

# Stromerzeugung ohne CO<sub>2</sub> Ausstoß in die Erdatmosphäre

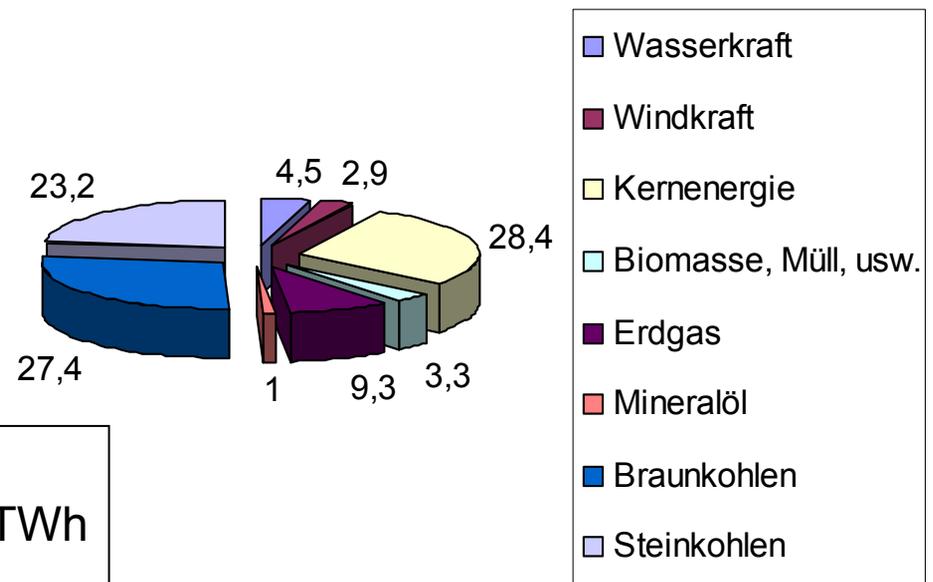
CO<sub>2</sub>-Reduktions-Technologie,  
COORETEC

- Motivation
- Stand der Technik
  - Dampfkraftwerk.
  - GuD- oder Kombikraftwerk, engl. Combined Cycle.
  - Integrated Gasification Combined Cycle, IGCC.
  - CO<sub>2</sub>-Abscheidung
- Aktuelle Forschungsthemen, COORETEC
  - Kreislaufoptimierung
  - Werkstoffforschung
  - CO<sub>2</sub>-Abscheidung und Speicherung
- Ökonomie und Zusammenfassung

# Energiebedarf und Primärenergiequellen.

- **Kohlenstoffhaltige Brennstoffe:** Kohlen, Erdgas, Erdöl, Biomasse, Müll, Methanhydrat
- Erdwärme
- **Windkraftwerke**
- Sonnenlicht
- **Wasserkraft**
- **Kernspaltung**

Anteil an der Stromerzeugung in % im Jahr 2002

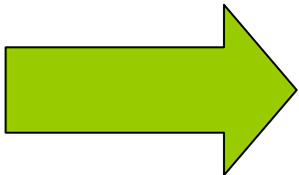


Brennstoffe: 3343 PJ  
Gesamtstromerzeugung: 581 TWh  
davon Kernkraft: 164,8 TWh

## Studien und Quellen

---

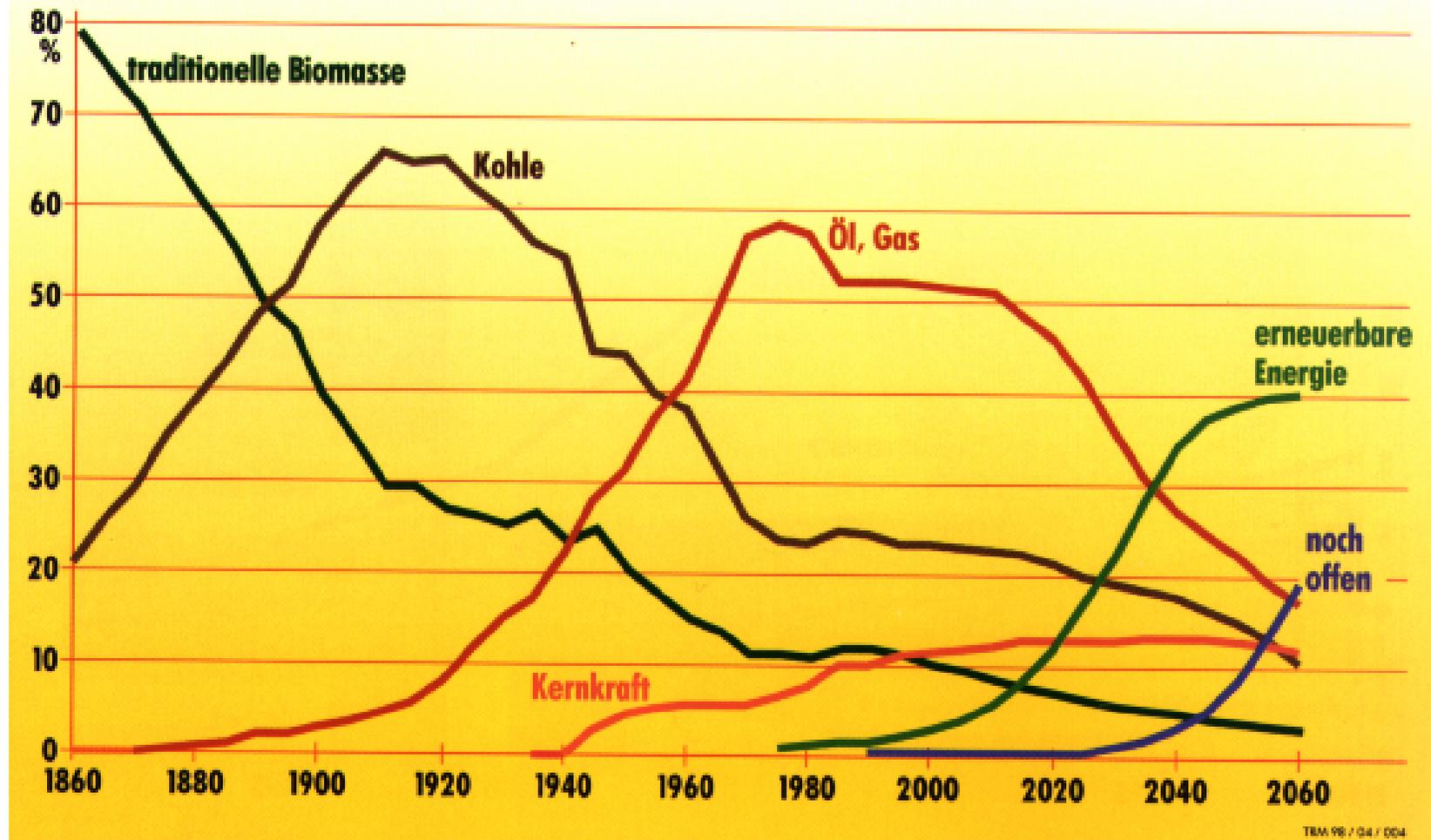
- Studien zum Energiebedarf, Shell, BP, EU, BMWA, BMBF, BMU.
- International Energy Agency, IEA
- VGB PowerTech
- Greenpeace
- Concepts of CO<sub>2</sub> removal from fossil fuelbased power generation systems, Pruscek und Göttlicher
- VGB PowerTech



politische, ökonomische, technische Randbedingungen

# Lebenszyklen von Energiequellen

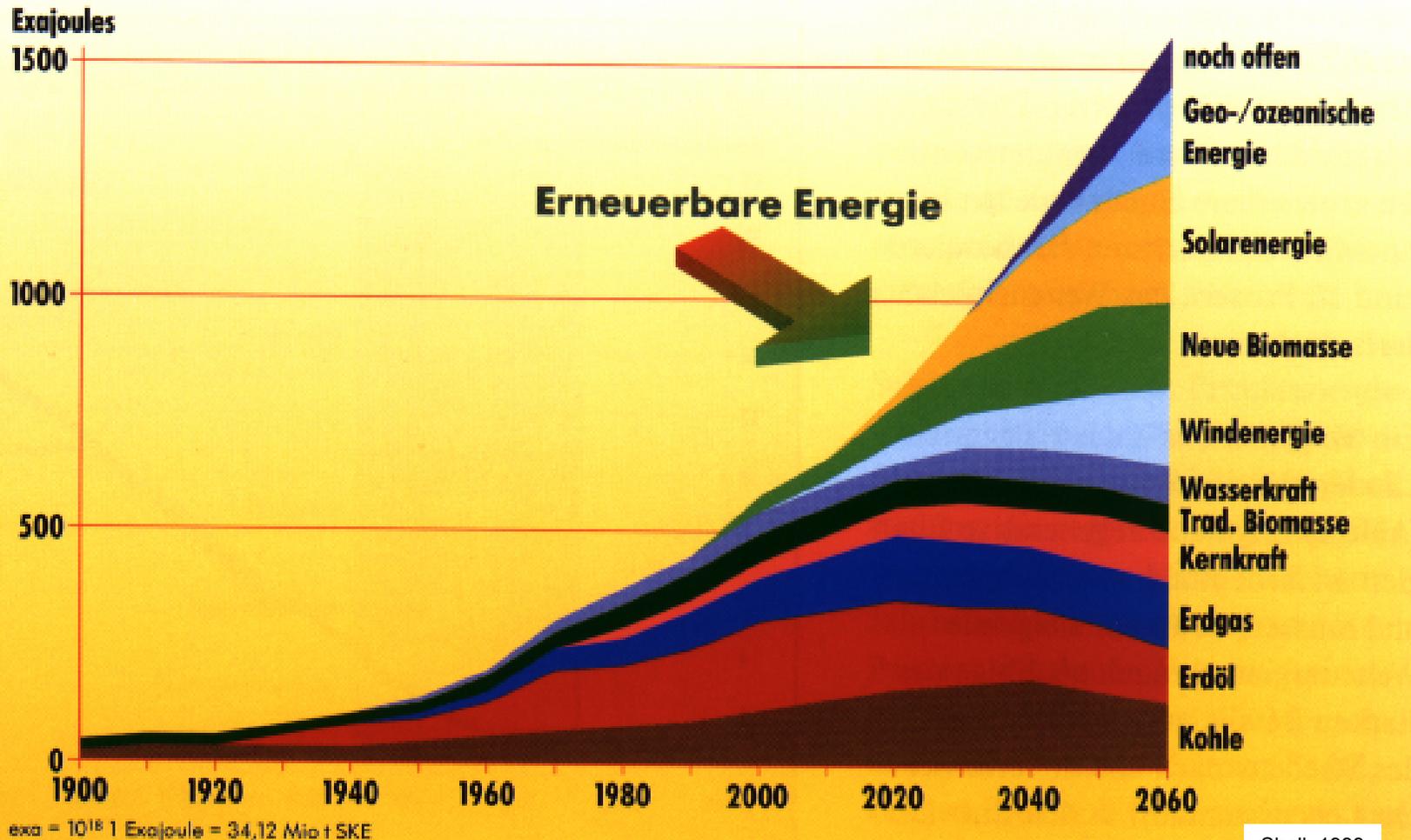
1860-2060



TBM 98 / 04 / 004

# Weltenergieverbrauch bis 2060

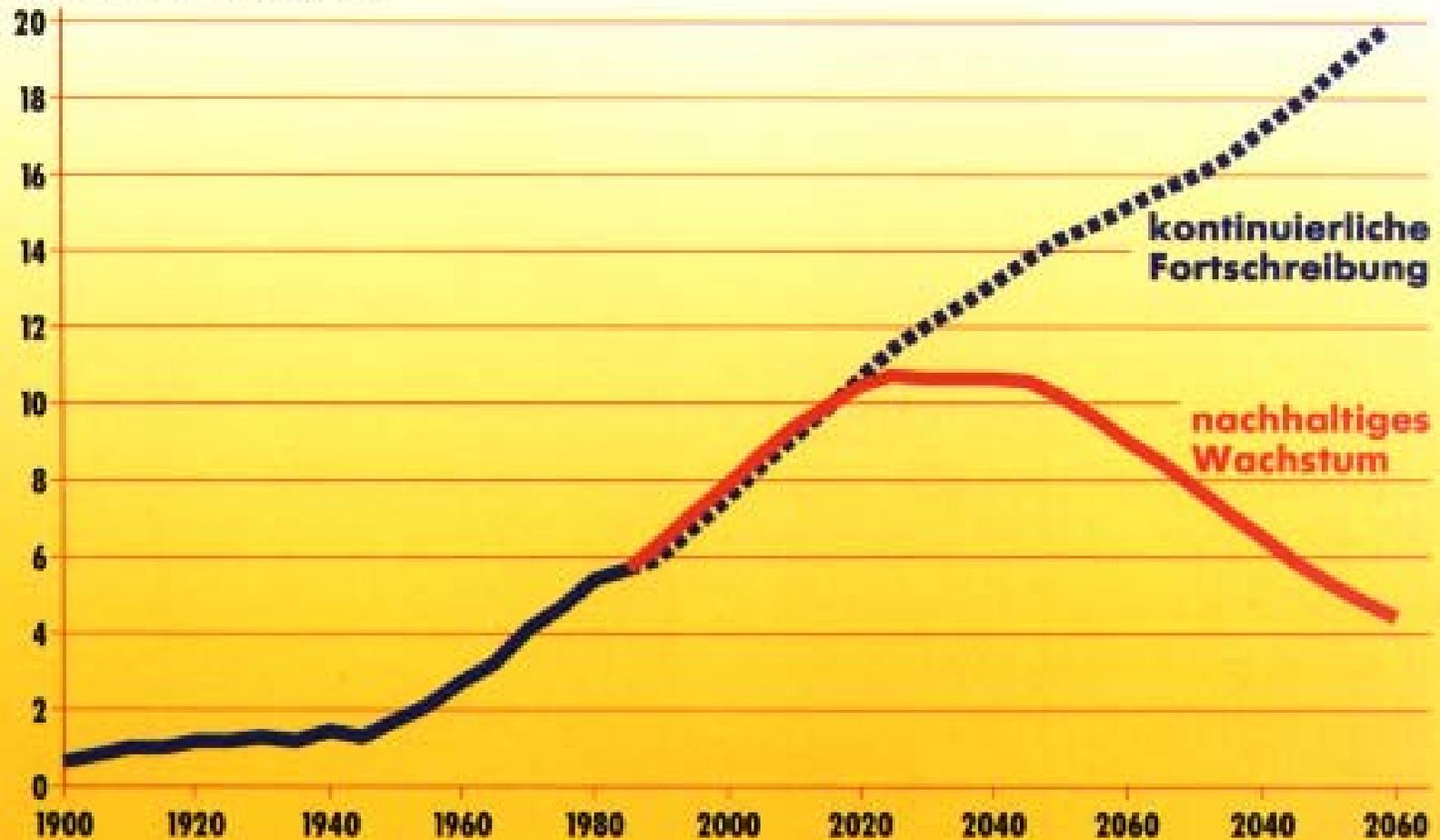
Szenario: nachhaltiges Wachstum



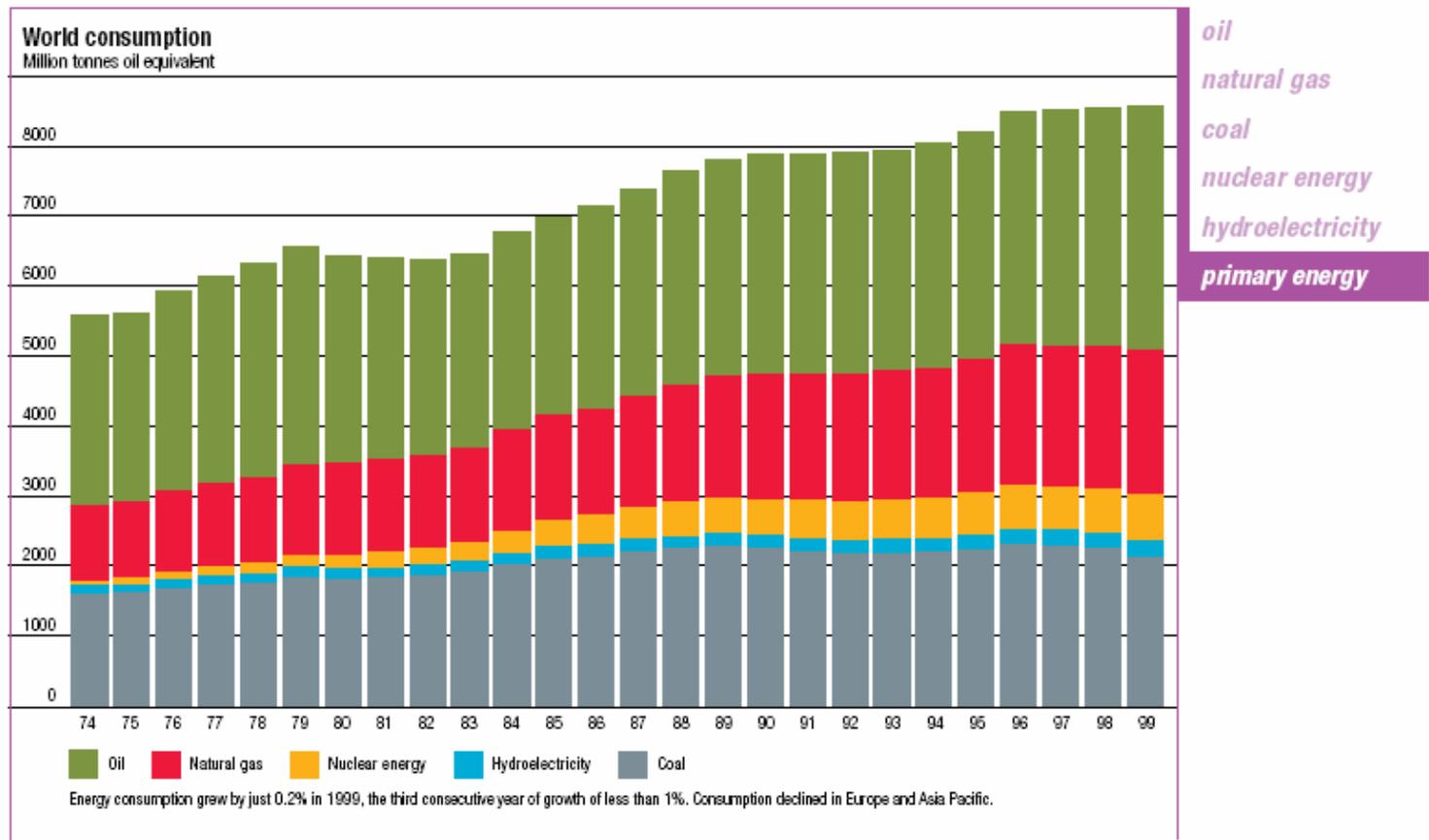
Shell, 1999

# CO<sub>2</sub>-Emissionen fossiler Energieträger

Gigatonnen Kohlenstoff pro Jahr



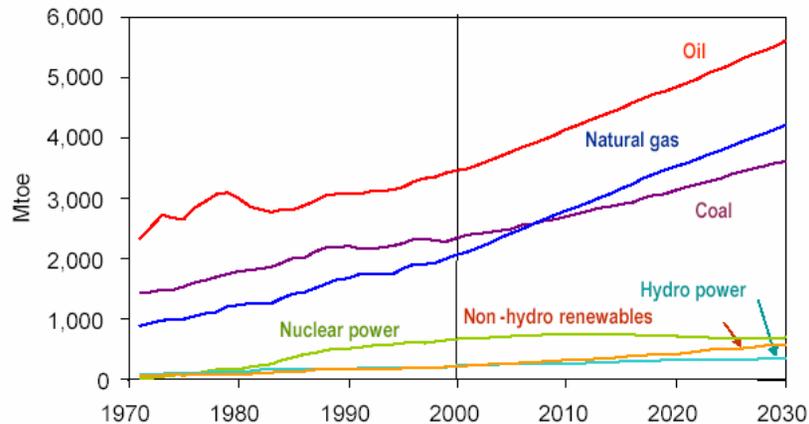
BMWi 01/104 / 2005



BP amoco energy review 2000



## World Primary Energy Demand



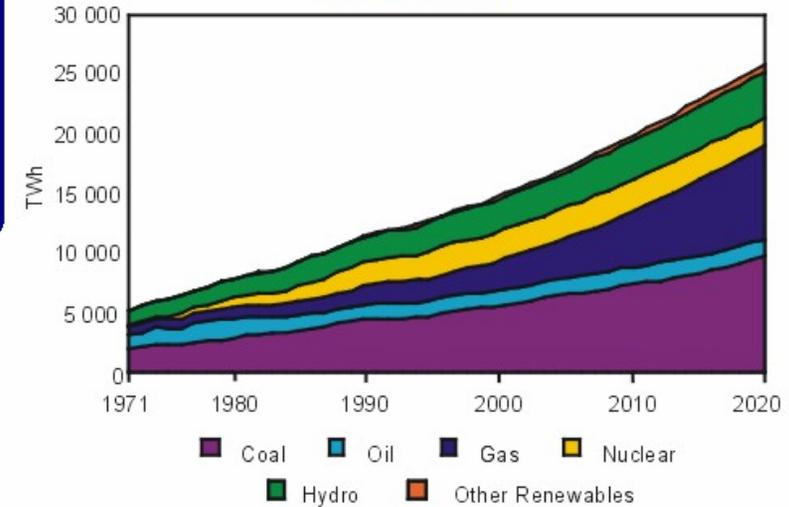
**Fossil fuels will dominate in primary energy demand until 2030**

