

# Moderne Kohlekraftwerke – Effizienzerhöhung und CO<sub>2</sub>-Abscheidung

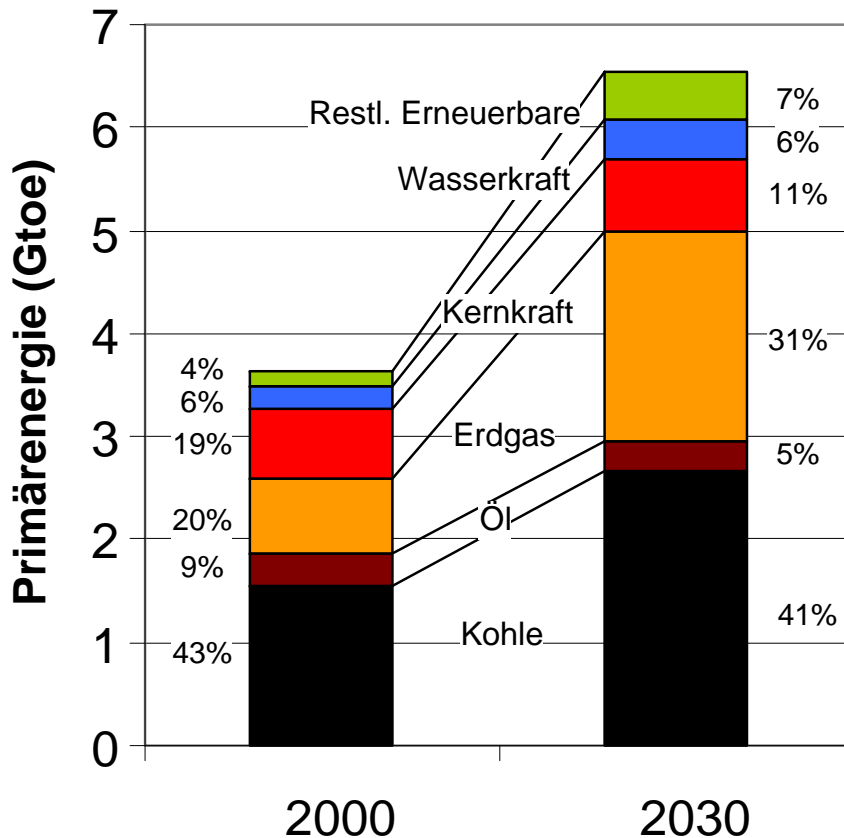
Prof. Dr.-Ing. H. Spliethoff  
Lehrstuhl für Energiesysteme

# Votragsinhalte

1. Entwicklungen
2. CO<sub>2</sub>-Minderungsoptionen
3. Wirkungsgradsteigerung bei Kohlekraftwerken
4. Carbon Capture & Storage

