. Abtrennung des Kohlendioxids durch Kondensation des Wassers.

### b) Verringerung des Luftüberschusses

Mehrstufige Verbrennung (Zwischenerhitzung), Zumischung von Dampf oder zurückgeführten Verbrennungsgasen.

# Abtrennung des Kohlendioxids (CO<sub>2</sub>) vor der Verbrennung am Beispiel eines erdgasbefeuerten Kraftwerksprozesses



Methanreformierung:

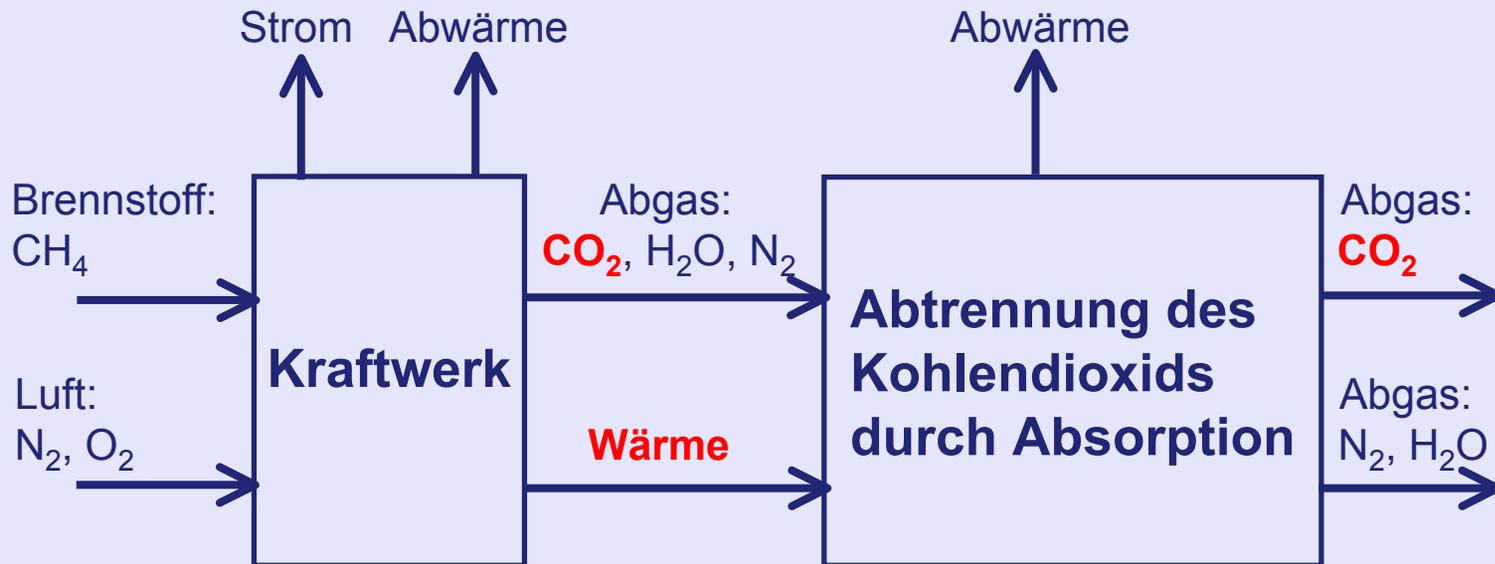


Verbrennungsgleichung:



**Wirkungsgradverlust durch CO<sub>2</sub>-Rückhaltung:  $\Delta\eta = 7...11$  %-Pkt.**

# Abtrennung des Kohlendioxids (CO<sub>2</sub>) nach der Verbrennung bei Einsatz von Luft für die Verbrennung

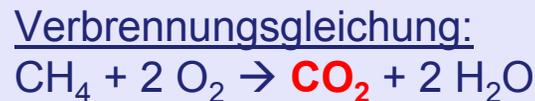
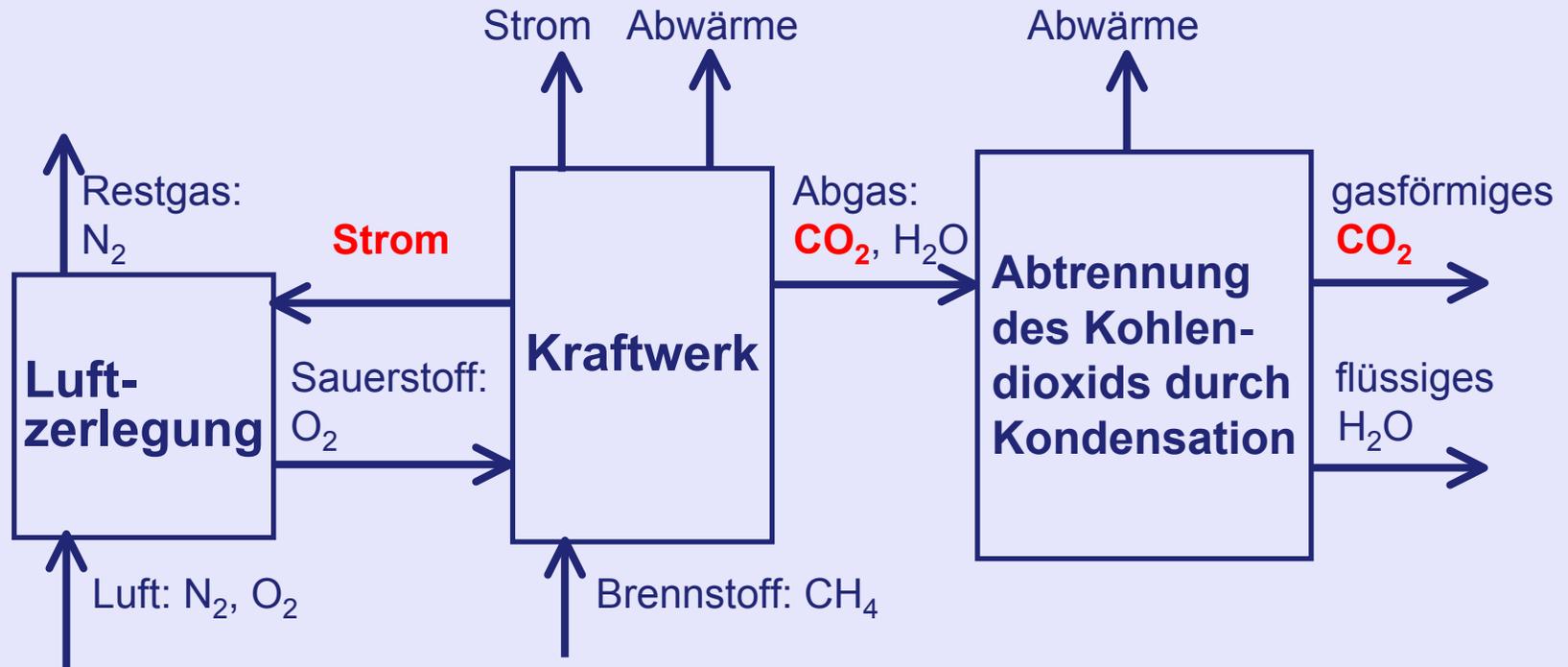


Verbrennungsgleichung:



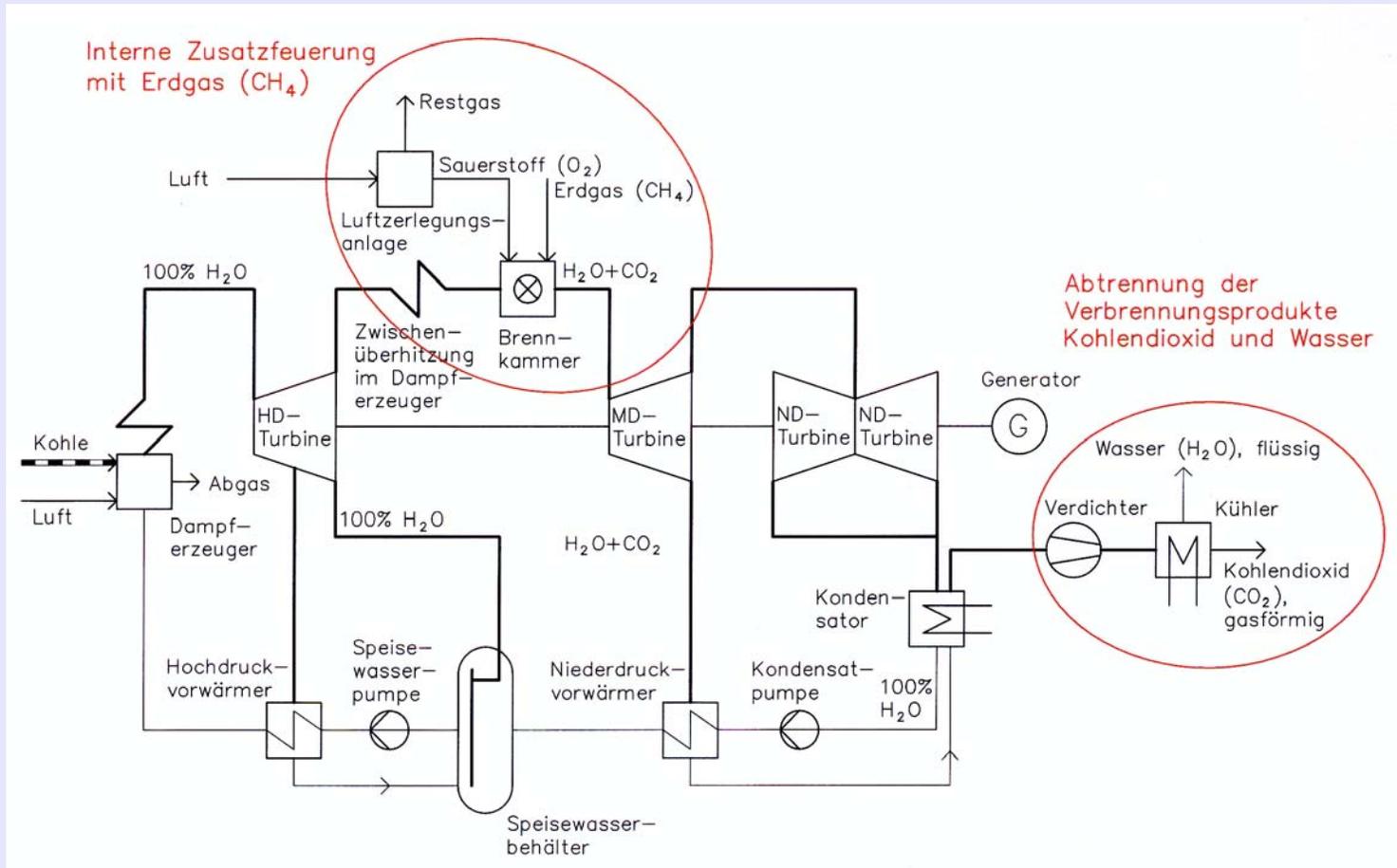
Wirkungsgradverlust durch CO<sub>2</sub>-Rückhaltung:  $\Delta\eta = 10...14 \text{ \%-Pkt.}$

# Abtrennung des Kohlendioxids (CO<sub>2</sub>) nach der Verbrennung bei Einsatz von reinem Sauerstoff für die Verbrennung