Source: IEA World Energy Outlook, 2002

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY

AGENCE INTERNATIONALE DE L'ENERGIE

## World Electricity Generation 1971-2020



Basiert auf einer  
IEA Prognose

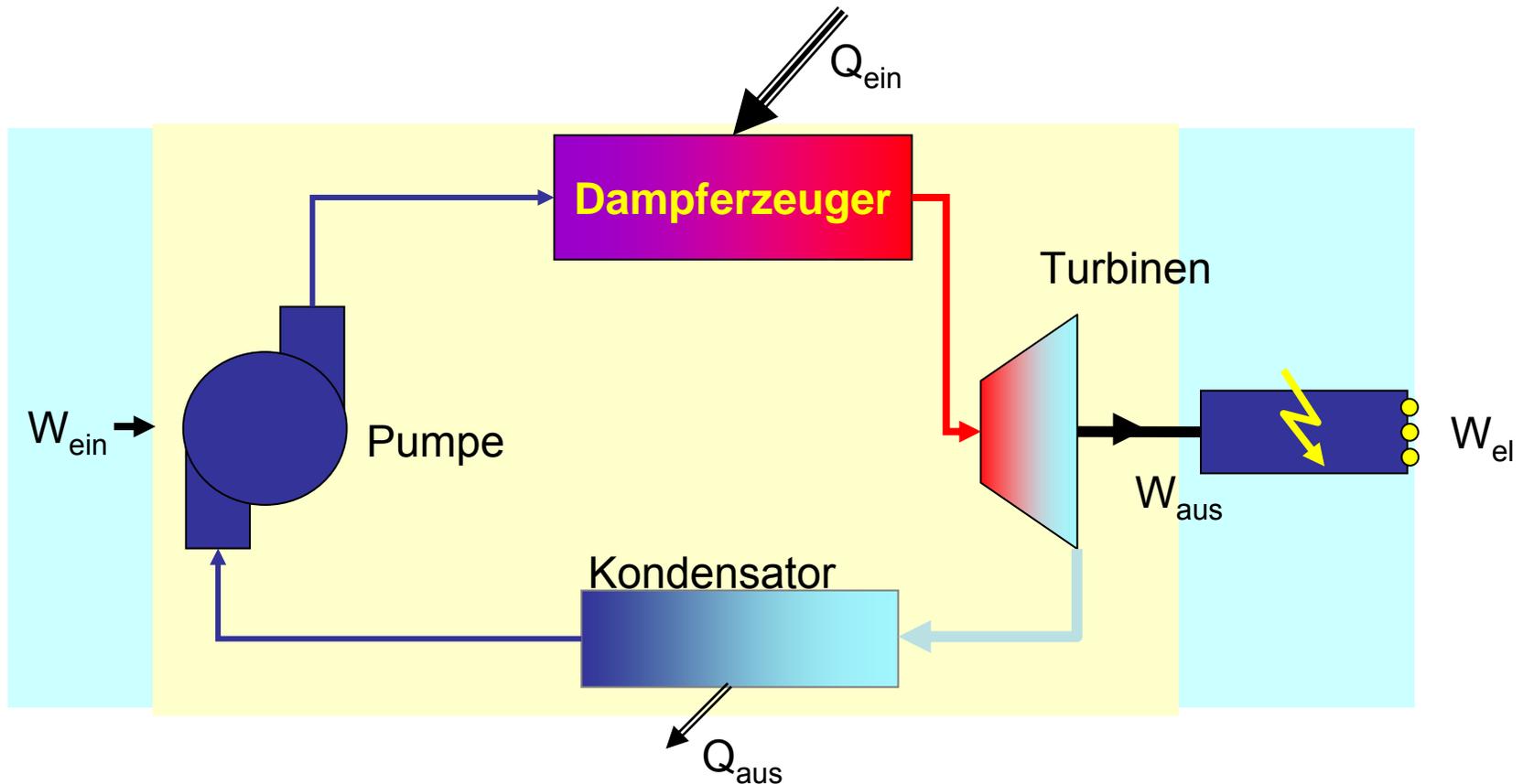
## **Schlussfolgerung:**

**Kohlenstoffhaltige Brennstoffe werden in den nächsten 20 Jahren die Hauptsäule für die Stromversorgung bleiben.**

**Die Kohlevorräte sind die größte Primärenergieträgerreserve und die Vorräte sind global verteilt.**

- Jede Verbrennung kohlenstoffhaltiger Substanzen setzt CO<sub>2</sub> frei.
- Richtlinien für die CO<sub>2</sub> Emission verschiedener Brennstoffe
  - 1 kg Mineralöl (CH<sub>2</sub>) erzeugt 3,1428 kg CO<sub>2</sub> (4,4 MJ)
  - 1 kg Kohle (C<sub>6</sub>H) erzeugt 3,6164 kg CO<sub>2</sub> (28,8 MJ)
  - 1 m<sup>3</sup> (0,8 kg) CH<sub>4</sub> erzeugt 2,2 CO<sub>2</sub> (38,4 MJ)
- Ziel: CO<sub>2</sub> abtrennen und speichern
- Heute: Wäscher SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>

# Stand der Technik und Entwicklungsmöglichkeiten der konventionellen Kraftwerkstechnik



$$\eta_{\text{th}} = 1 - Q_{\text{ein}}/Q_{\text{aus}}$$

$$\eta_{\text{el}} = 1 - W_{\text{el}}/Q_{\text{ein}}$$

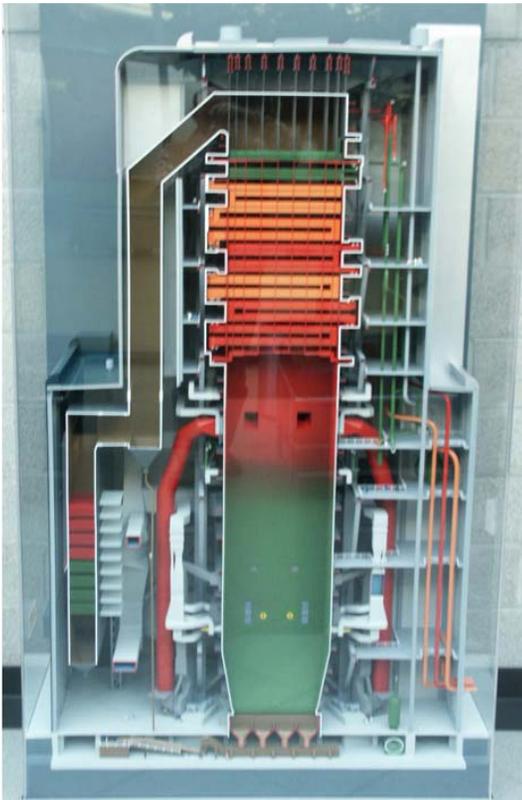
$Q$ , Wärme/J  
 $W$ , Arbeit/J

F&E Themen:

Dampf, Temperatur und Druck (z.B. 600°C, 250 bar)  
&  
Schlackenangriff (Korrosion)

Feuerung: Korrosion, Oxidation, reduzierende  
Bedingungen.

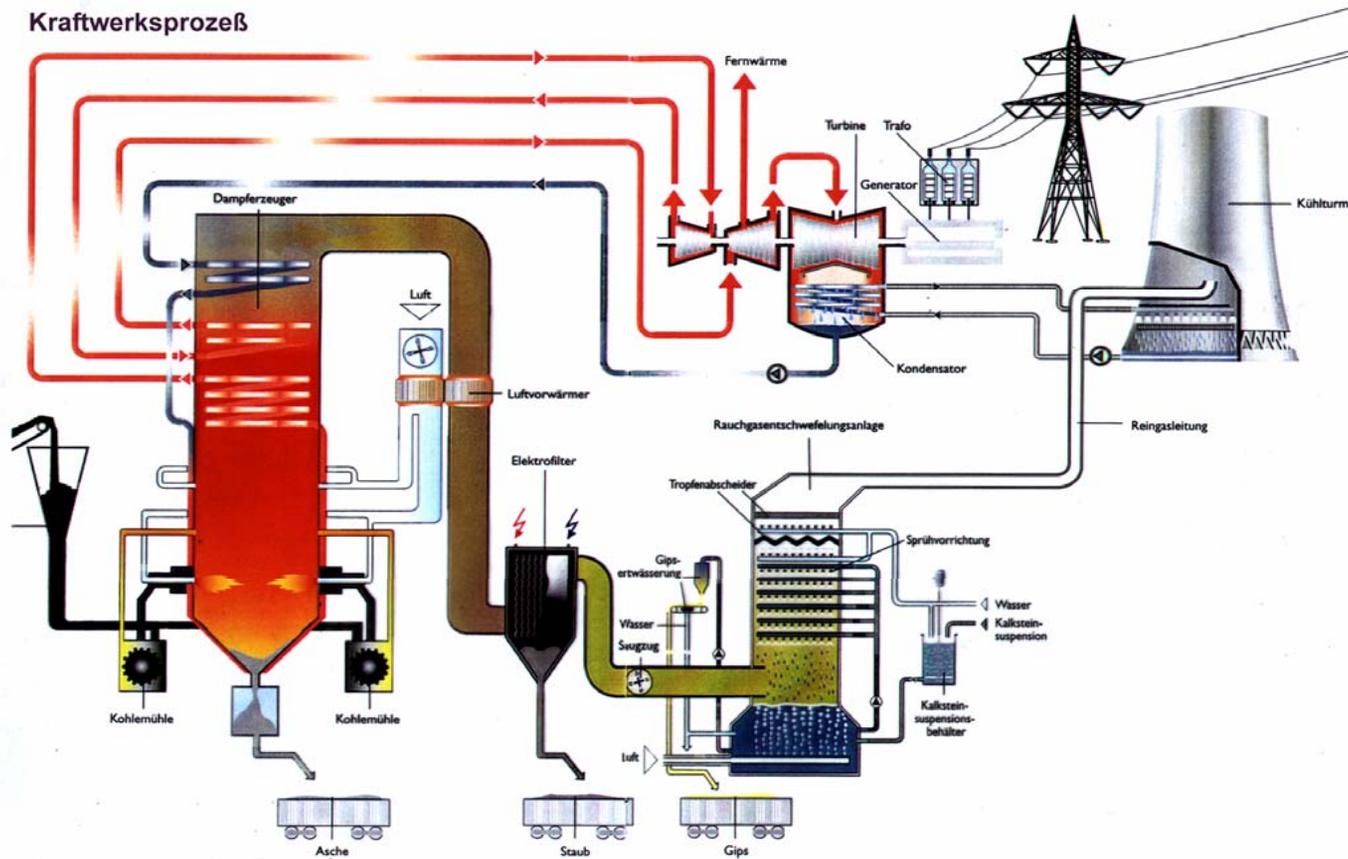
Kohlenmühlen: Verschleiß



**Modell Niederaussem 950 MW**

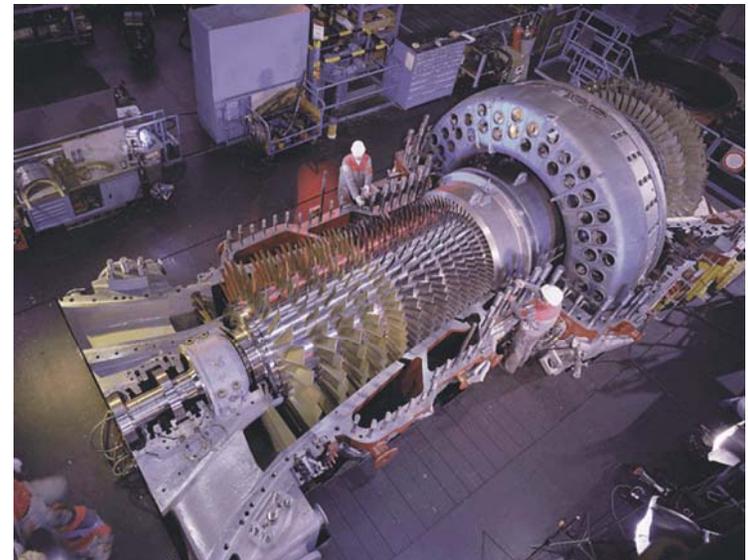
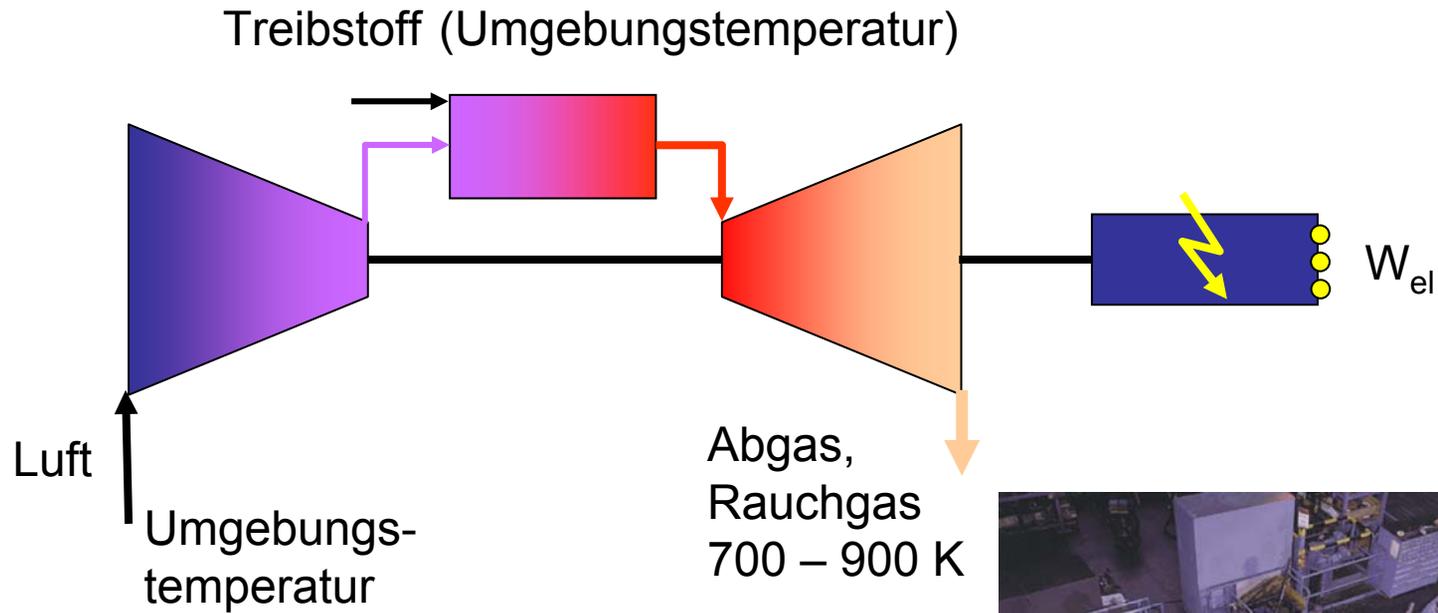
**H=198 x B= 102 x T= 58**