1. Entwicklungen

# PEV in der Stromerzeugung bis 2030 (IEA)

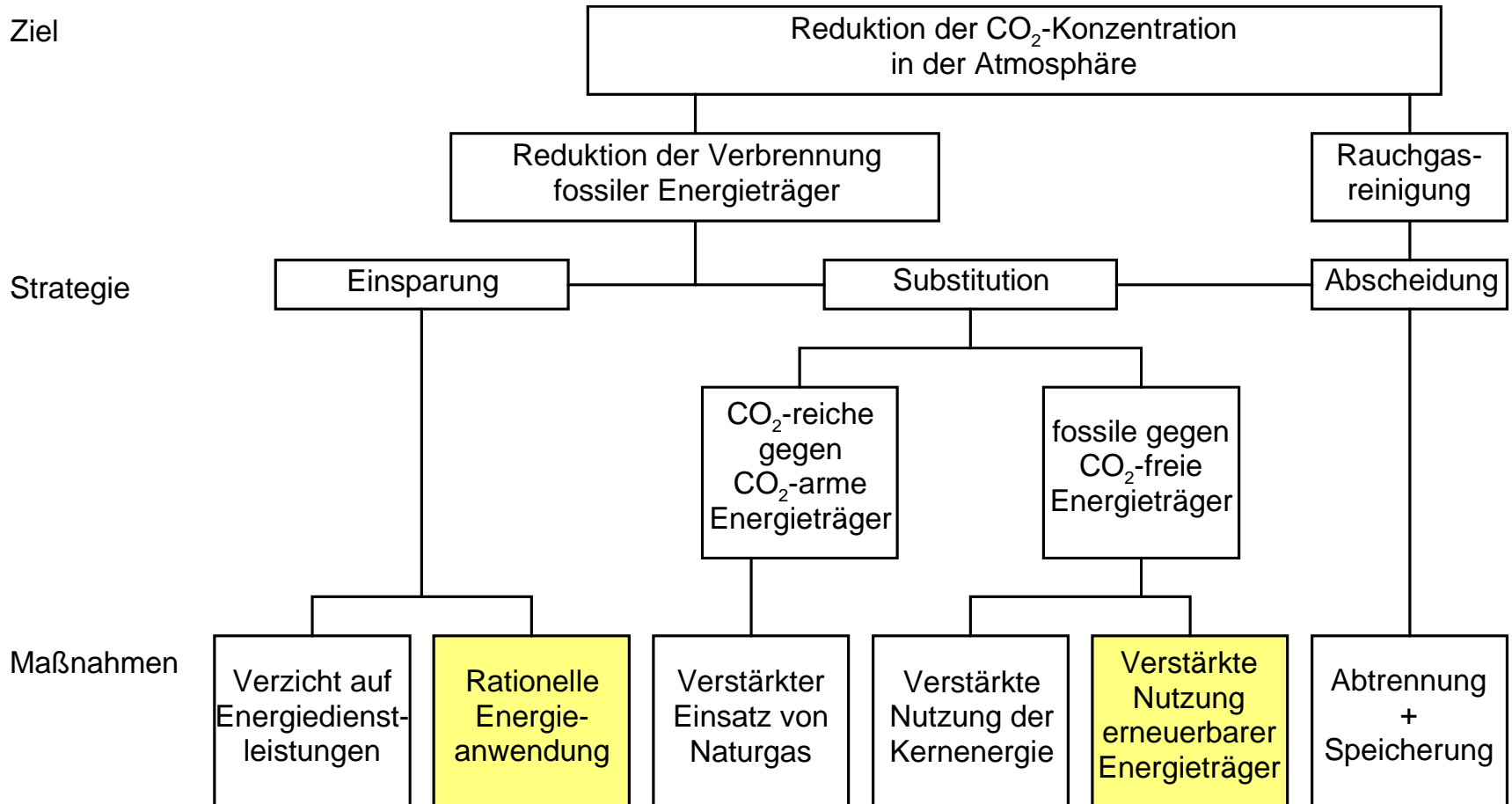


Quelle: World Energy Outlook 2002

- Neubaubedarf
- 2020: 2500 GW
- 2030: 4800 GW
- Schwellenländer: Zusatzbedarf
- Europa: Ersatzbedarf
- Konkurrenz: Kohle – Gas