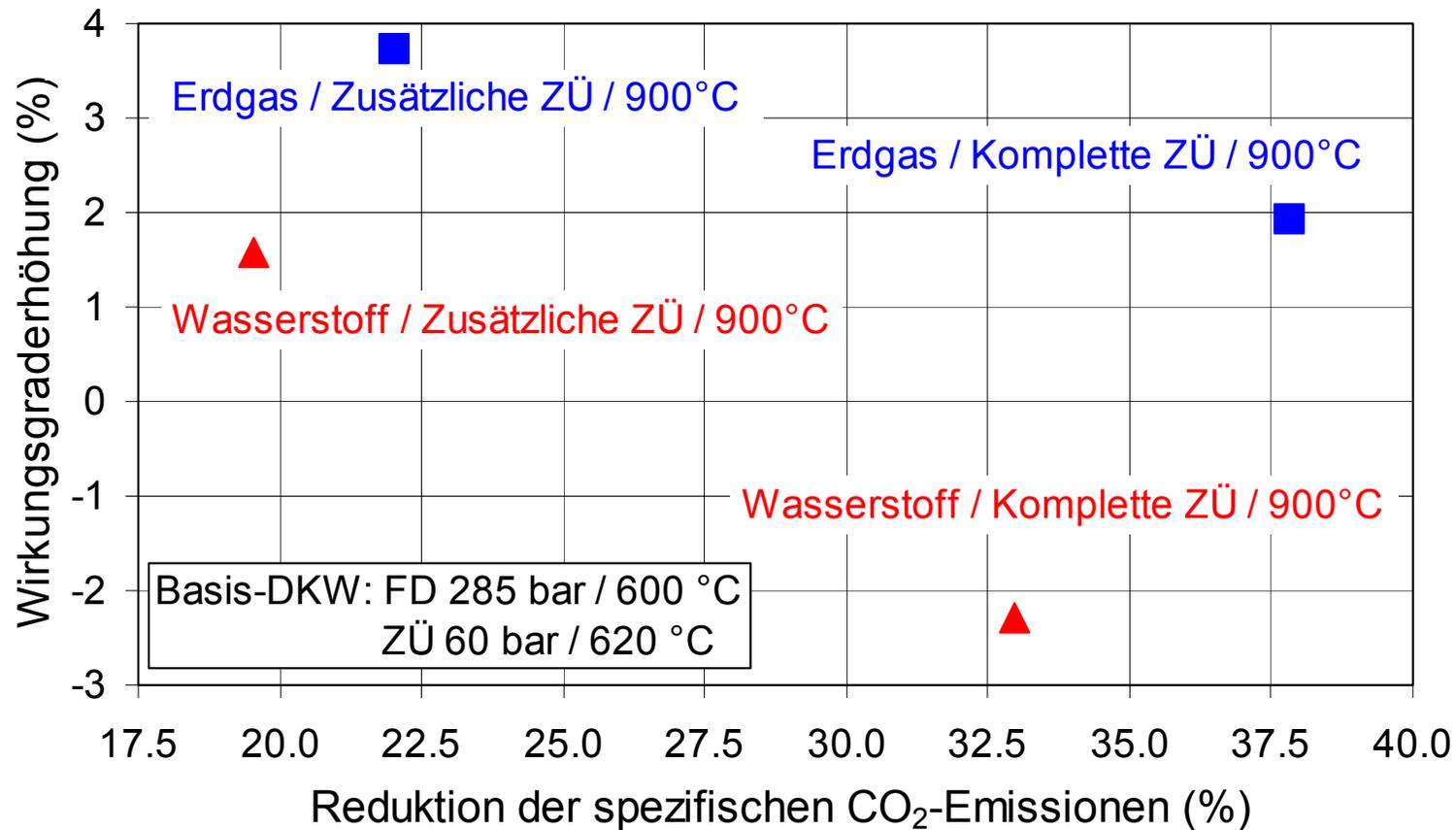


Wirkungsgradverlust durch CO<sub>2</sub>-Rückhaltung:  $\Delta\eta = 7...11 \%$ -Pkt.

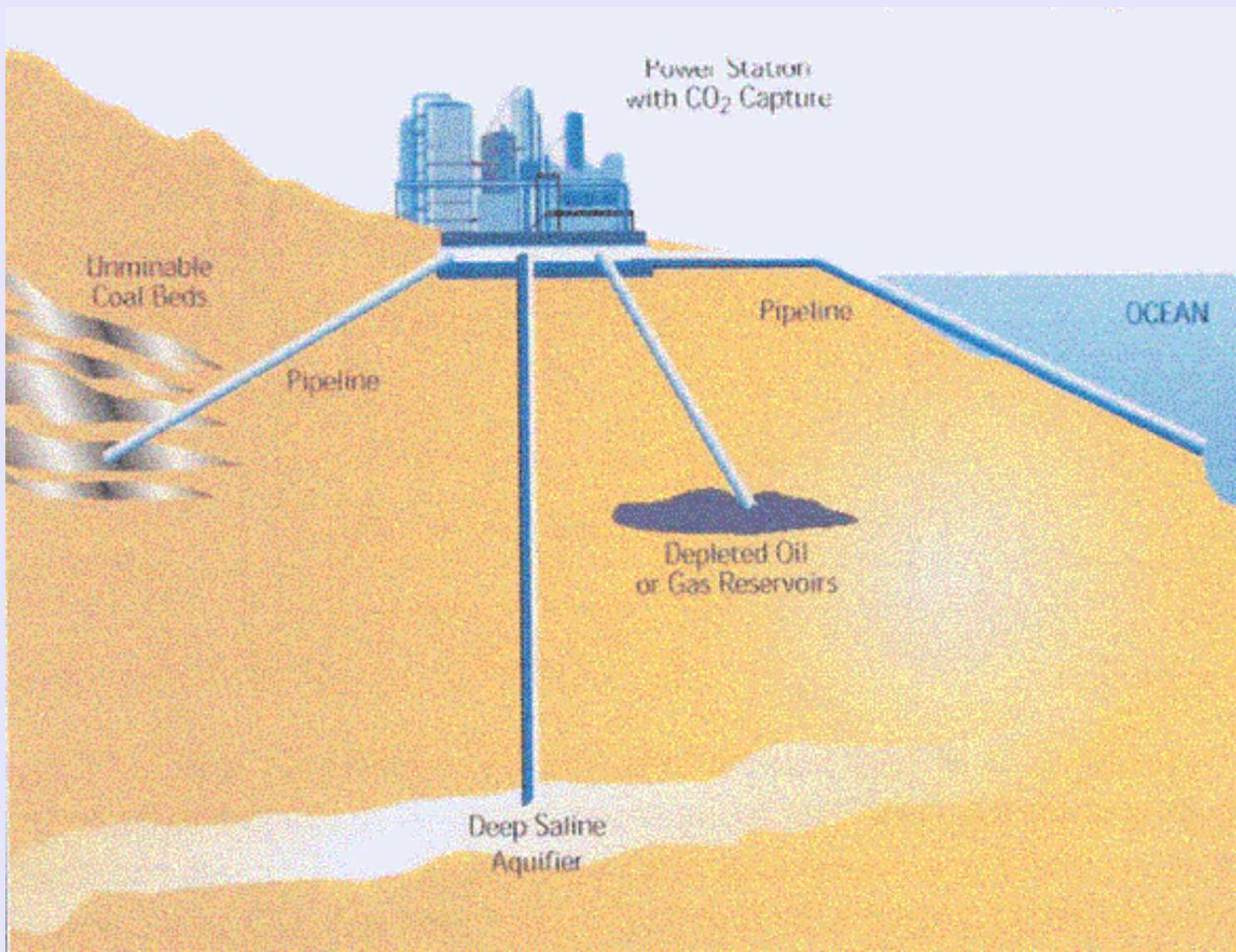
# Dampfkraftwerk mit interner Zusatzfeuerung mit Erdgas in der Zwischenüberhitzung (Erfindung an der FH Südwestfalen)