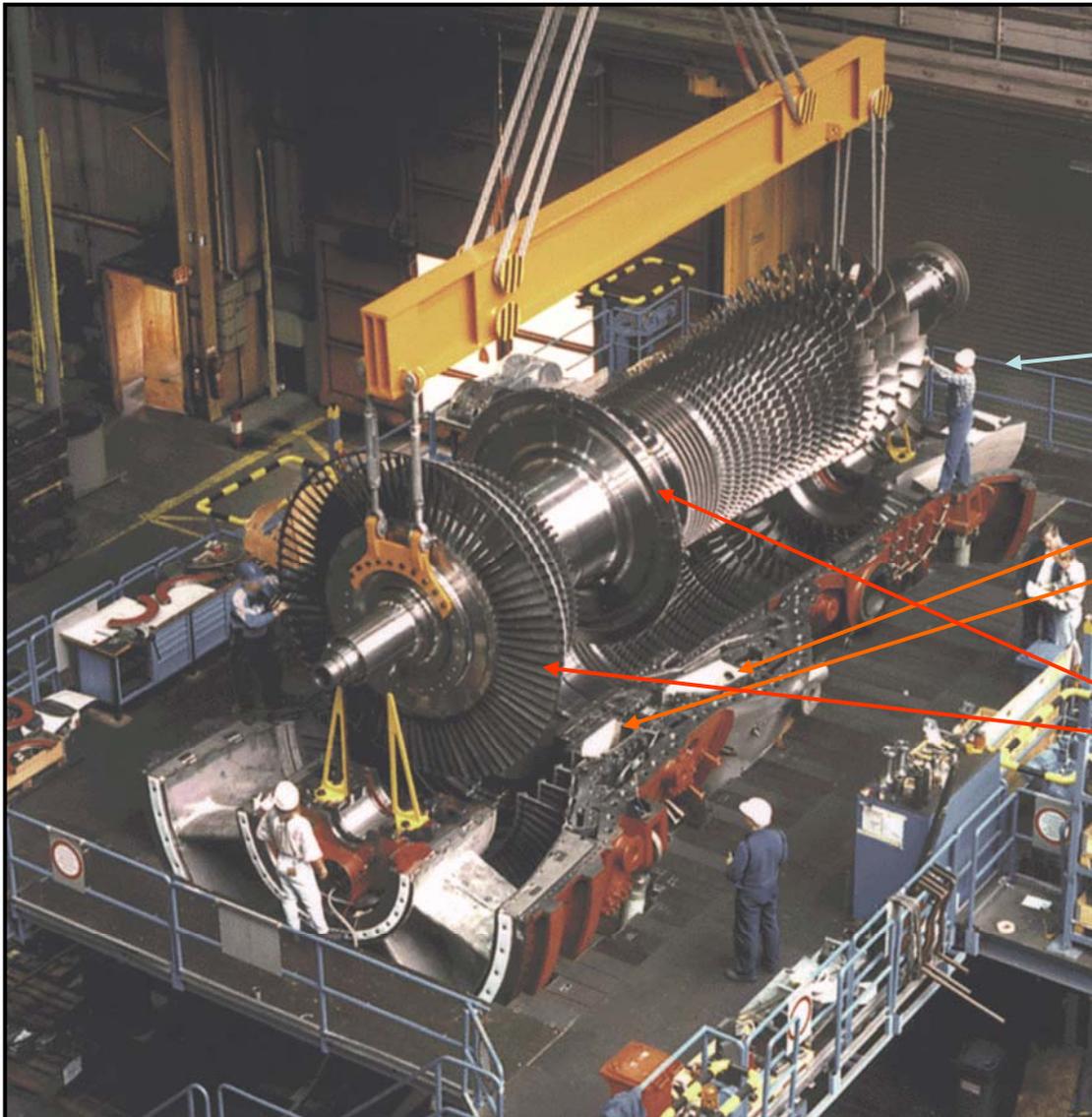
### Kraftwerksprozeß



# Kohlekraftwerk Boxberg; $\eta > 42\%$







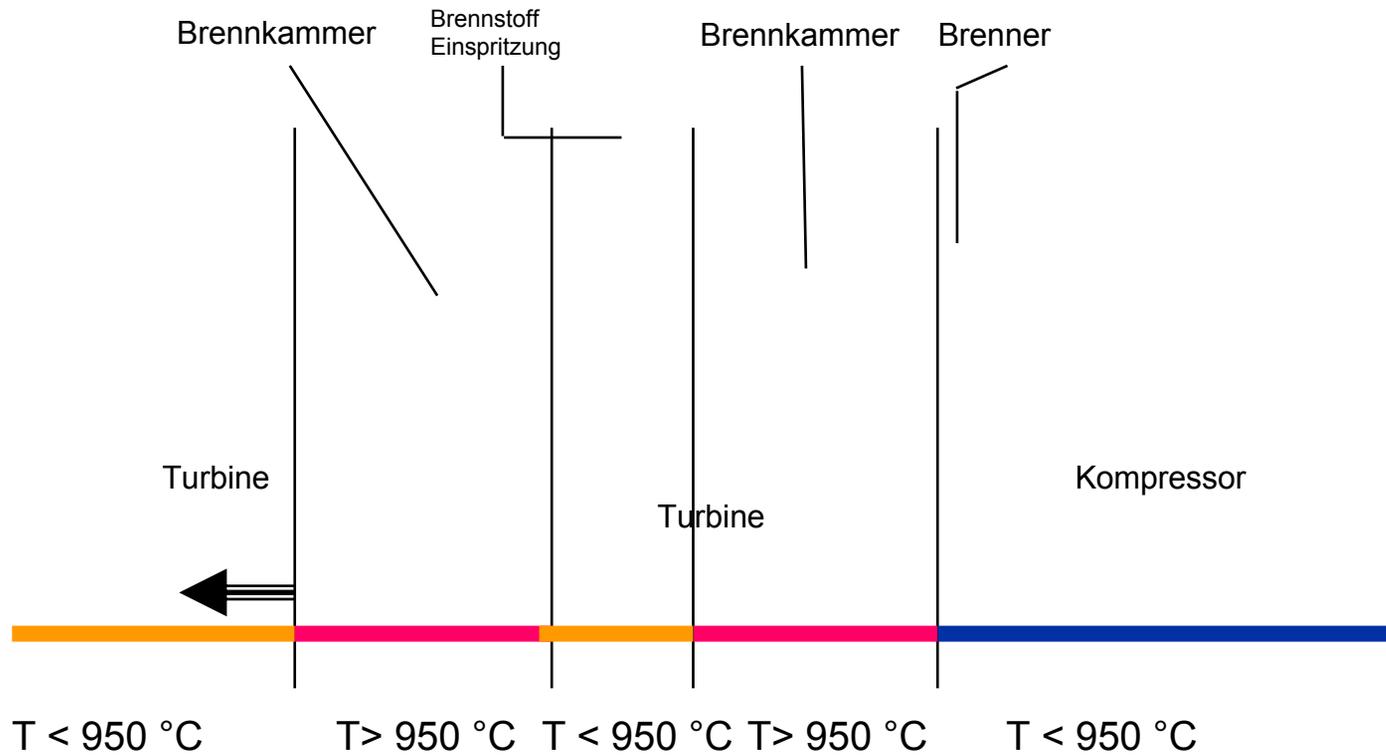
Kompressor (Beispiel ein Druckverhältnis von 32:1 bzw. 33:1)

Brennkammern

Turbine

ALSTOM GT26/24 Turbine

## Moderne ALSTOM Gasturbine GT24/GT26

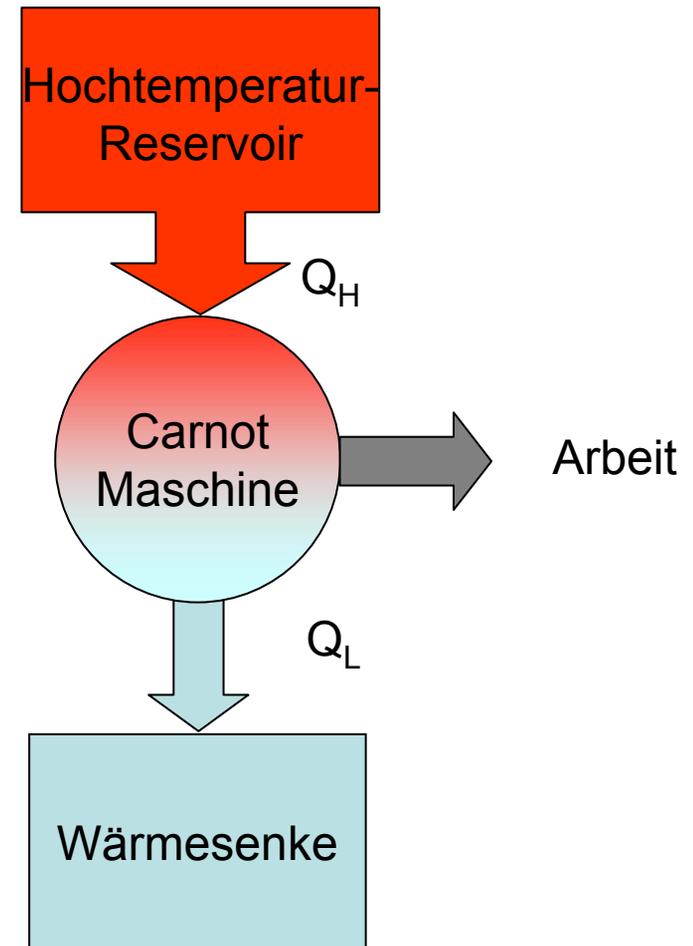
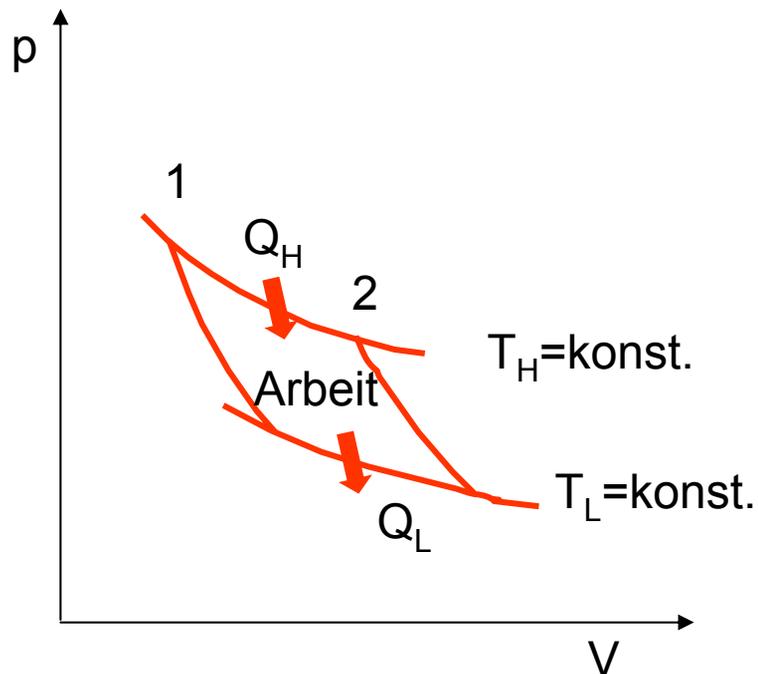


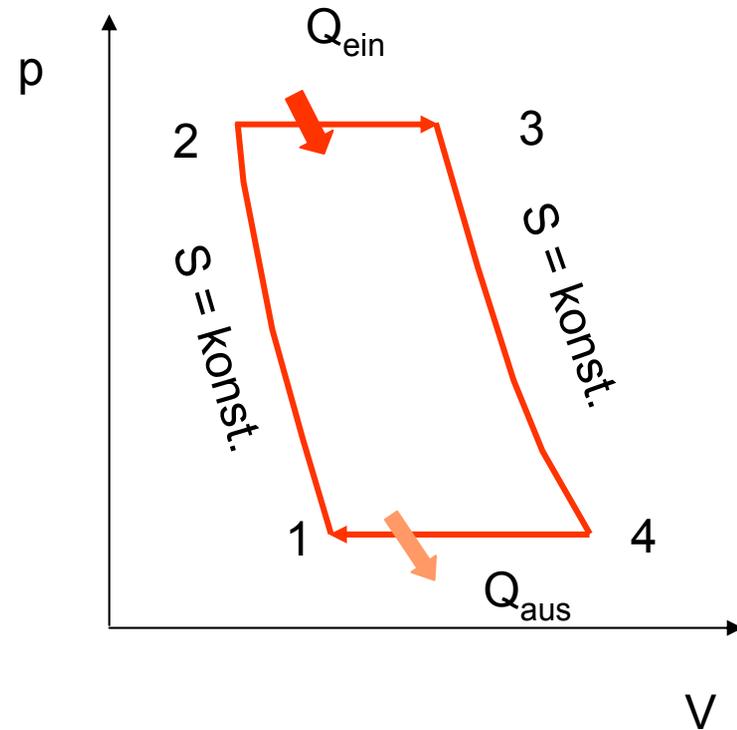
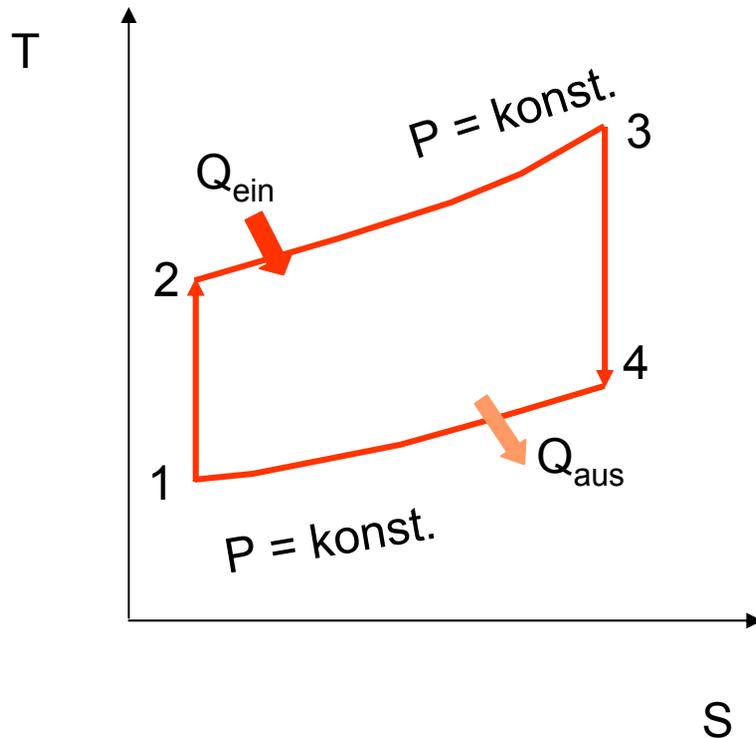
# BEWAG - Kraftwerk Berlin-Mitte, KWK-Anlage.



# Wirkungsgrad

- Carnot-Maschine
- Brayton-Zyklus





1-2 Isentrope Kompression (Kompressor);

3-4 Isentrope Entspannung (Turbine)

2-3  $P = \text{konst.}$ , Wärmezufuhr

4-1  $P = \text{konst.}$  Wärmeabfuhr

# Ideale Gasturbine

$$\eta_B := 1 - \frac{1}{pr^{(k-1)/k}}$$

$$, pr = P_2/P_1, k = C_p/C_v$$

$$, T_2/T_1 = (P_2/P_1)^{(k-1)/k} = (P_3/P_4)^{(k-1)/k} = T_3/T_4$$

Indizes entsprechen den Punkten im Kreislaufdiagramm.

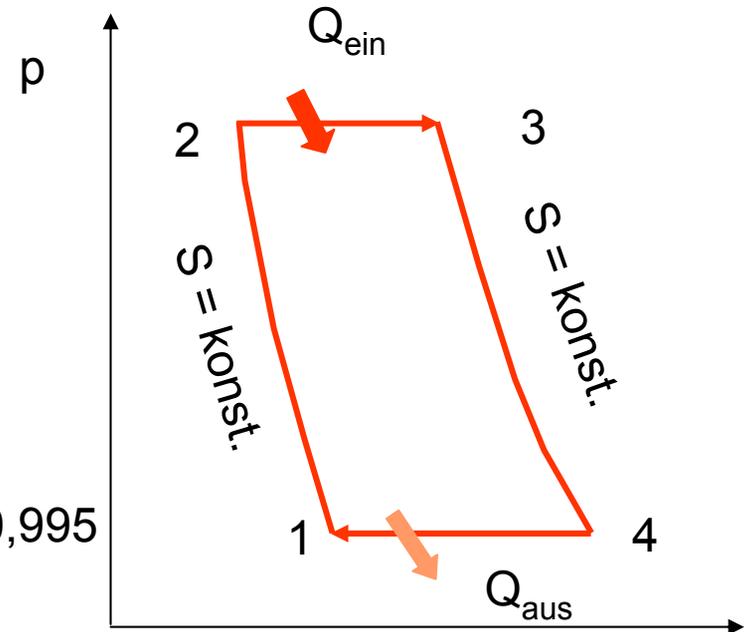
„Eigenenergiebedarf“

-Interne Verluste 0,5%, Turbinenwirkungsgrad 0,995

-Hilfssysteme (Schmiermittelversorgung, ...)

-....

$$pr_{opt} = \left[ \left[ \frac{T_{aus}}{TIT} \right] \left[ \frac{1}{\eta_k \eta_T} \right] \right]^{\frac{k}{2-2k}}$$