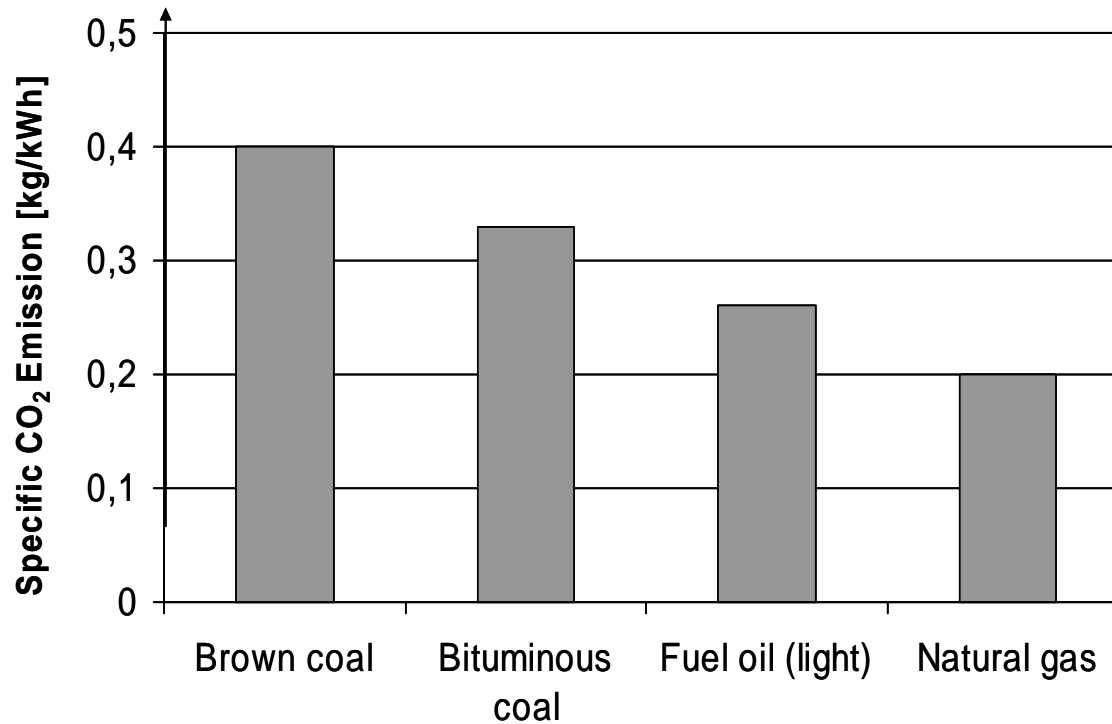
2. Minderungsoptionen

# Strategien zur CO<sub>2</sub>-Minderung



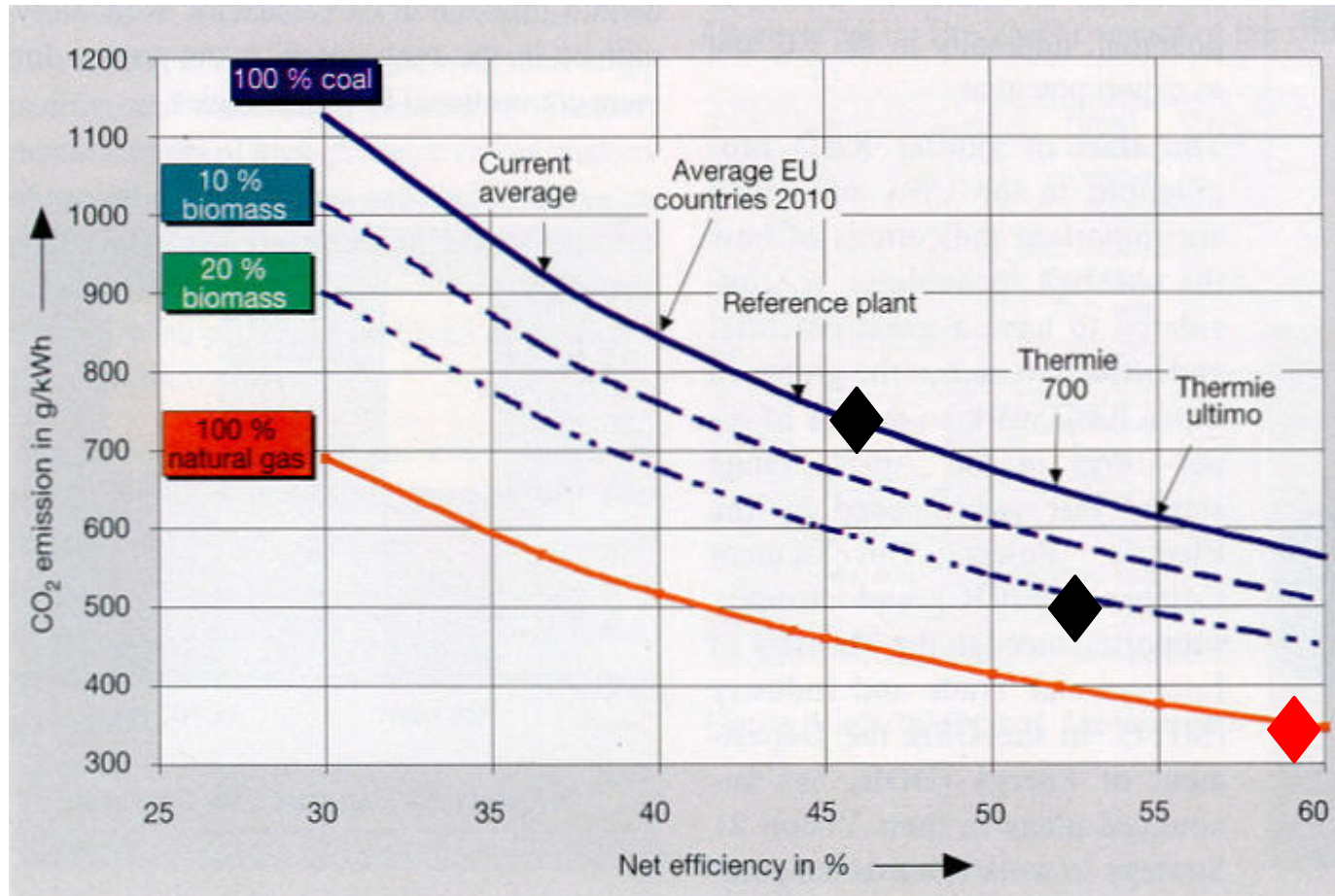