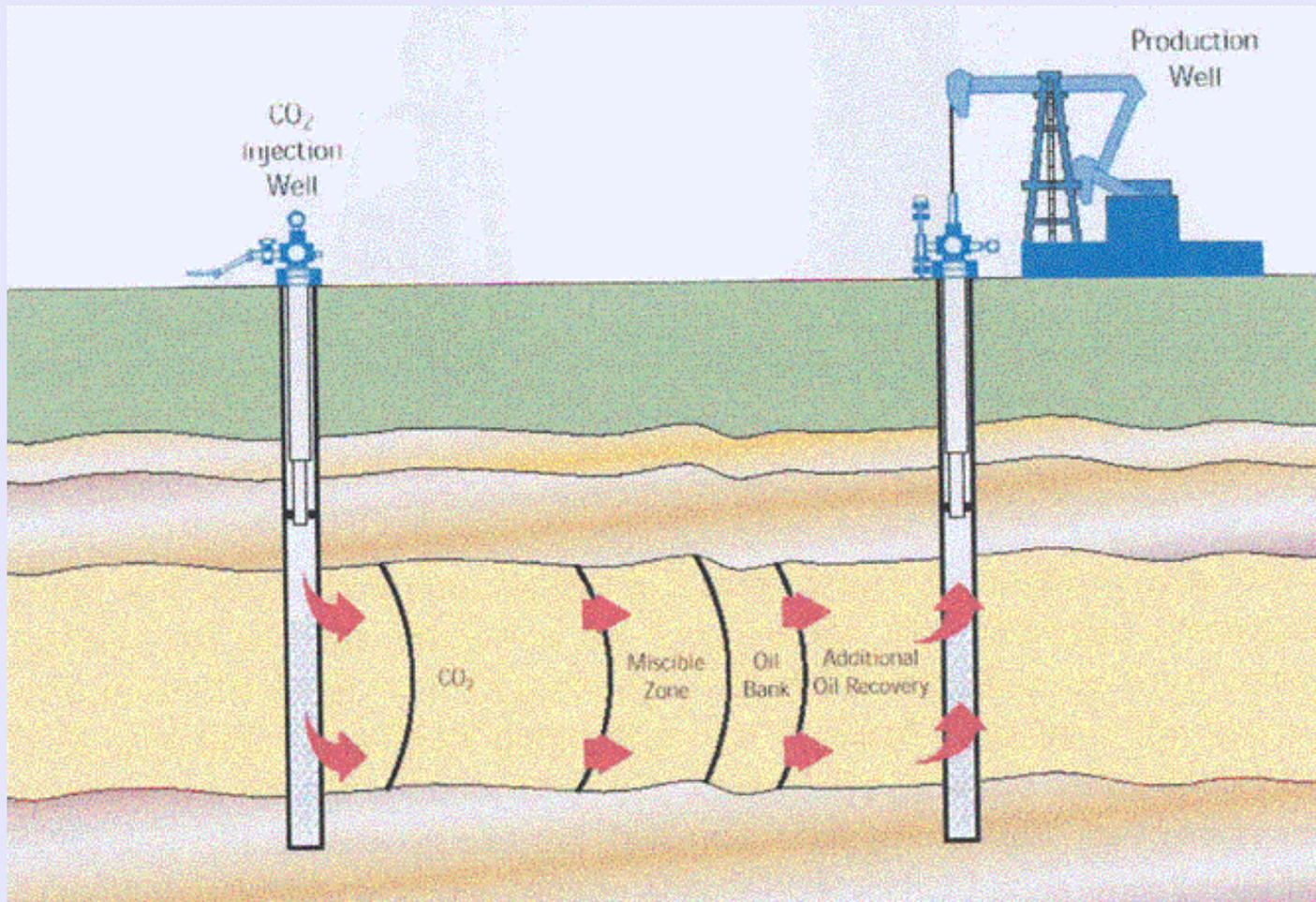
# Wirkungsgraderhöhung und Reduktion der spez. CO<sub>2</sub>-Emissionen durch interne Zusatzfeuerung