T=300K

$K_{luft} = 1,4$

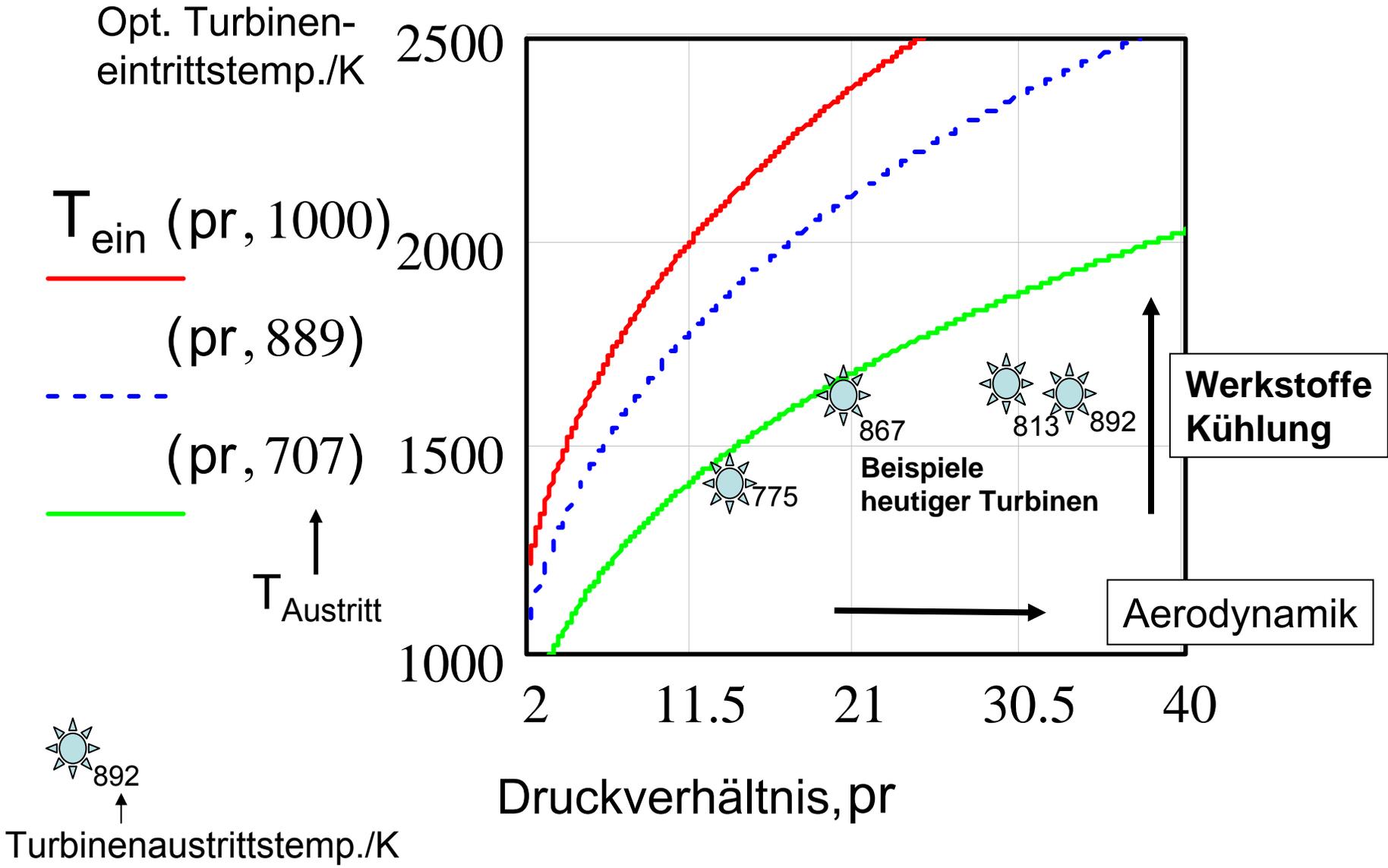
$K_{CO2} = 1,29$

T=1000 K

$K_{luft} = 1,34$

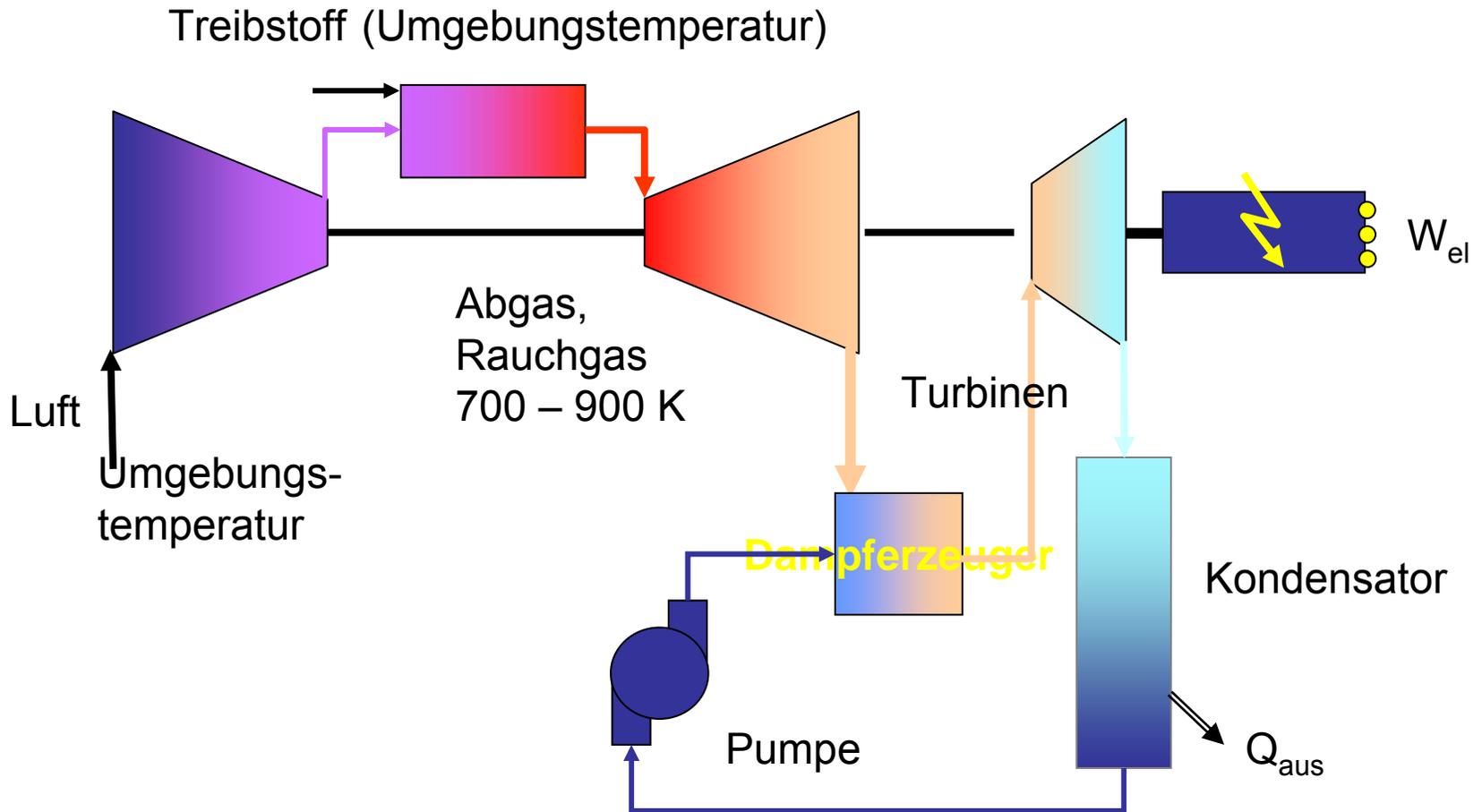
$K_{CO2} = 1,23$

# „Ideale“ Gasturbineneintrittstemperatur

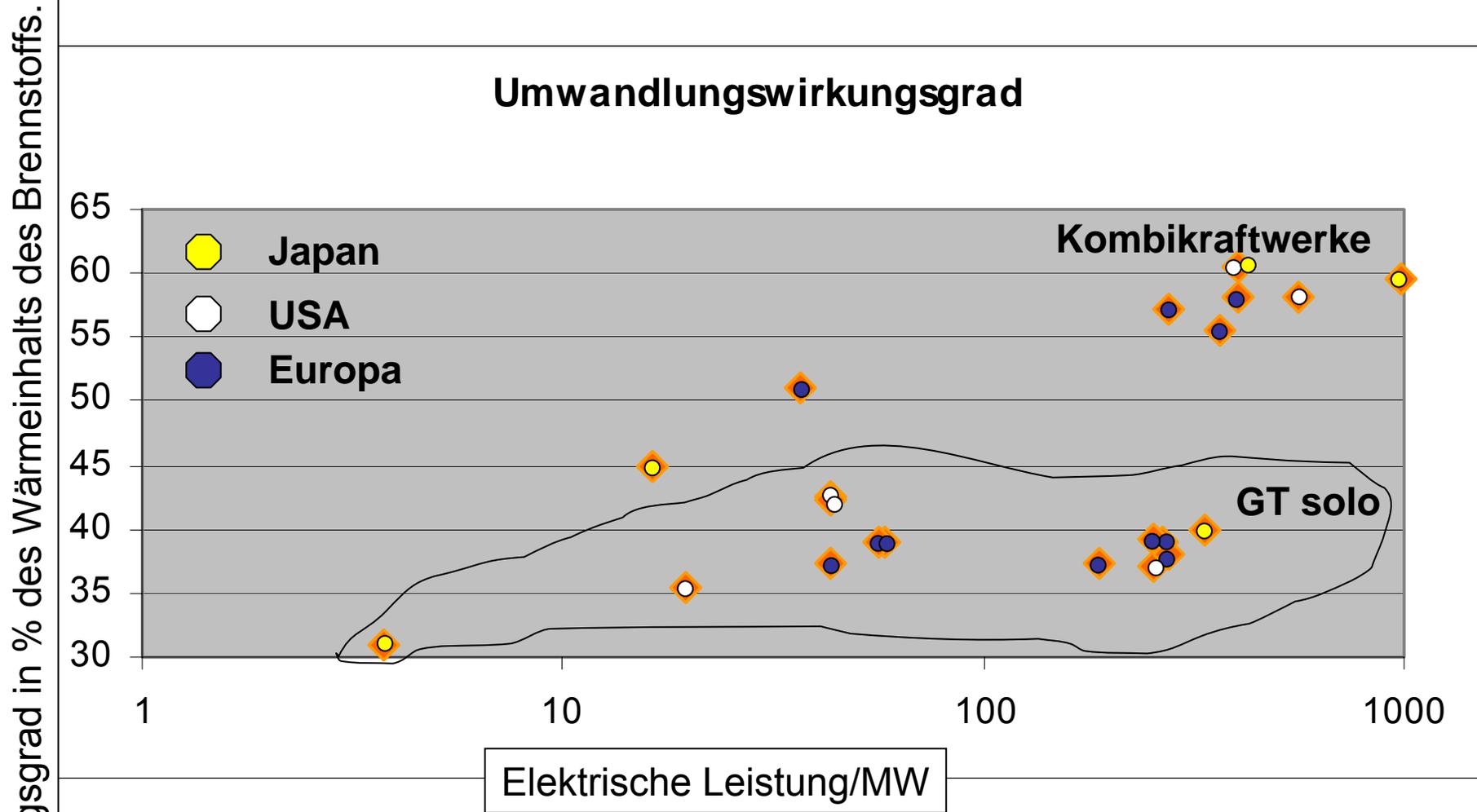


Turbinenaustrittstemp./K

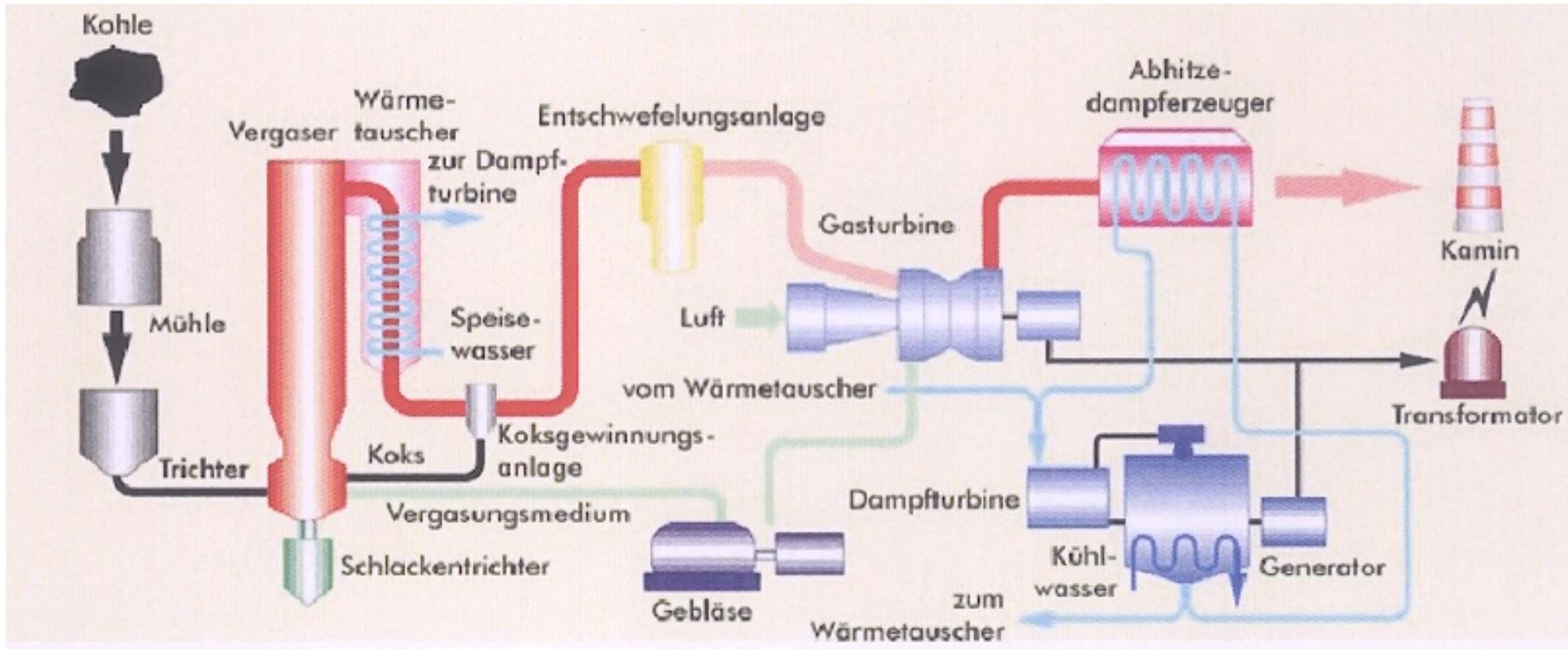
# Gasturbinen-Dampfturbinen-Kombikraftwerk



## Umwandlungswirkungsgrad



# Kombikraftwerk mit integrierter Kohlevergasung, IGCC

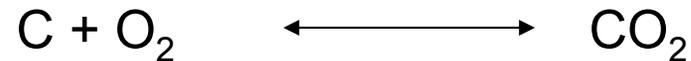


Dampf-  
Kraftwerk

Vergasung

Kombikraftwerk

## Kohlevergasung



Typische Temperatur 1250 K.  
Drücke bis 0,1 bis 10 MPa.

Reaktionen verschieben sich mit  
**Temperatur** und **Druck**.

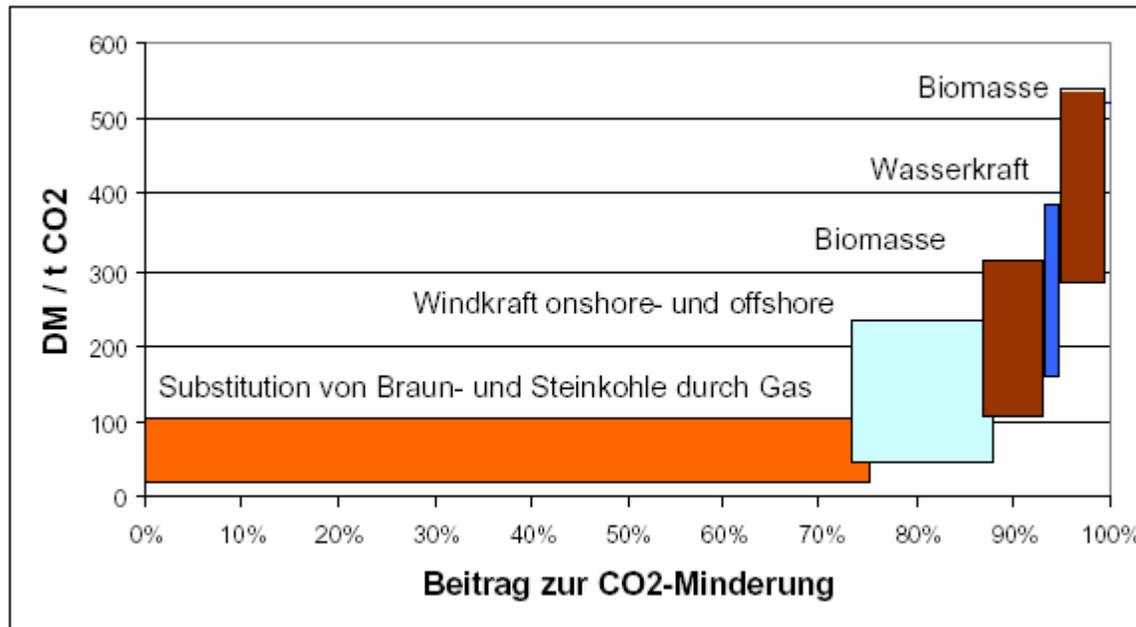
# IGCC Technologie

- Nutzt fortgeschrittene Kombikraftwerkstechnik
- Wasserstoffproduktion
- Synthetische Treibstoffe - Methan, Methanol
- CO<sub>2</sub> Abscheidung ist integrierbar.
- Nutzt Kohle
- Andere Rohstoffe, z.B. Biomasse.

## Wirkungsgrad

- |                   |                 |
|-------------------|-----------------|
| – Kohlekraftwerk  | 43 bis 45%      |
| – Kombikraftwerke | 58 bis 60,5 %   |
| – IGCC            | Versuchsanlagen |
| • Europa          |                 |
| • USA             |                 |
| • Japan           |                 |

## Vermeidungskosten pro t/CO<sub>2</sub> ohne den Einsatz von CO<sub>2</sub> Reduktionstechnologien.



1 Euro = 1,95583

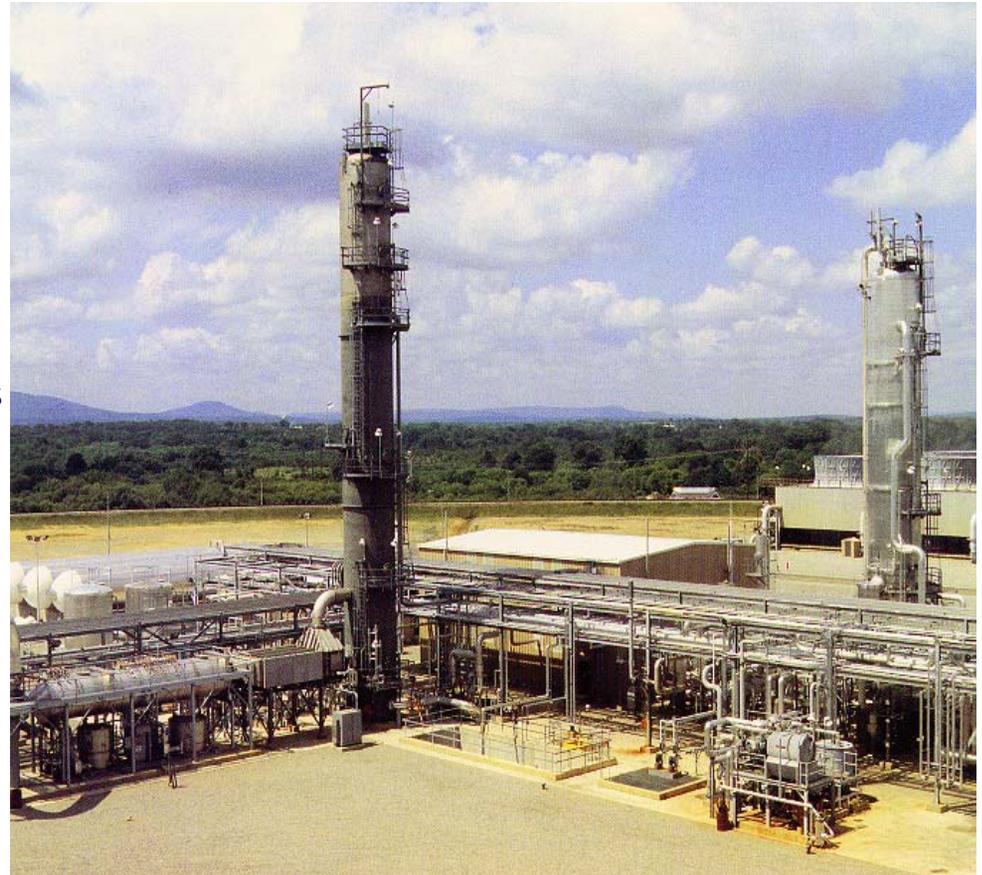
Dok. Nr. 492, **Energiepolitische und gesamtwirtschaftliche Bewertung eines 40%-Reduktionsszenarios.**  
 Endbericht der Prognos AG in Kooperation mit dem  
 Energiewirtschaftlichen Institut der Universität Köln (EWI)  
 und dem Bremer Energie Institut (BEI). Gutachten erstellt im Auftrag  
 des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie, Juli 2001.

# Kann heute ein CO<sub>2</sub>-“Freies“ Kraftwerk gebaut werden?



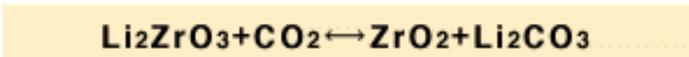
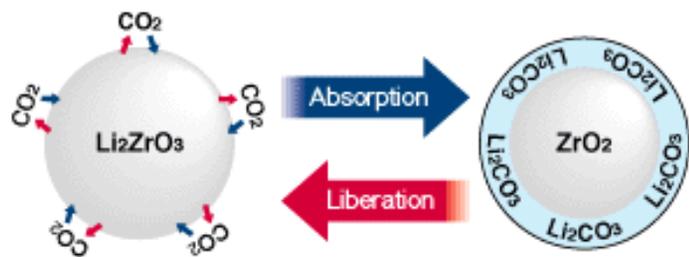
Ja, wenn eine Erhöhung des Stromgestehungspreises um den Faktor 4 sowie der höhere Platzbedarf akzeptiert wird.

Kerr-McGee/  
ABB Global Lummus  
Kohlendioxid-  
wäschertechnologie

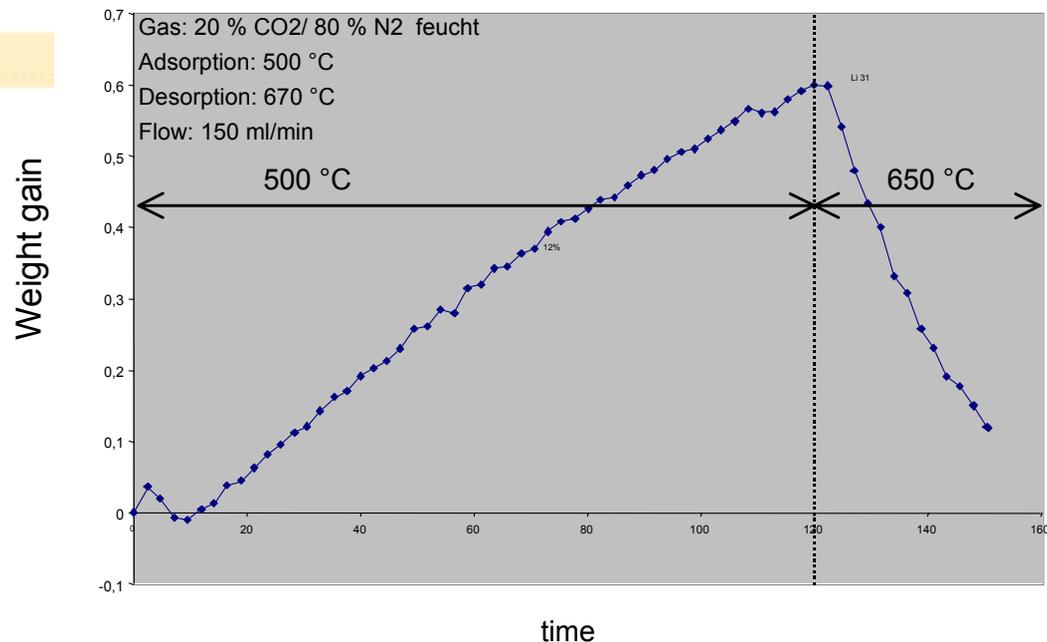


SHADY POINT, OKLAHOMA, USA

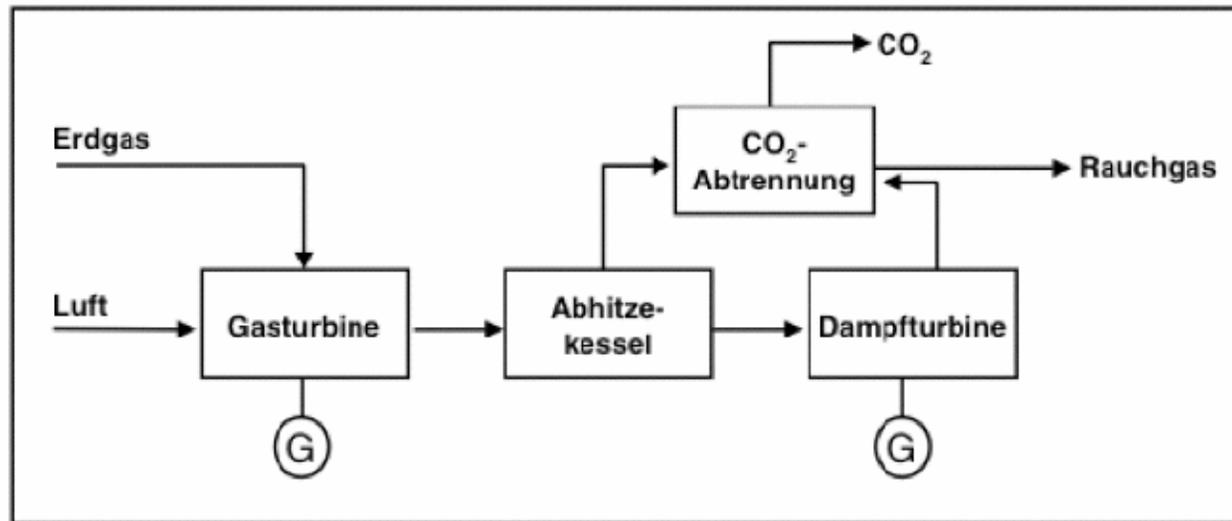
# Mineralreaktionen, z.B. Zirkonat – Carbonat.