## 2. Minderungsoptionen

# CO<sub>2</sub>-Minderung – Effizienz und C-Gehalt



## 2. Minderungsoptionen

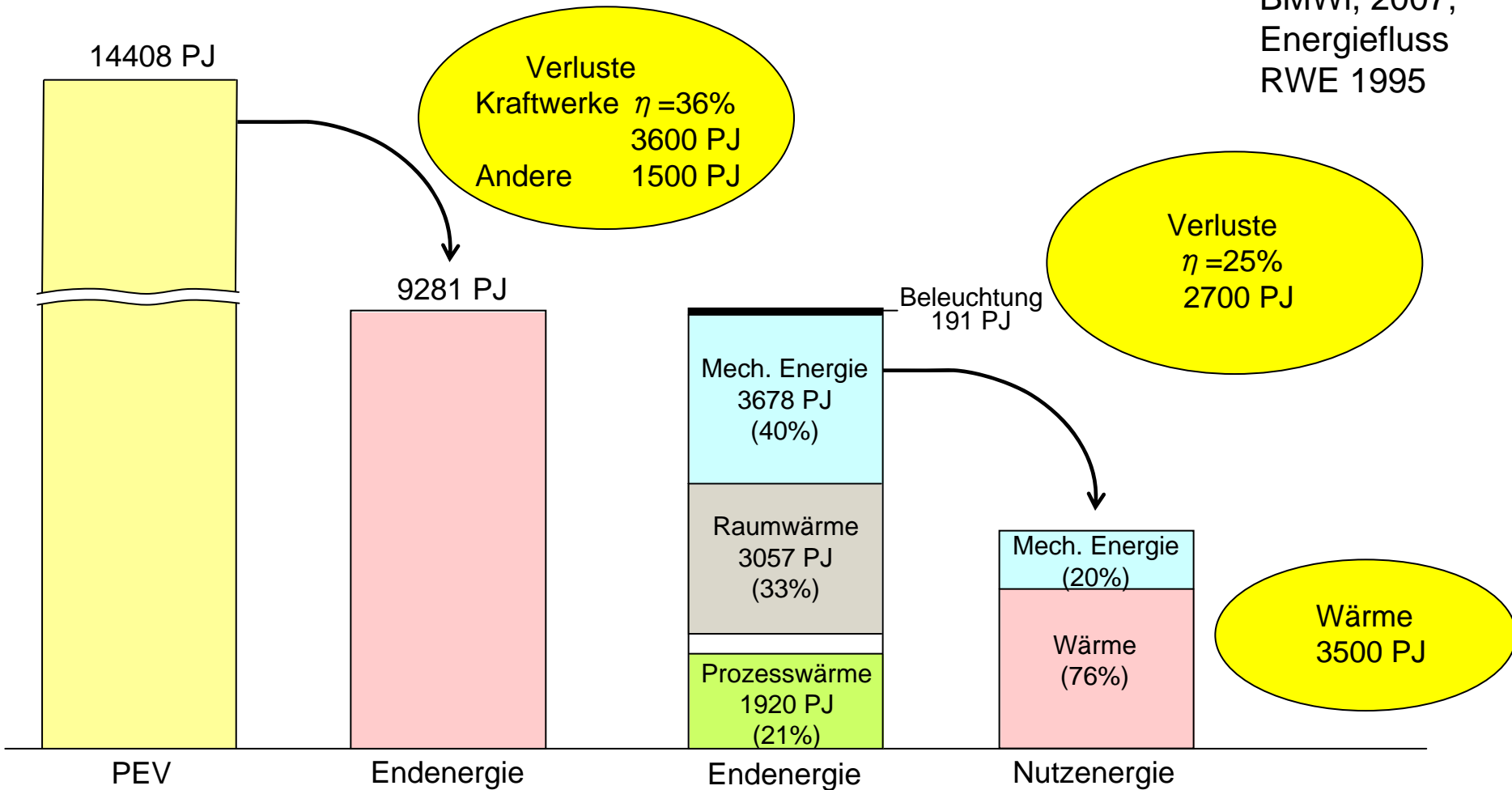
# CO<sub>2</sub>-Emissionen von Kraftwerken