# Varianten der Speicherung von Kohlendioxid



# Einsatz von Kohlendioxid in der Ölgewinnung (EOR: Enhanced Oil Recovery)



# Erhöhung der Stromerzeugungskosten durch CO<sub>2</sub>-Rückhaltung und -Speicherung

Bei zur Zeit geschätzten Kosten für die CO<sub>2</sub>-Rückhaltung und -Speicherung in Höhe von **40 €/t<sub>CO2</sub>** ergeben sich folgende Erhöhungen der Stromerzeugungskosten (SEK):

Braunkohle-DKW mit CO <sub>2</sub> -Rückhaltung ( $\eta = 34 \%$ ):	$\Delta\text{SEK} = 4,7 \text{ ct/kWh}$
Steinkohle-DKW mit CO <sub>2</sub> -Rückhaltung ( $\eta = 36 \%$ ):	$\Delta\text{SEK} = 3,7 \text{ ct/kWh}$
Erdgas-GUD mit CO <sub>2</sub> -Rückhaltung ( $\eta = 50 \%$ ):	$\Delta\text{SEK} = 1,6 \text{ ct/kWh}$

# Erhöhung der Stromerzeugungskosten durch den Handel mit Emissionsrechten in der EU ab 2005

Die Zuteilung der Basis-Emissionsrechte wird zunächst kostenlos erfolgen. Für auferlegte Emissionsreduktionen müssen technische Maßnahmen ergriffen oder zusätzliche Emissionsrechte erworben werden. Zu Beginn des Handels werden Preise für Emissionsrechte in Höhe von rund **10 €/t<sub>CO2</sub>** erwartet. **Die Kosten des Stroms, für den zusätzliche Emissionsrechte gekauft werden müssen, steigen dadurch um:**

Braunkohle-DKW ( $\eta = 44 \%$ ):	$\Delta\text{SEK} = 0,9 \text{ ct/kWh}$
Steinkohle-DKW ( $\eta = 46 \%$ ):	$\Delta\text{SEK} = 0,7 \text{ ct/kWh}$
Erdgas-GUD ( $\eta = 58 \%$ ):	$\Delta\text{SEK} = 0,3 \text{ ct/kWh}$

# Zusammenfassung

1. Zur Vermeidung globaler Klimaänderungen und Naturkatastrophen erscheint es sinnvoll, die Emission von Treibhausgasen zu reduzieren.
2. Die Verminderung des Nutzenergieverbrauches, Effizienzsteigerungen sowie die Nutzung kohlenstoffarmer und kohlenstofffreier Primärenergien sind geeignete Maßnahmen zur Reduktion der Kohlendioxidemissionen.
3. Technologien zur Rückhaltung und Speicherung von Kohlendioxid befinden sich zur Zeit in der Entwicklung und werden erst mittelfristig zum Einsatz kommen.
4. Die Emissionsreduktionen führen zu steigenden Stromerzeugungskosten.

**Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!**

**Download der Vortragsbilder unter:  
[www.meschede.fh-swf.de/public/kail](http://www.meschede.fh-swf.de/public/kail)**