F&E Bedarf:  
Andere energetisch günstige  
und reversible Reaktionen.



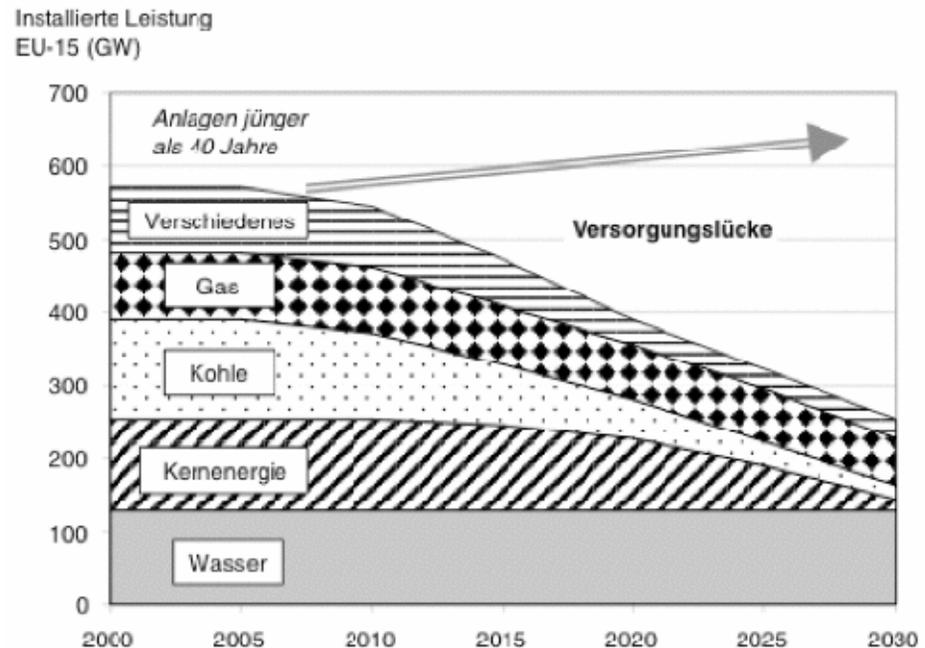
Rauchgasreinigung: Aminwäsche oder Heipottaschewsche



Preis: - Mehr als 10%-Punkte Wirkungsgradverlust durch stark erhöhten Eigenbedarf an Wärme und elektrischer Energie.

Es existiert ein hoher Ersatzbedarf für Altanlagen bis 2010. Dazu kommt ein steigender Neubedarf bis 2010

Nach IEA Schätzungen steigt der Weltelektrizitätsbedarf bis 2020 um 70%. -> 2000 GW neue Kraftwerksleistung weltweit, davon 200 GW in der EU und 40 GW in Deutschland.



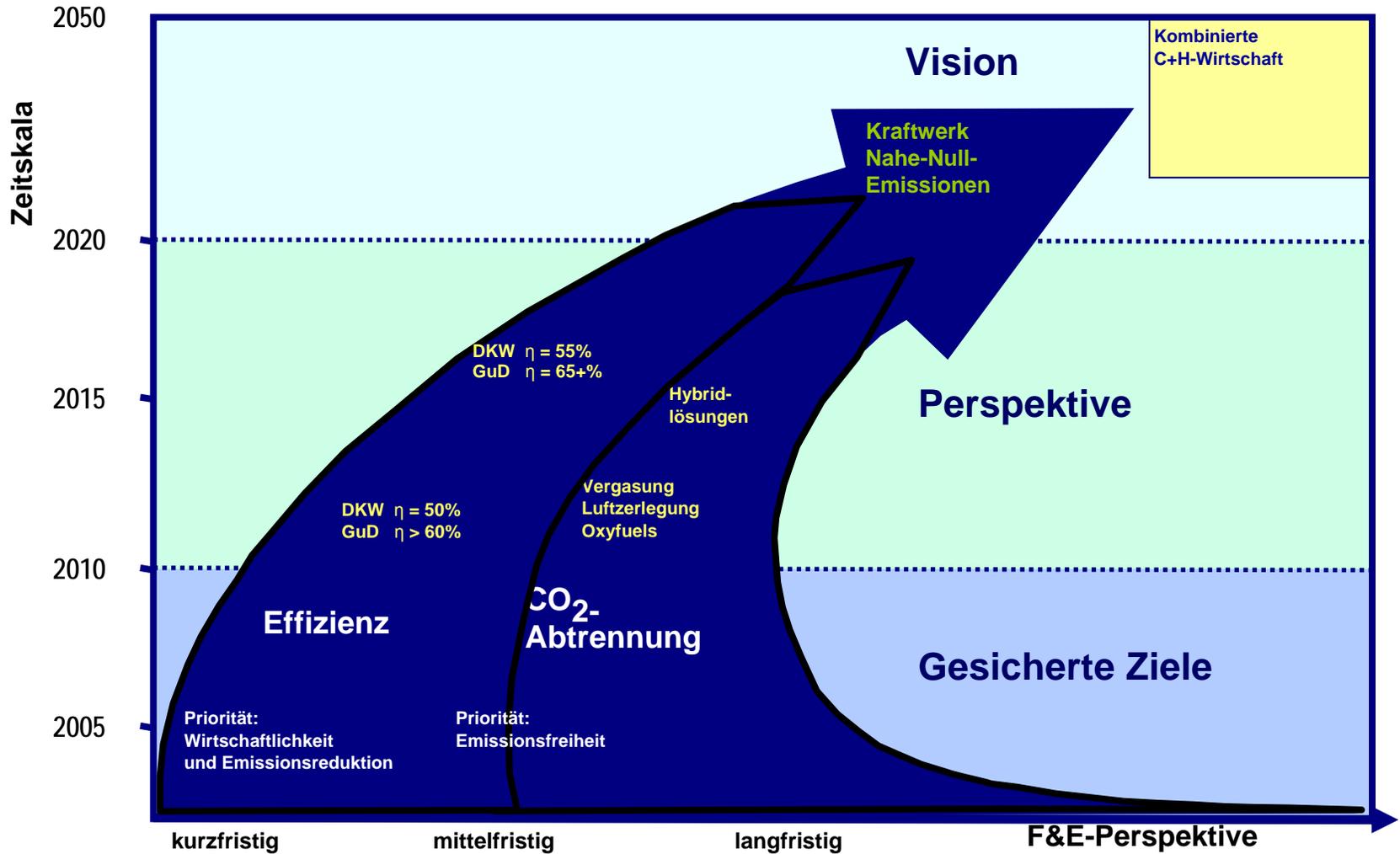
# CO<sub>2</sub>-“freie“ Kraftwerk Aktuelle Forschung

COORETEC

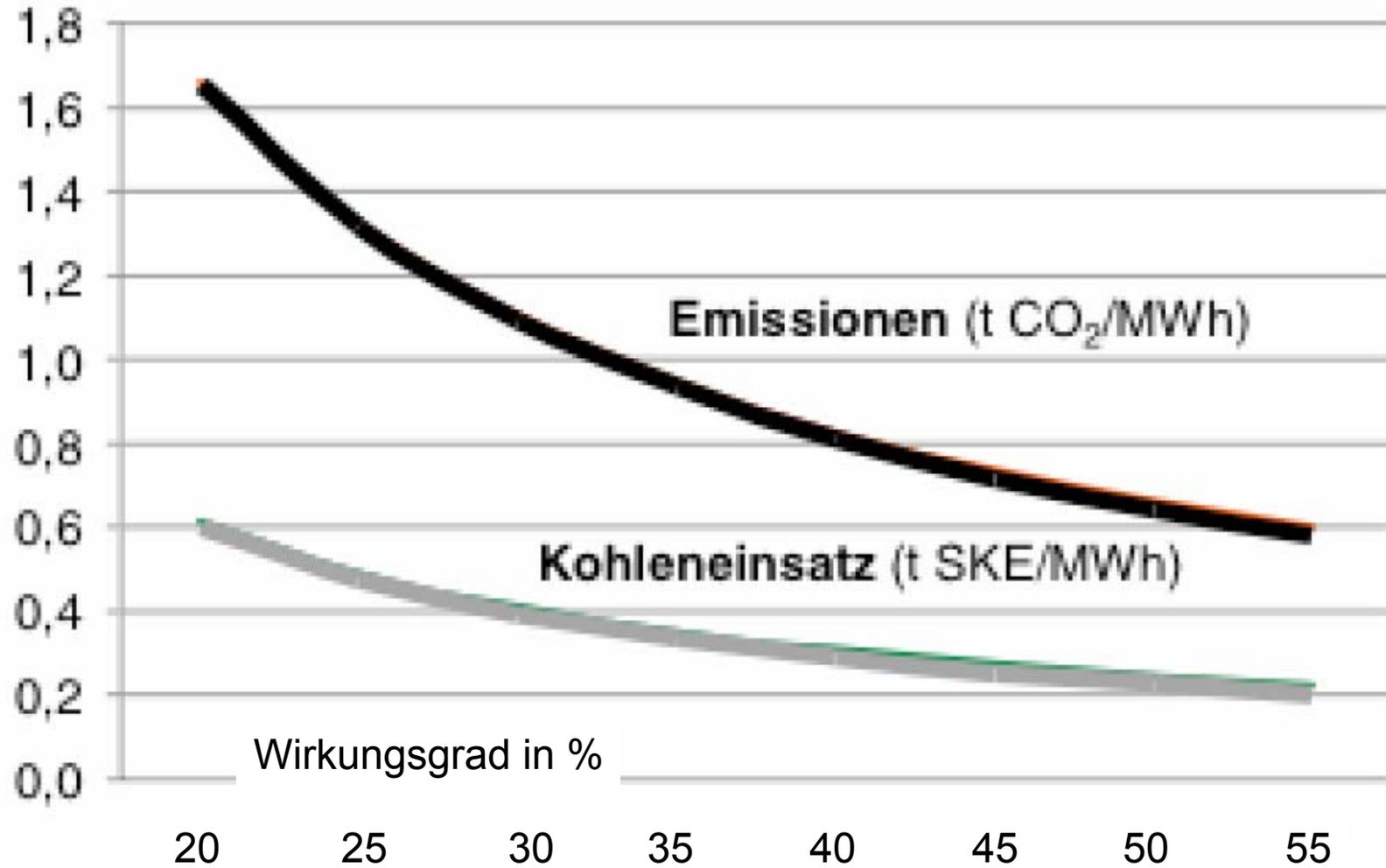
CO<sub>2</sub>-Reduktions-Technologien

- CO<sub>2</sub>-Reduktion durch Wirkungsgradverbesserung erreicht wird.
- CO<sub>2</sub>-Abscheidung
- Niedrige Kosten
- Exportfähige Technologie

# COORETEC - Ziele und Vision



# Wirkungsgrad wirkt!

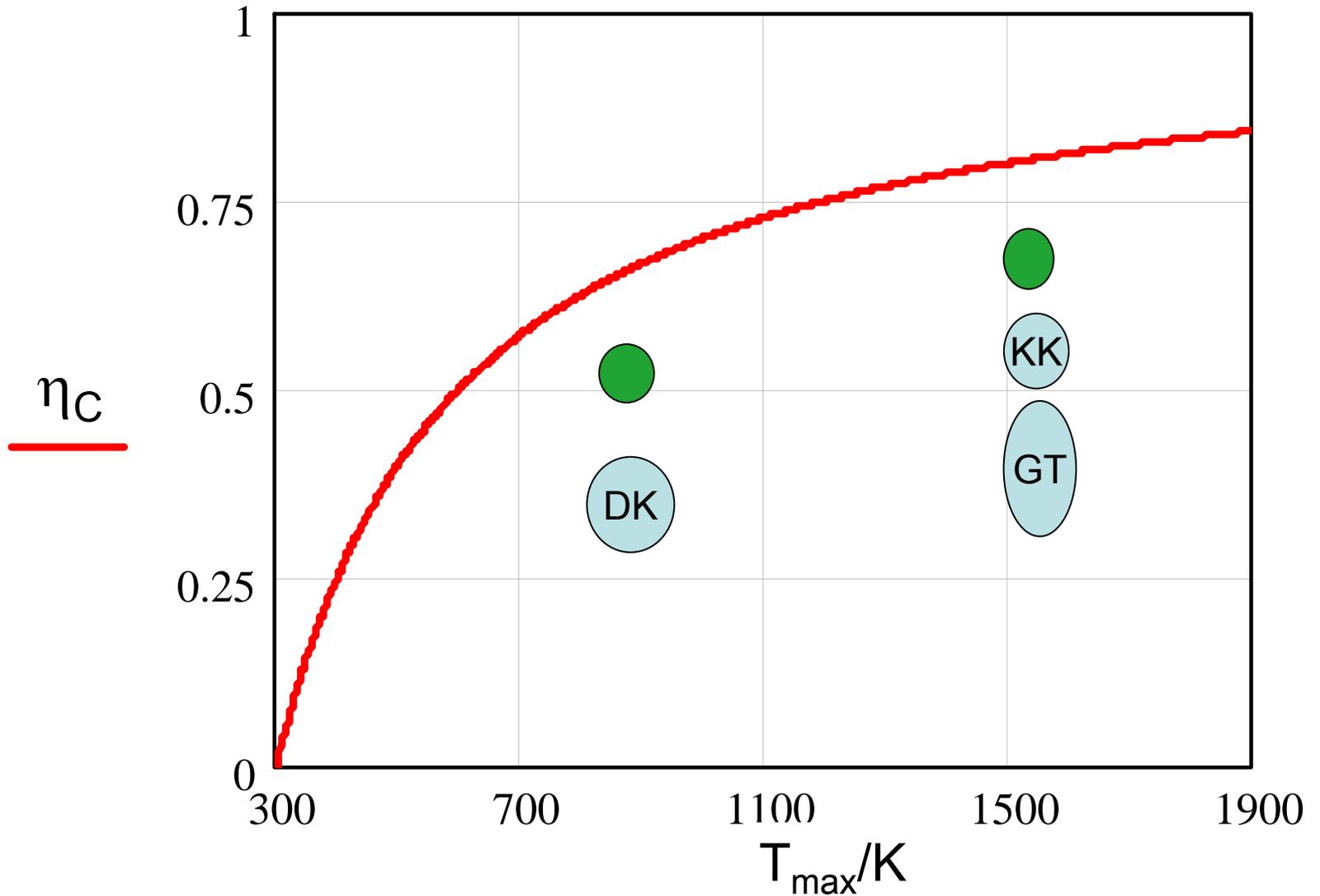


## Zu entwickelnde Komponenten

- 700/720 °C, 375 bar Dampferzeuger
- 700 - 800 °C, bis 400 bar Dampfturbine
- Hochtemperaturturbine
- Aerodynamik, transsonische Beschaufelung
  
- Vollständiger, NOx-armer Brennstoffumsatz
  
- Absenkung Kondensatordruck
  
- Brennstoffaufbereitung
  
- Verschlackungsfreie Brennkammer
  
- Prozesssimulation

## F&E

- 700°C Werkstoffsysteme
- Verbindungstechnik
- Schutzschichten (Dampfkorrosion)
- Dichtungstechnik
- Simulation/Algorithmen
  
- Luft- und Brennstoffverteilung
  
- Tröpfchenkondensation
  
- Kohlevortrocknung
- Kohlemahlung
  
- Modellierung von Abbrand & Mineralentstehung
  
- Berechnungsmodelle und Algorithmen



## CO<sub>2</sub>-Abtrennung heute

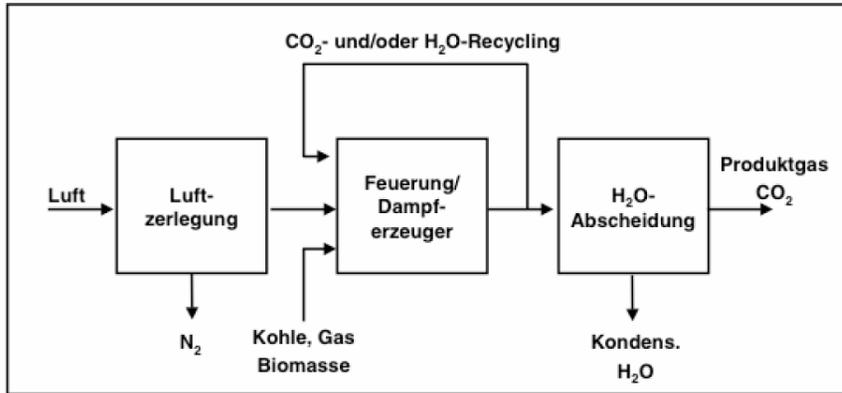
- Rauchgasreinigung: Aminwäsche, Heißpottaschewäsche, theoretisch auch mit Molekularsieben oder Membranen
- Brennstoffdekarbonisierung (Synthesegas) -> Abtrennung aus dem Synthesegas

## CO<sub>2</sub>-Abtrennung morgen

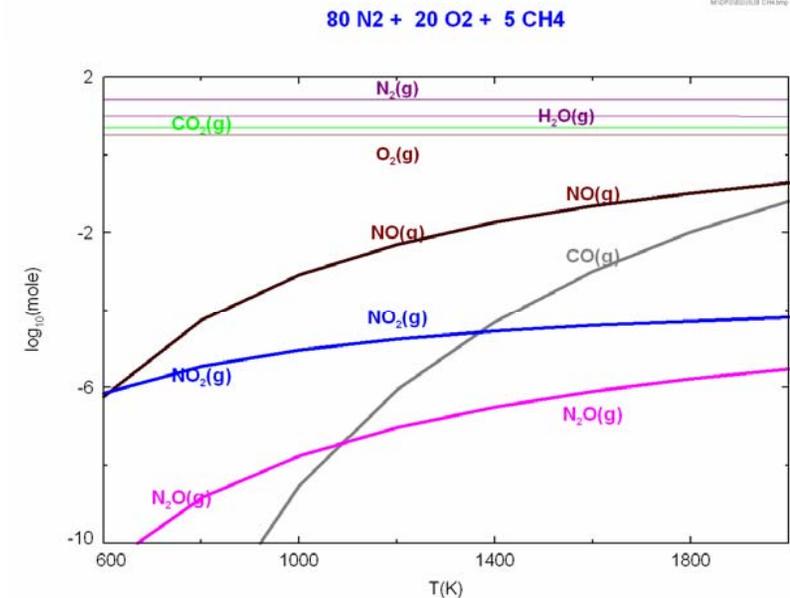
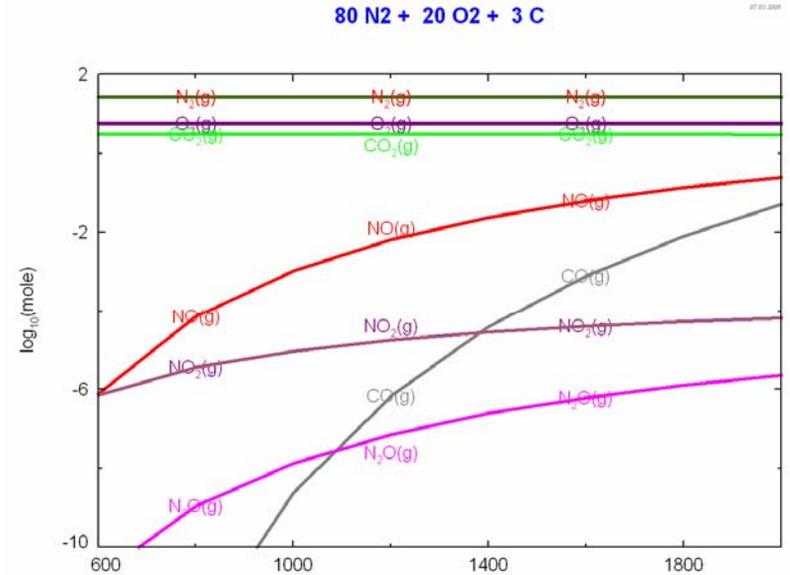
- Verbrennung in Sauerstoff statt Luft (O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>) und Abtrennung des Wassers aus dem Abgas, wodurch ein hochkonzentriertes CO<sub>2</sub>-Abgas entsteht.
- Statt Wäscher, Kondensation des Wassers.