## 2. Minderungsoptionen

# Effizienzpotentiale – Betrachtung der Umweltverluste/D

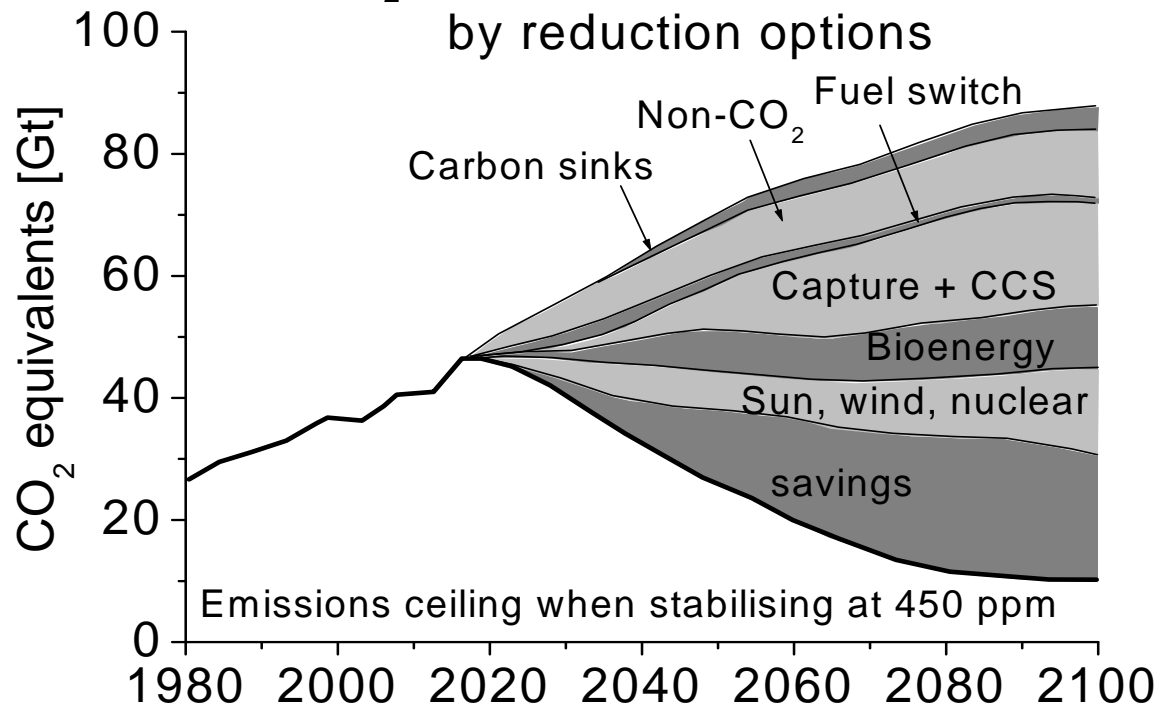
Datenquelle:  
BMW, 2007,  
Energiefluss  
RWE 1995



2. Minderungsoptionen

# Vermeidungsszenario (Welt)

d) Mitigation scenario (450 ppm)  
CO<sub>2</sub>-emissions and contribution  
by reduction options