# CO<sub>2</sub>-freie Kraftwerke: Grundsätzliche Idee

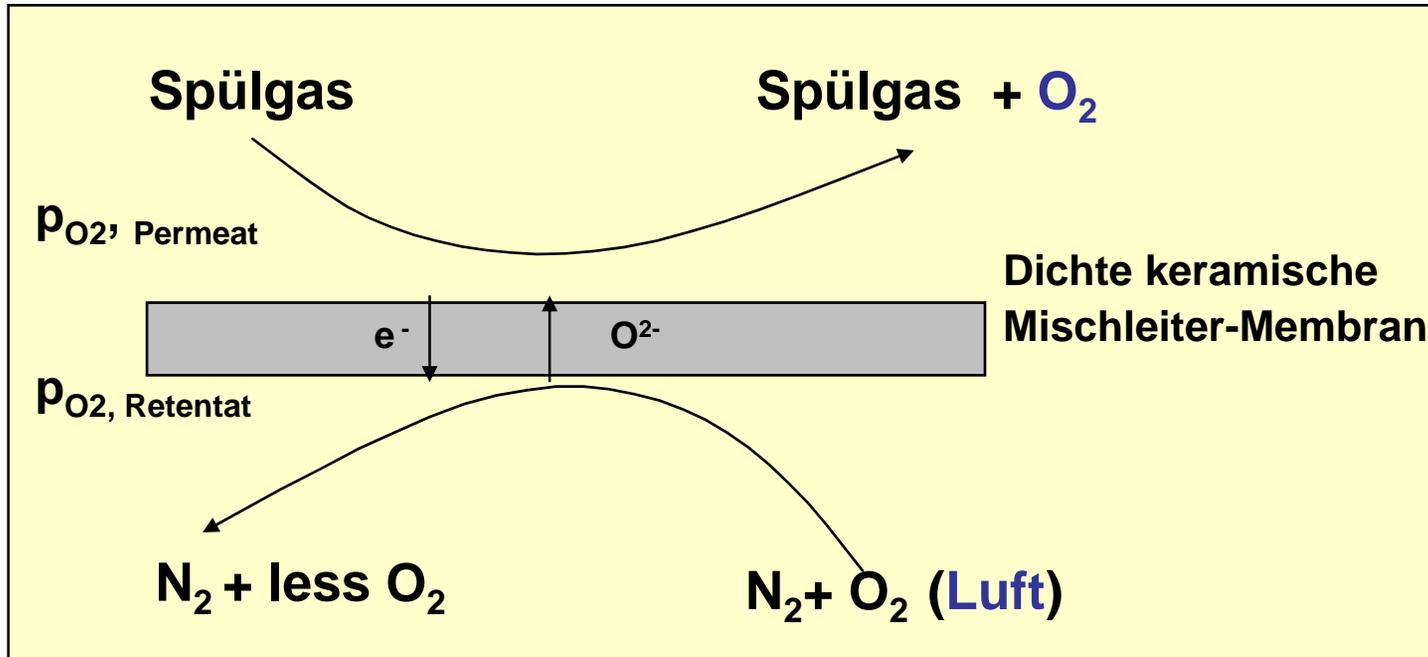
Verbrennung oder Vergasung mit reinem Sauerstoff.

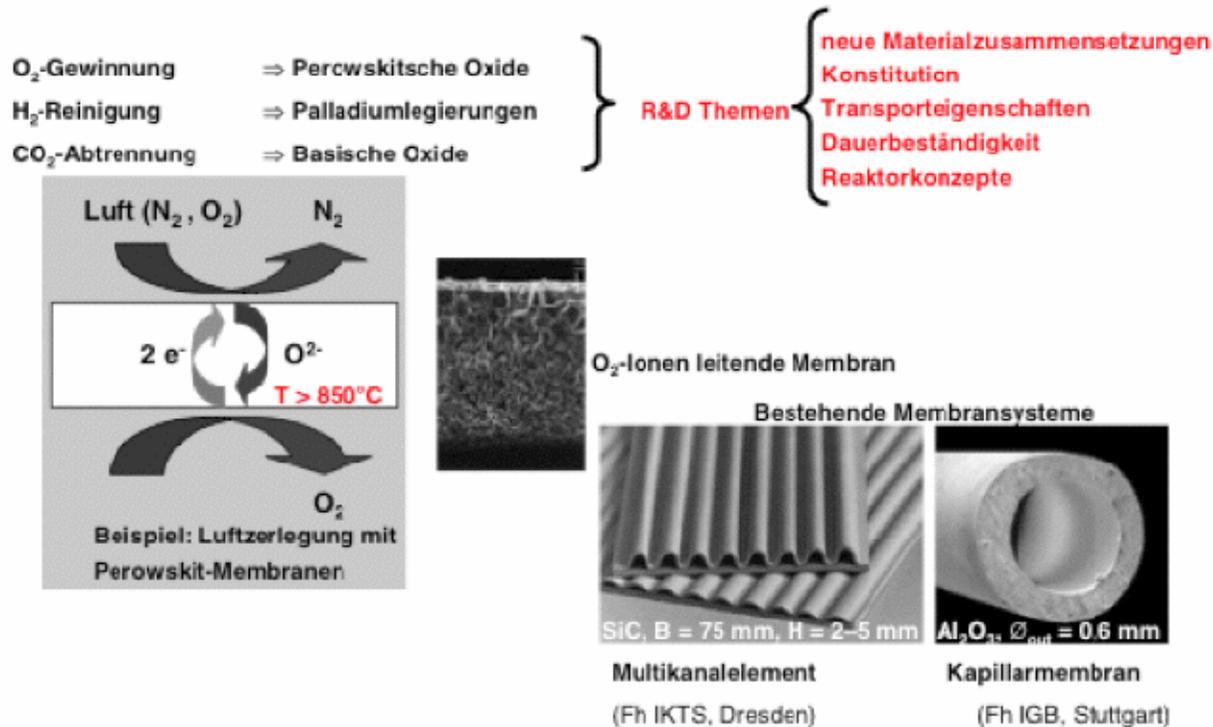


Vorteil: Ohne N<sub>2</sub> entsteht kein NO<sub>x</sub>.  
Einsparung: DeNox - Anlage.



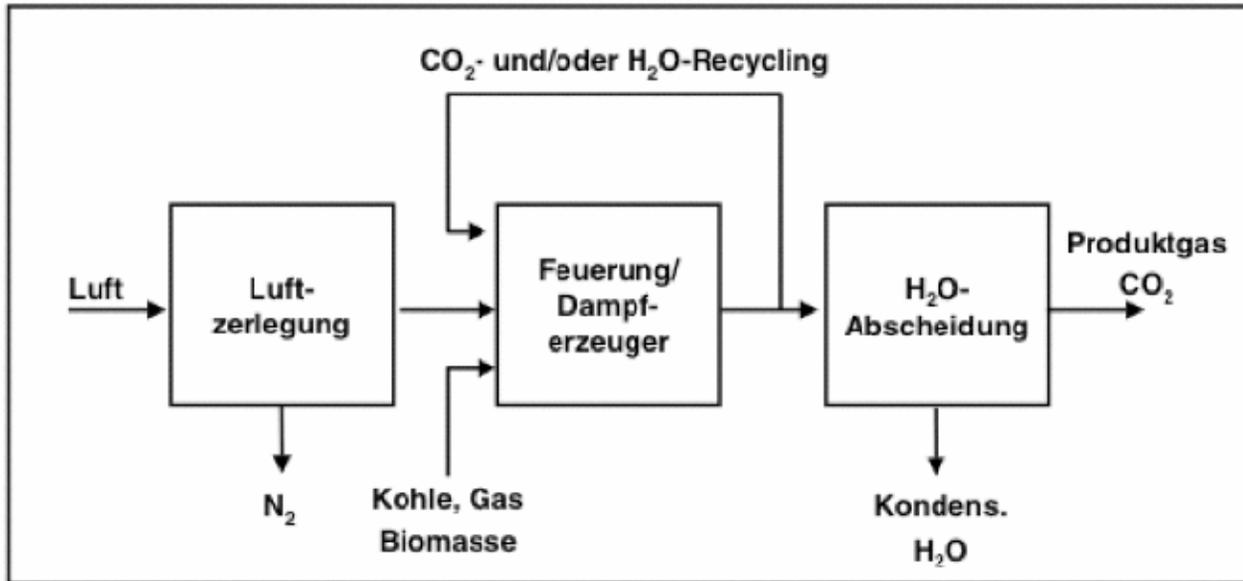
Vergleich: Verbrennung in Luft.





Gut Sauerstoffionen leitende Membranen sind in Deutschland aus industrieller Forschung und Entwicklung verfügbar.

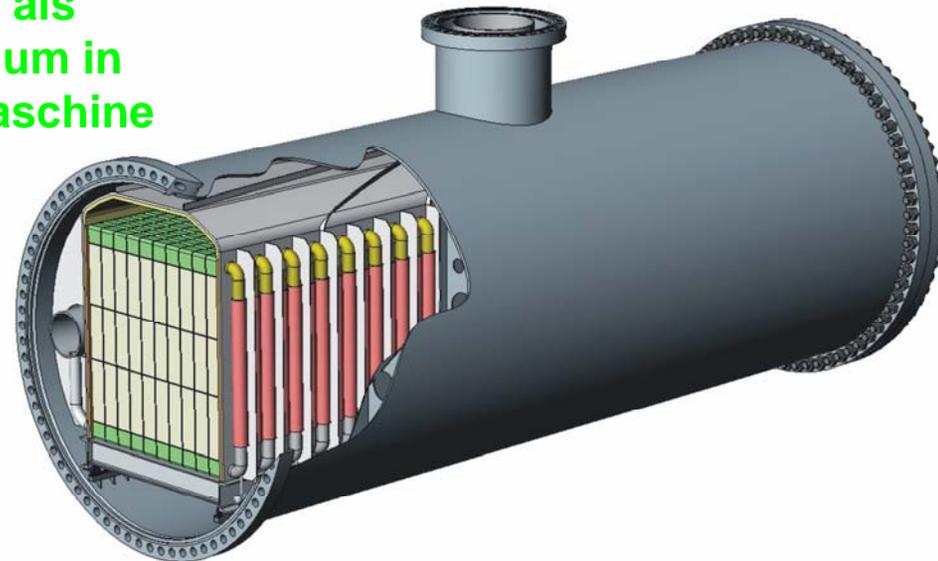
# Oxifuelprozesse - Membrantechnik



CO<sub>2</sub>-Verdichtung,  
- Transport  
und  
- Lagerung

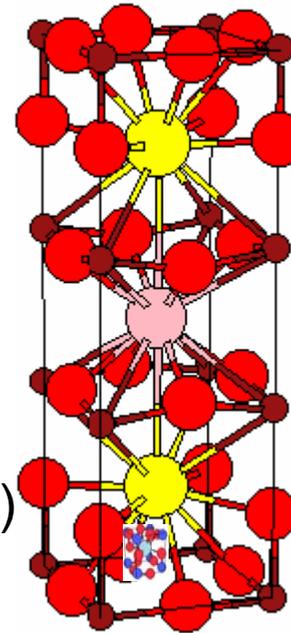
Energetisch  
günstige  
Luftzerlegung  
mit Hochtemperatur-  
membranen

CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O als  
Arbeitsmedium in  
der Turbomaschine



Meist Perowskite

- modifiziertes La Co O<sub>3</sub> ; ZrO<sub>2</sub> und BiO<sub>3</sub>
- La-Ni-Fe-O
- La-Sr-Co-Fe-O ; 0,21 cm<sup>3</sup>/ cm<sup>2</sup> min
- Sr-Ti-Fe-O
- Ce-Gd-Co-O ; 0,77 x 10<sup>-2</sup> mol/ m<sup>2</sup> s)
- Sr-Bi-Fe-O
- Ba-Co-Fe-Zr-O ; 0,9 ml/ cm<sup>2</sup> min)
- Sr-Co-Fe-Zr-O ; 1,37 x10<sup>-2</sup> mol/ m<sup>2</sup> s)
- Ba-Sr-Co-Fe-O ; 1,16 ml/ cm<sup>2</sup> min)



YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>7-x</sub>  
(Pmmm)

Elektronenleitung

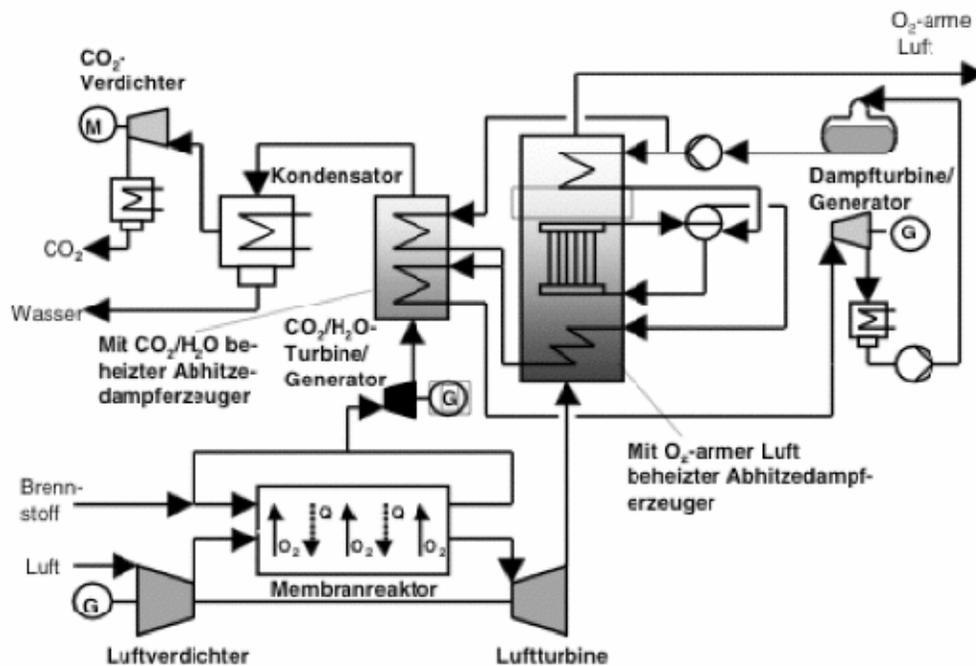
CaTiO<sub>3</sub> (Pnma)

- **Der Sauerstoffdurchfluss  
ist noch zu gering.**

**Industriell würden 5-10 cm<sup>3</sup>/ (cm<sup>2</sup>  
min) bzw. 3,7 –7,4 x 10<sup>-2</sup> mol / m<sup>2</sup> s  
benötigt!**



PbZr<sub>x</sub>Ti<sub>1-x</sub>O<sub>3</sub>  
TZP  
O<sub>2</sub>-Ionen

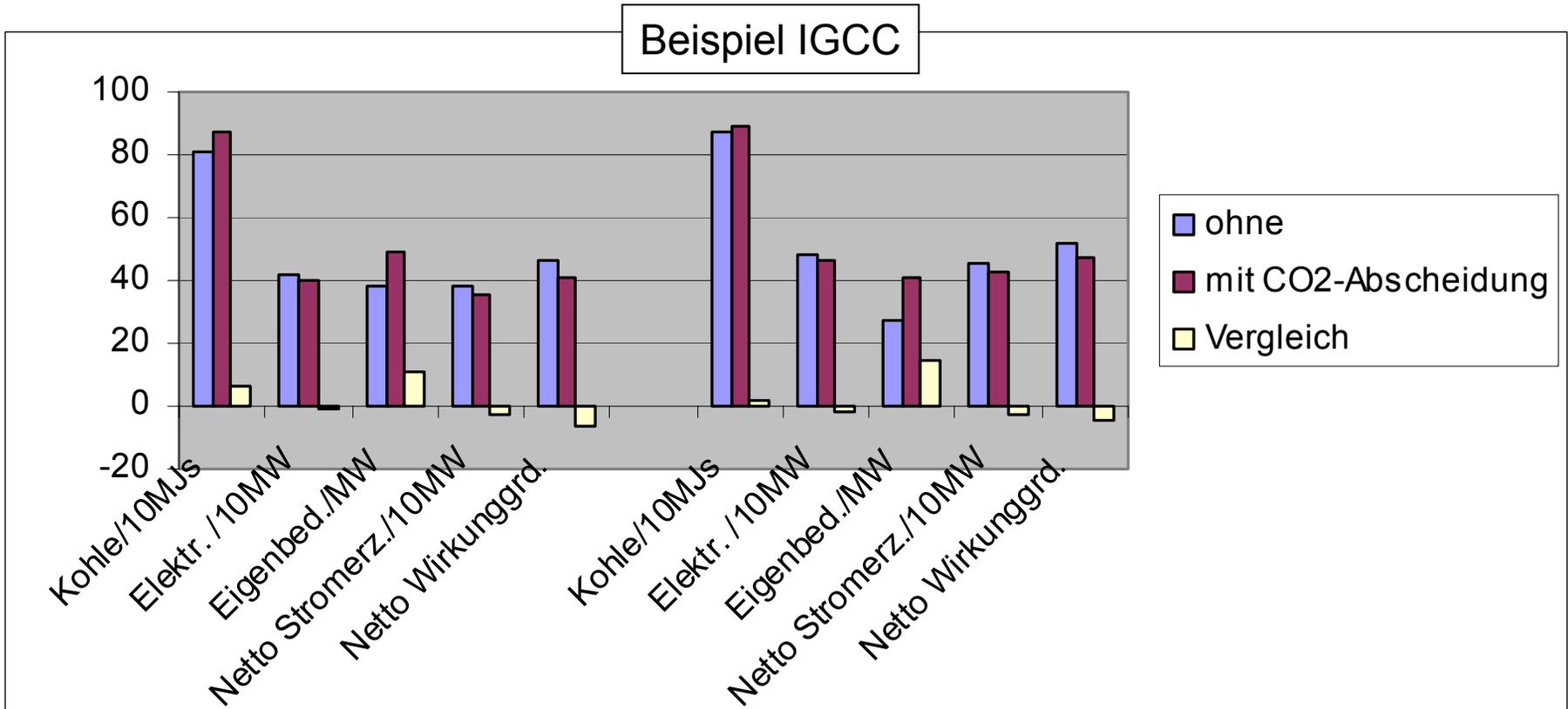


In FRAME V von der EU gefördertes Projekt unter Beteiligung von Norsk Hydro, ALSTOM und seit 2004 Siemens. Ziel: Nach der Grundlagenforschung im AZEP-Projekt soll der Bau eines Prototyps erfolgen.

Zur Zeit größte Hürde: Es konnte noch kein größeres Membranmodul demonstriert werden, sondern lediglich kleine Labordemonstratoren.

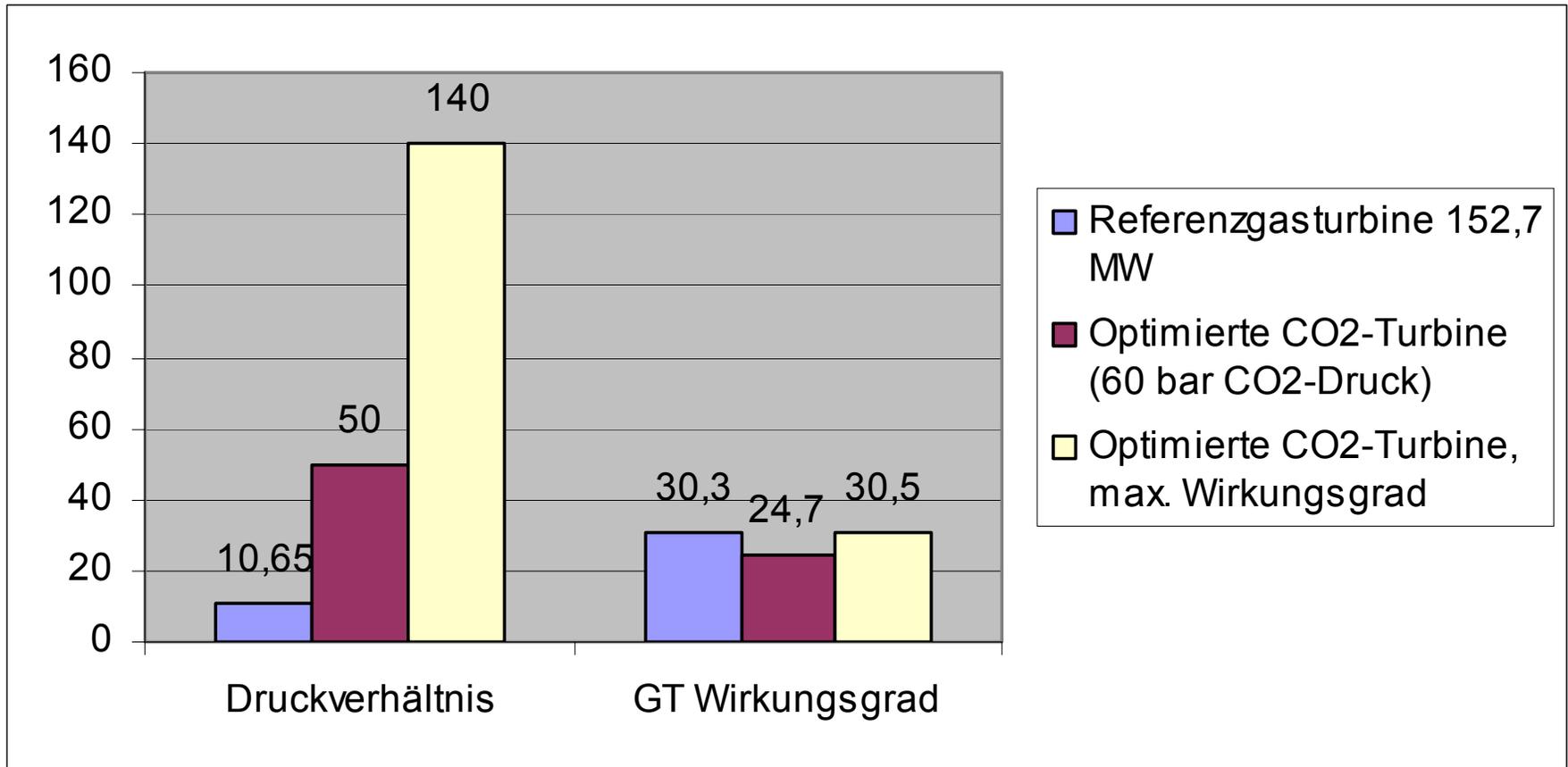
- gekoppelte Simulation von Aerodynamik und Mechanik einzelner Komponenten
- gekoppelte Simulation von Gesamtanlagen
- Hochtemperaturwerkstoffe und Werkstoffsysteme
- Verbrennungsoptimierung
- Thermodynamik von  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$  - Gasmischen.
- Membrantechnologie
- Wäschertechnologie
- Sozio-ökonomische Fragen - Akzeptanz

# Aufwand für die CO<sub>2</sub> Abscheidung



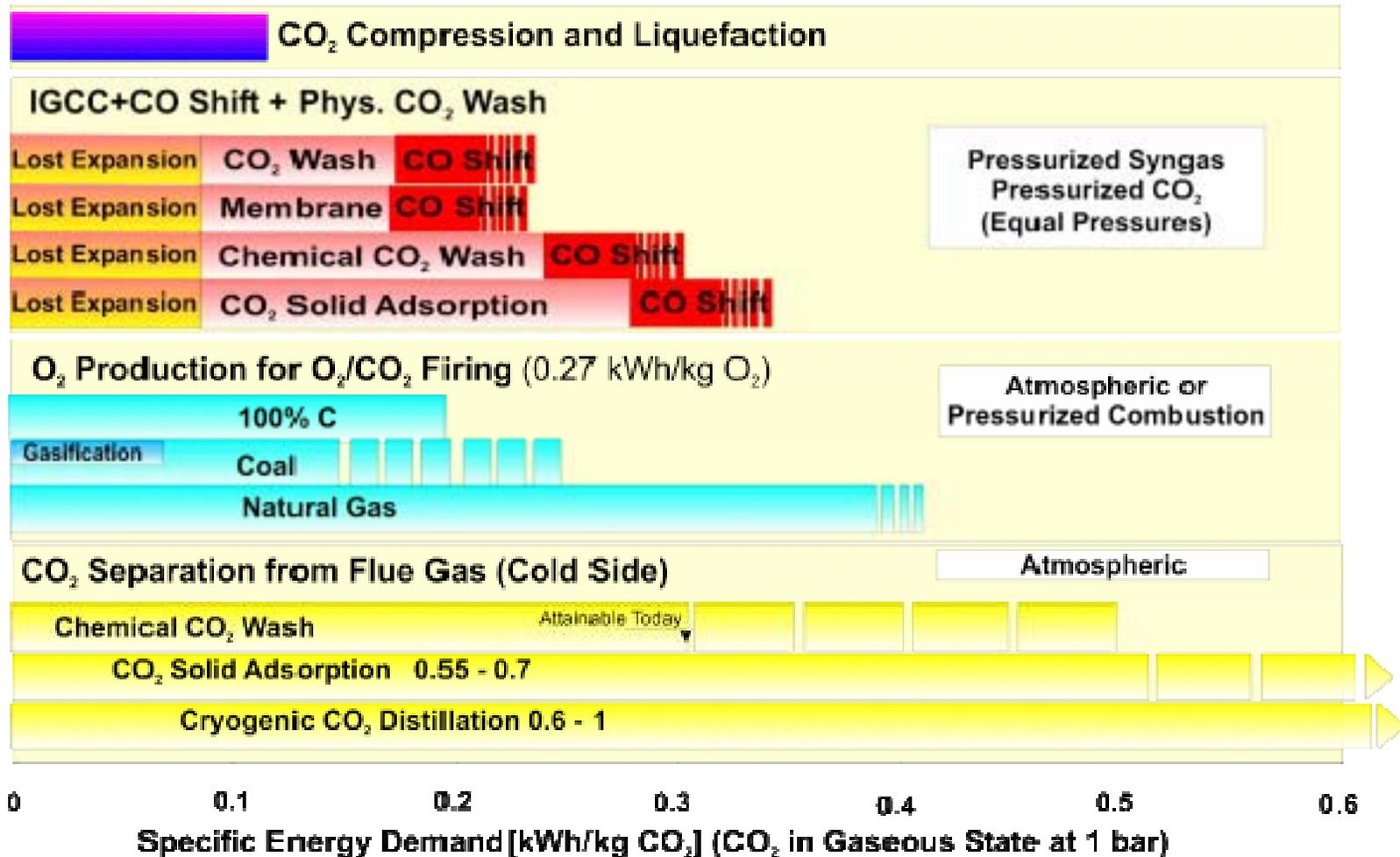
Concepts of CO<sub>2</sub> removal from fossil fuelbased power generation systems  
R. Pruscek and G. Göttlicher

Wirkungsgradverlust in den Beispielen 4,2 bzw. 6,2. % Punkte.

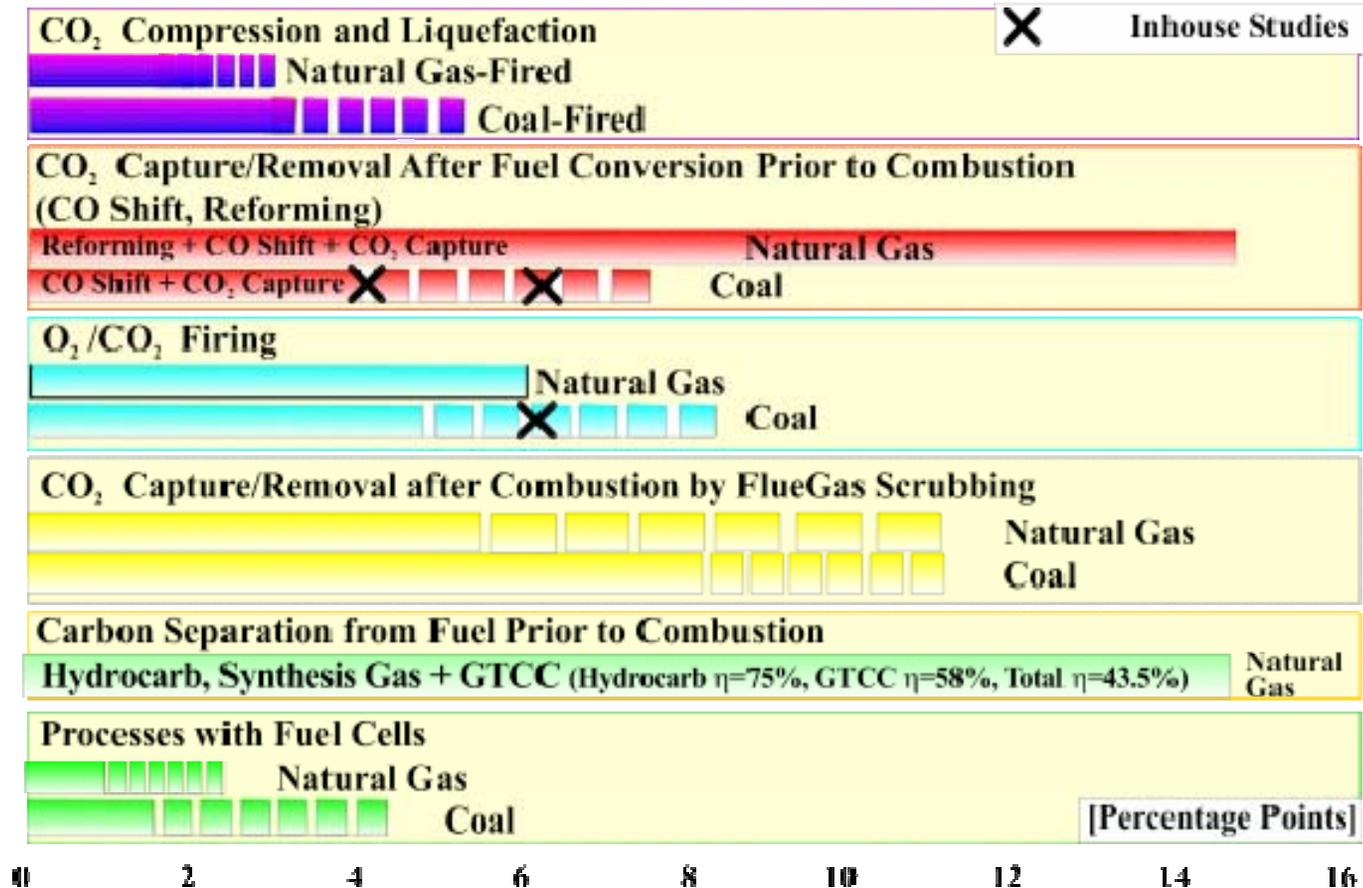


Concepts of CO2 removal from fossil fuelbased power generation systems  
R. Pruschek and G. Göttlicher

Gasturbinen können in einem CO2-Kreislauf fast mit gleichem Wirkungsgrad wie heute betrieben werden.

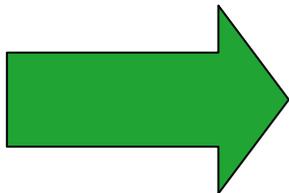


Concepts of CO<sub>2</sub> removal from fossil fuelbased power generation systems  
R. Pruschek and G. Göttlicher



Concepts of CO<sub>2</sub> removal from fossil fuelbased power generation systems  
R. Pruscek and G. Göttlicher

1. Verbrennung mit „reinem“ Sauerstoff.
  1. Energiesparende Technik, vgl. Linde-Anlage. Membrantechnologie.
  2. Veränderte Auslegung, Oxidationsschutz
2. Abtrennung von CO<sub>2</sub>
  1. Technik mit geringem Energiebedarf
3. Höhere Wirkungsgrade als heute für den Betrieb ohne Luftzerlegung und CO<sub>2</sub>-Abscheidung.
  1. Höhere Betriebstemperaturen
  2. Hochtemperaturmaterial und verbesserte Kühlung
  3. Korrosions-/Oxidationsschutzschichten



**Senkung der Abgabe von CO<sub>2</sub> in die Atmosphäre.**

CO<sub>2</sub>SINK - CO<sub>2</sub> Speicherprojekt in Ketzin, Brandenburg.  
Kooperation und Unterstützung des CO<sub>2</sub>SINK-Projektteams  
um Prof. Borm. CO<sub>2</sub>SINK wird mit Mitteln des EU FRAME 6  
F&E-Programms gefördert.

Allgemeiner F&E- Bedarf:

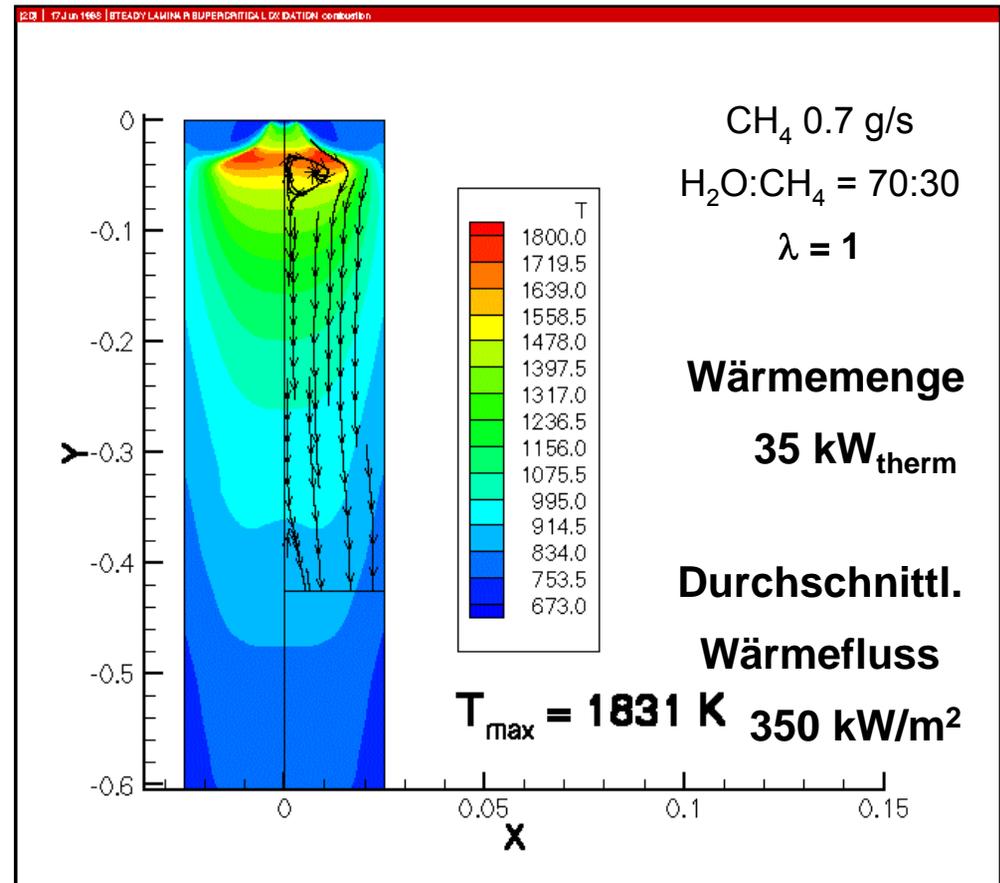
- katasterartige Erfassung der Speicherkapazität in Deutschland
- Simulation von Speicherszenarien
- Thermodynamik der Mineralbildung
- CH<sub>4</sub>/CO<sub>2</sub> Austausch mit Kohle

	<b>Weltweite Kapazität</b> [Gt CO <sub>2</sub> ]	<b>Sicherheit</b>	<b>Technische Hürden</b>	<b>Rel. Kosten</b> [€/t CO <sub>2</sub> ]	<b>Bewertung</b>
<b>Öl/Gas Reservoirs</b>	100te	gut	hoch	niedrig: 5-10	++
<b>Salzwasser Aquifere</b>	100te-1000de	Möglicherweise gut	mittel	niedrig: 15-20	+
<b>Kohle-schichten</b>	10-100te	Wahrscheinlich schlecht	niedrig	niedrig	o
<b>Minenhohl-räume</b>	100te	gut	hoch	hoch	-
<b>Ozean CO<sub>2</sub> Lösung</b>	1000de-100000de	mittel	mittel	niedrig: ca. 15	o
<b>Tiefsee CO<sub>2</sub> Pool</b>	1000de-100000de	Wahrscheinlich gut	niedrig	hoch: 60-80	-
<b>Aufforstung</b>	10-100te	gut	hoch	niedrig: 5-20	+