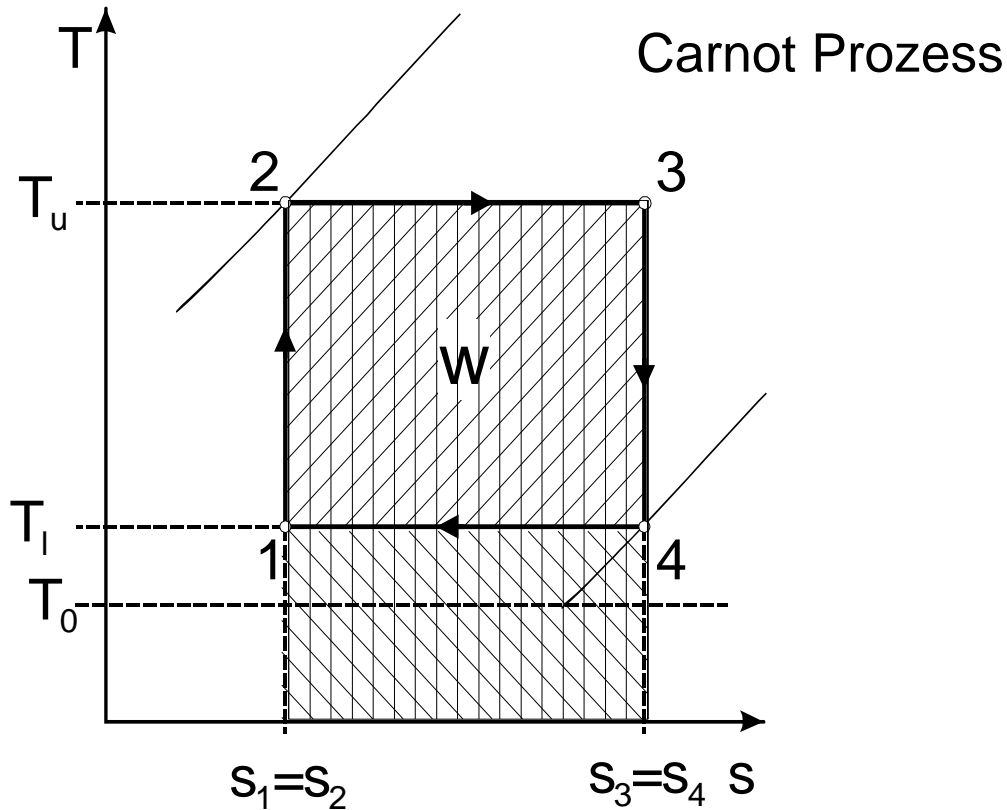
## 2. Minderungsoptionen

# Entwicklungsziele Stromerzeugung

- Effizienzsteigerung
- Erneuerbare
- CO<sub>2</sub>-Speicherung

### 3. Effizienzsteigerung

## Wirkungsgraderhöhung bei Kohlekraftwerken

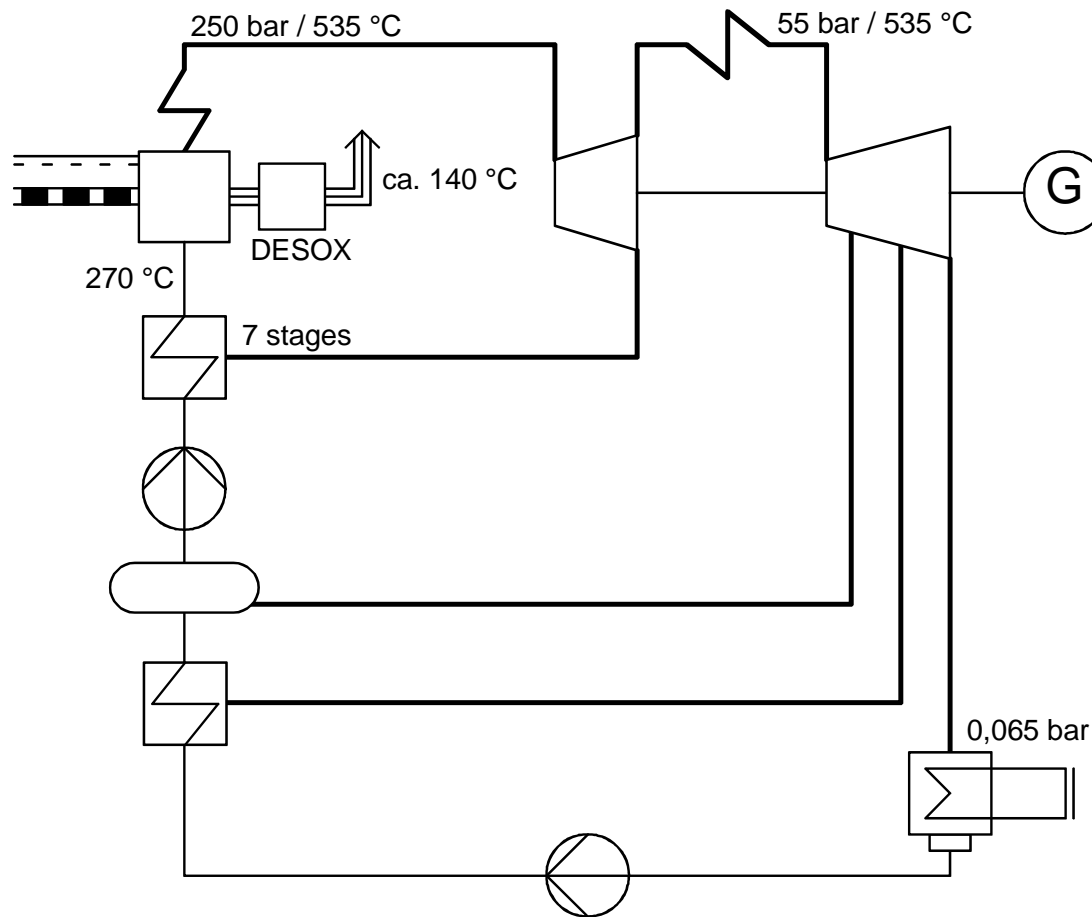