# Weitere, bisher nur angedachte Konzepte

- Hydrothermale Kraftwerk
- Virtuelle Kraftwerk

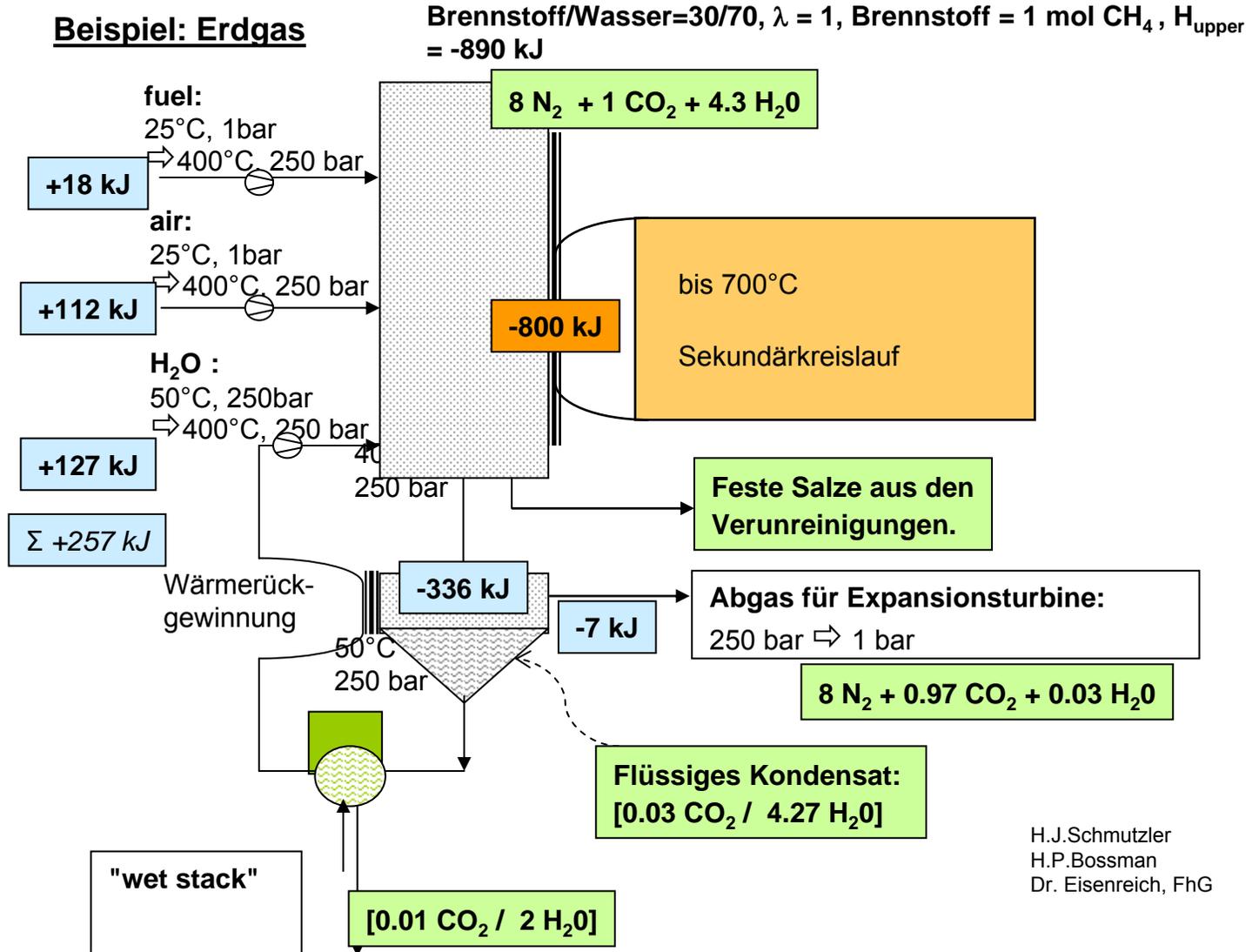
- Verbrennung von Gas, Öl oder Kohle möglich
- $T_{\text{crit}} = 374 \text{ °C}$ ;  
 $p_{\text{crit}} = 221 \text{ bar}$
- Heute erprobt bei der Oxidation von giftigen Stoffen und Brennstoffen



Temperaturprofil den Reaktors  
(Reaktorlänge Y = 60 cm; Durchmesser X = 5 cm)

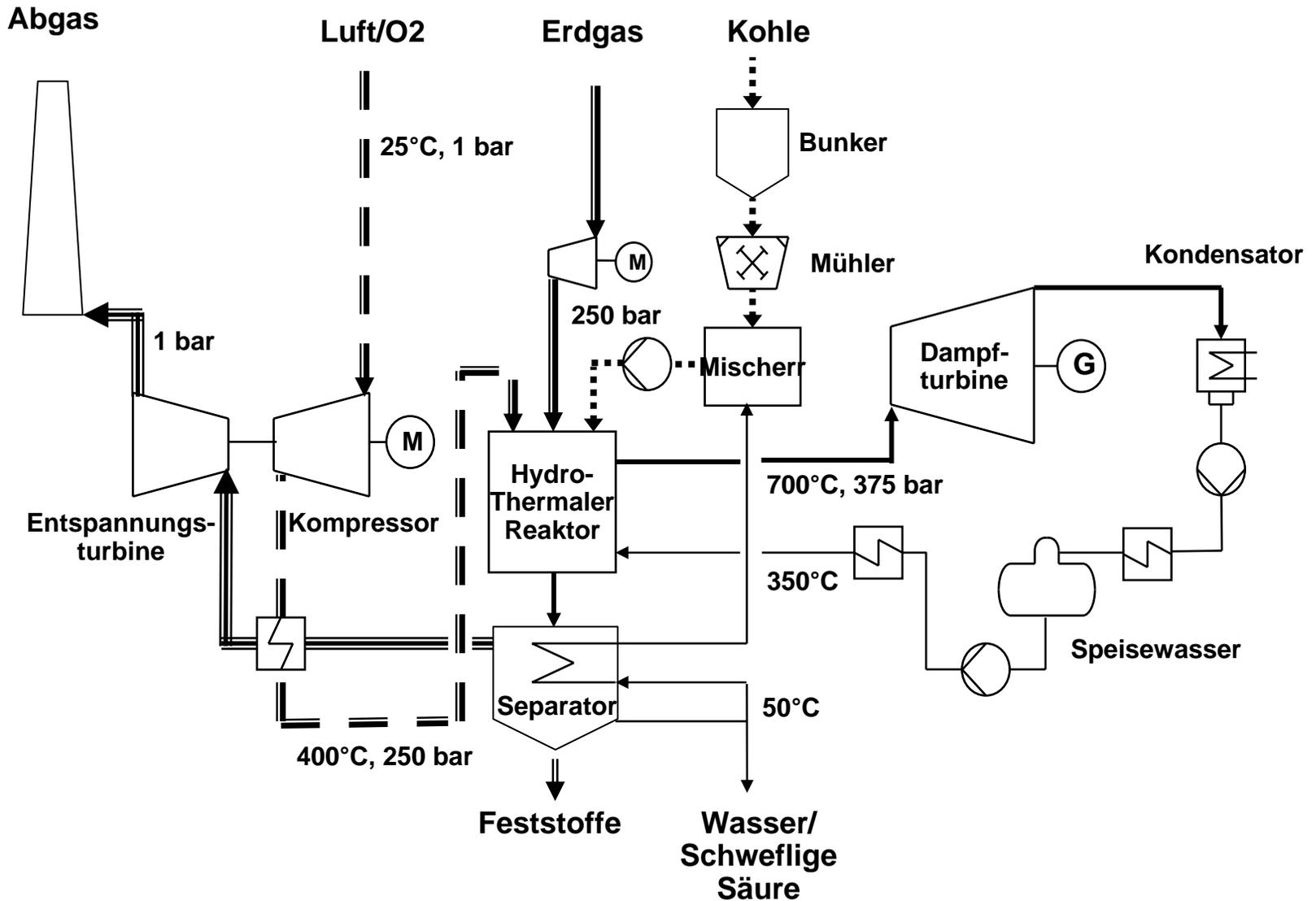
# Hydrothormaler Generator: Design

- Brennstoffe:**
- Kohlen
  - Öle
  - Erdgas
  - Müll
  - Biomasse

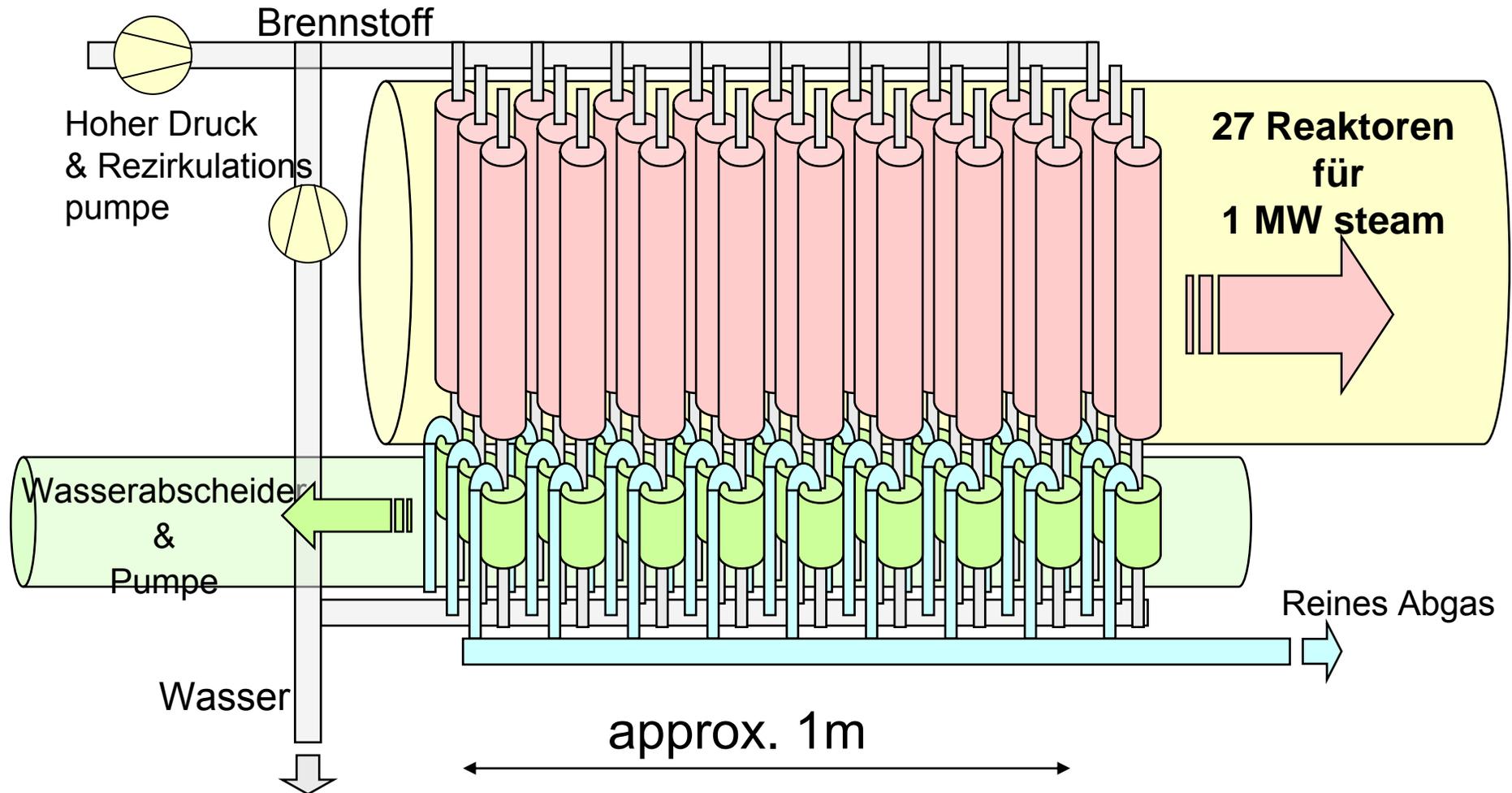


H.J.Schmutzler  
H.P.Bossmann  
Dr. Eisenreich, FhG

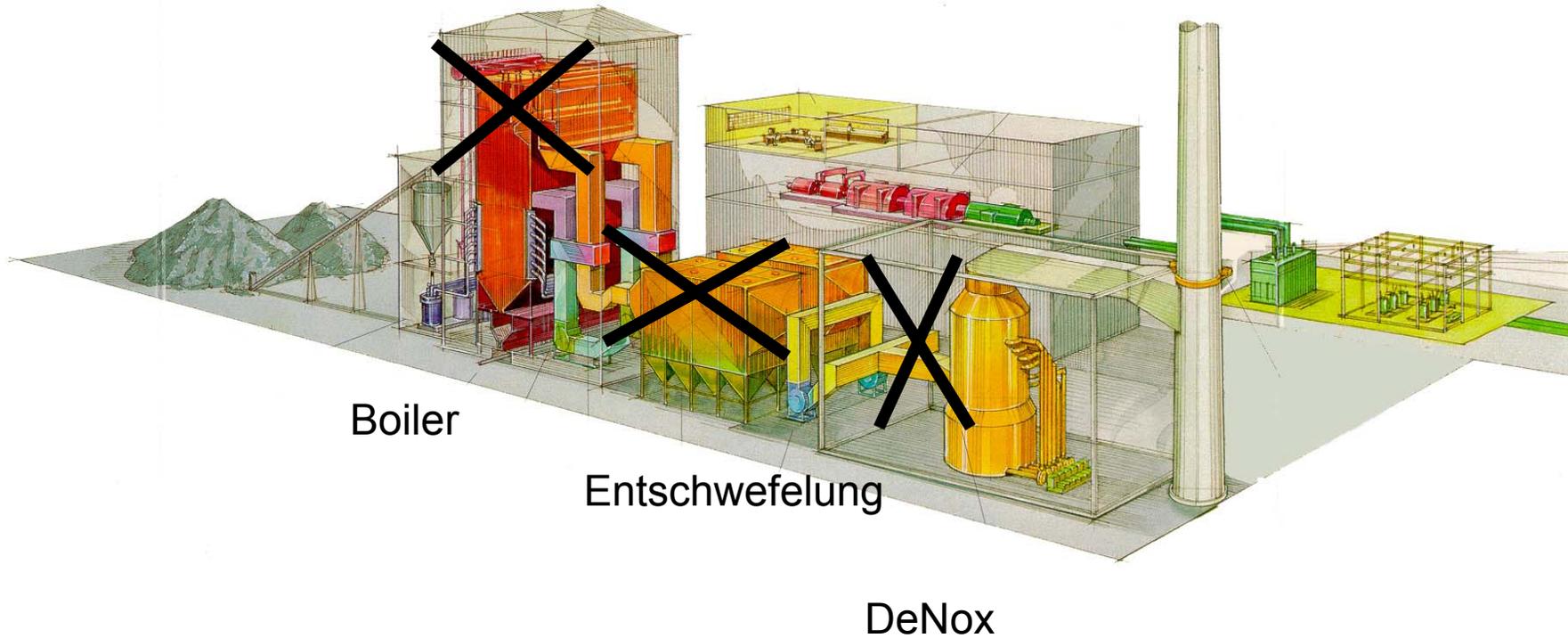
# Hydrothermal Kraftwerk: Flussbild



# Hydrothermal Power Plant: 1 MW Unit



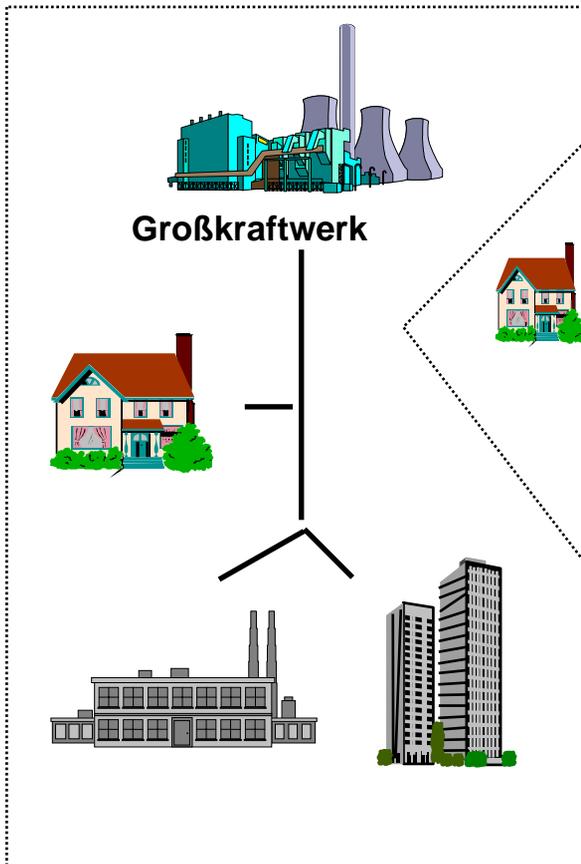
# Hydrothermale Kraftwerk: Skizze



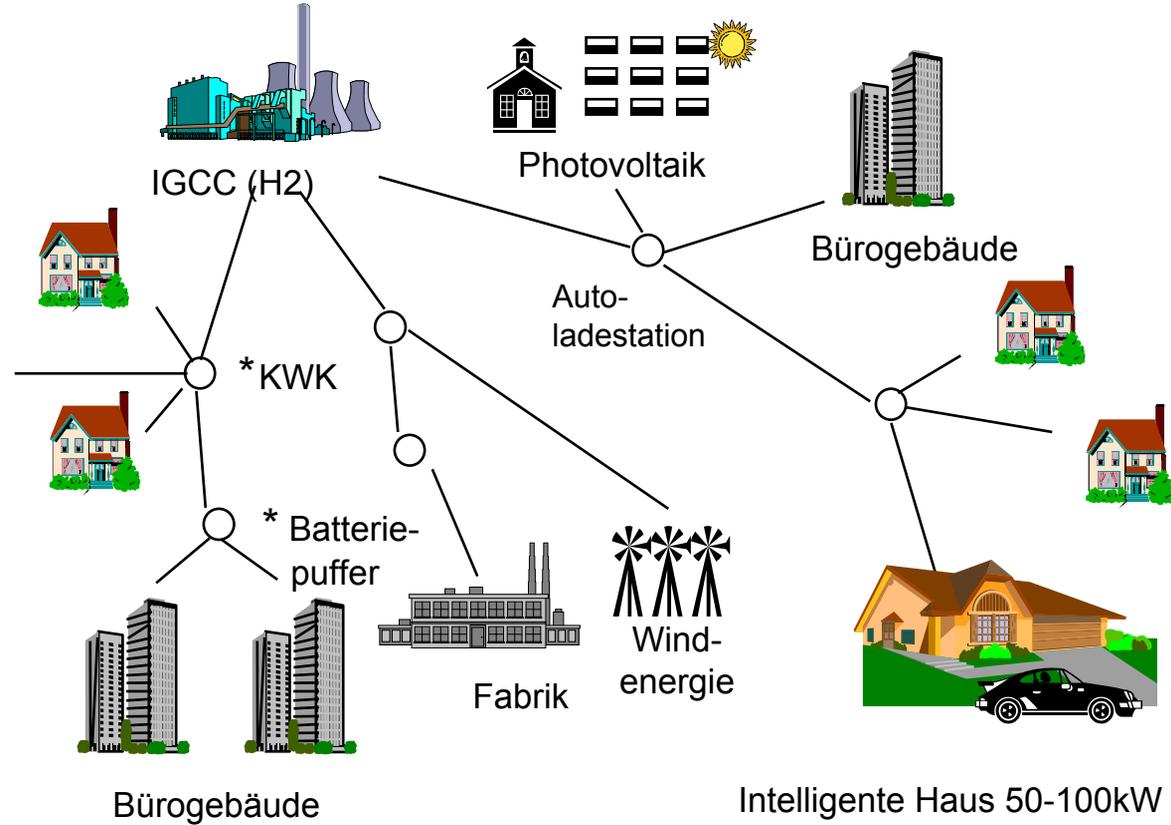
Etwa 40 % des Anlagevolumens könnten eingespart werden.

# Virtuelle Kraftwerk

Heute



Morgen



Intelligente Haus 50-100kW  
Das Brennstoffzellenauto  
versorgt das Haus mit Strom  
und Einspeisung ins Netz-

- Studien
  - Kohlenstoffhaltige Brennstoffe werden für die Stromerzeugung absolut zunehmen.
- CO<sub>2</sub>-Abscheidung ist heute bereits möglich
  - Hoher Wirkungsgradverlust
  - Statt Ressourcenschonung, deren schneller Verbrauch
- Verbrennung mit Sauerstoff über Membranluft-trennmodule energetisch günstig, aber noch nicht entwickelt.
- Weltweite Forschung mit Fokus auf
  - Wirkungsgradsteigerung der bestehenden Technik.
  - Kostengünstige Luftzerlegung.
  - CO<sub>2</sub>-Speicherung (Europa: Sleipner-Ölfeld, Ketzin)

Vielen Dank für Ihr Interesse an meinem Thema.

Bitte stellen Sie Ihre Fragen.

Weitere Informationen finden Sie unter:

Internet: [www.cooretec.de](http://www.cooretec.de)

Email: [axel.kranzmann@bam.de](mailto:axel.kranzmann@bam.de)