$$\eta = \frac{|W|}{q_{in}} = \frac{q_{in} - |q_{out}|}{q_{in}}$$

$$= \frac{T_u - T_l}{T_u} = 1 - \frac{T_l}{T_u}$$

### 3. Effizienzsteigerung

## Dampfkraftwerk – Stand der Technik

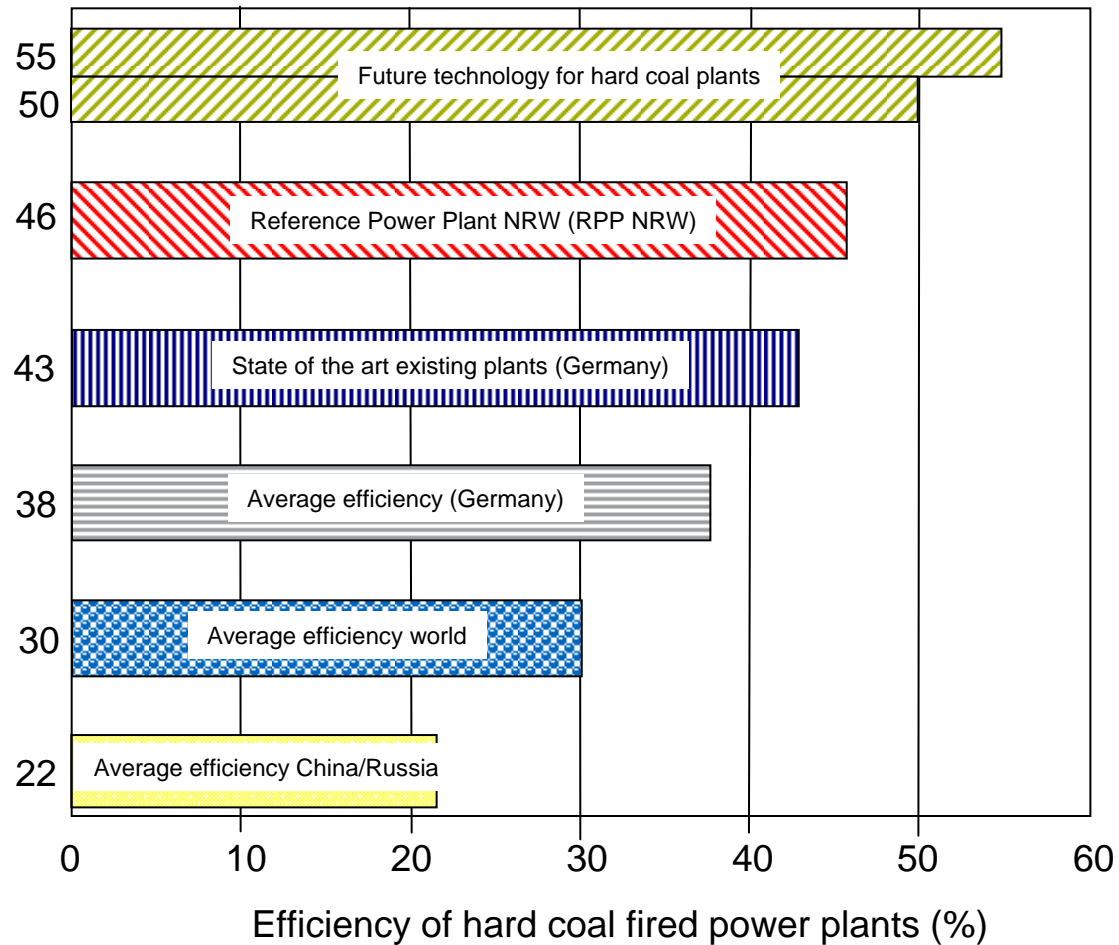


Einflussgrößen:

- Mittlere Temperatur der Wärmezufuhr
- Mittlere Temperatur der Wärmeabfuhr
- Verluste
- Eigenbedarf

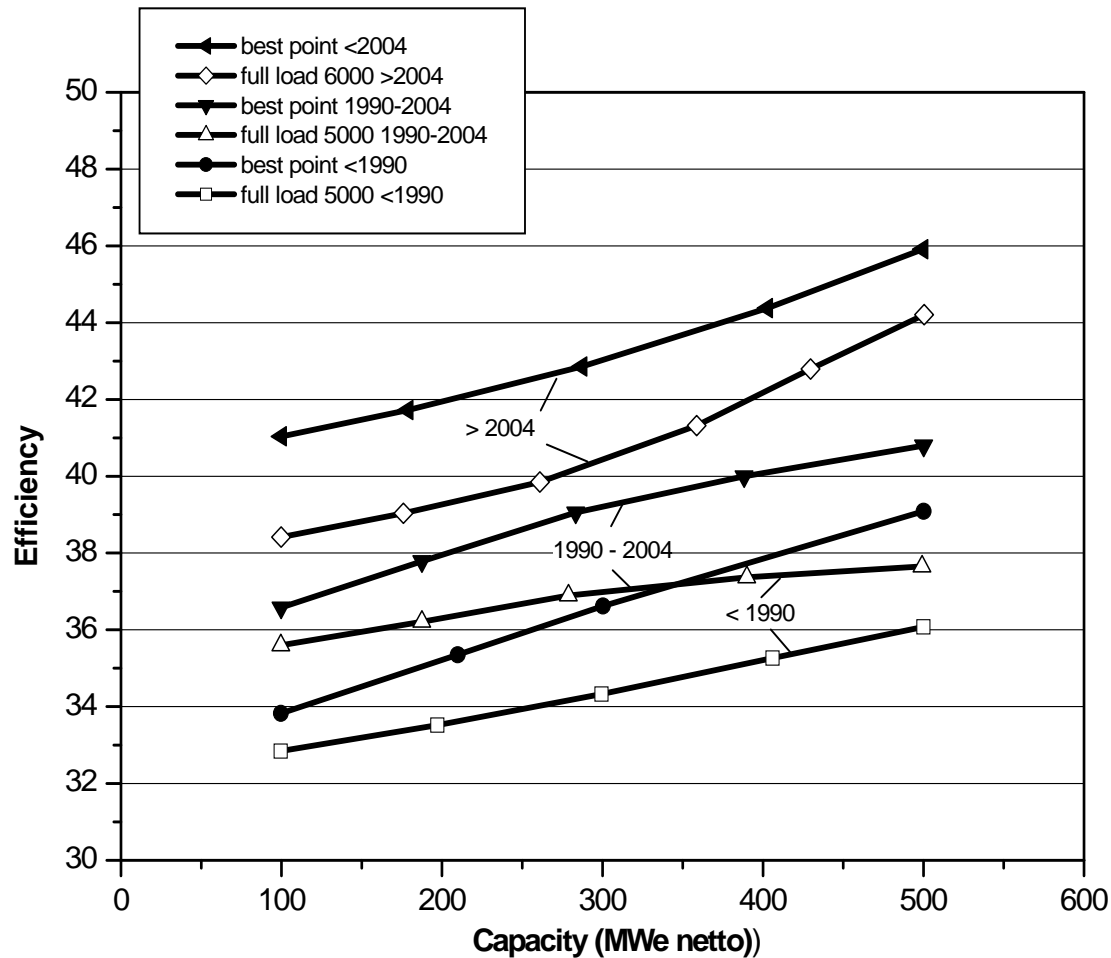
### 3. Effizienzsteigerung

## Wirkungsgrade von Kohlekraftwerken



### 3. Effizienzsteigerung

# Betriebswirkungsgrade von Kohlekraftwerken



### 3. Effizienzsteigerung

## In Planung und Bau befindliche Kraftwerke



### 3. Effizienzsteigerung

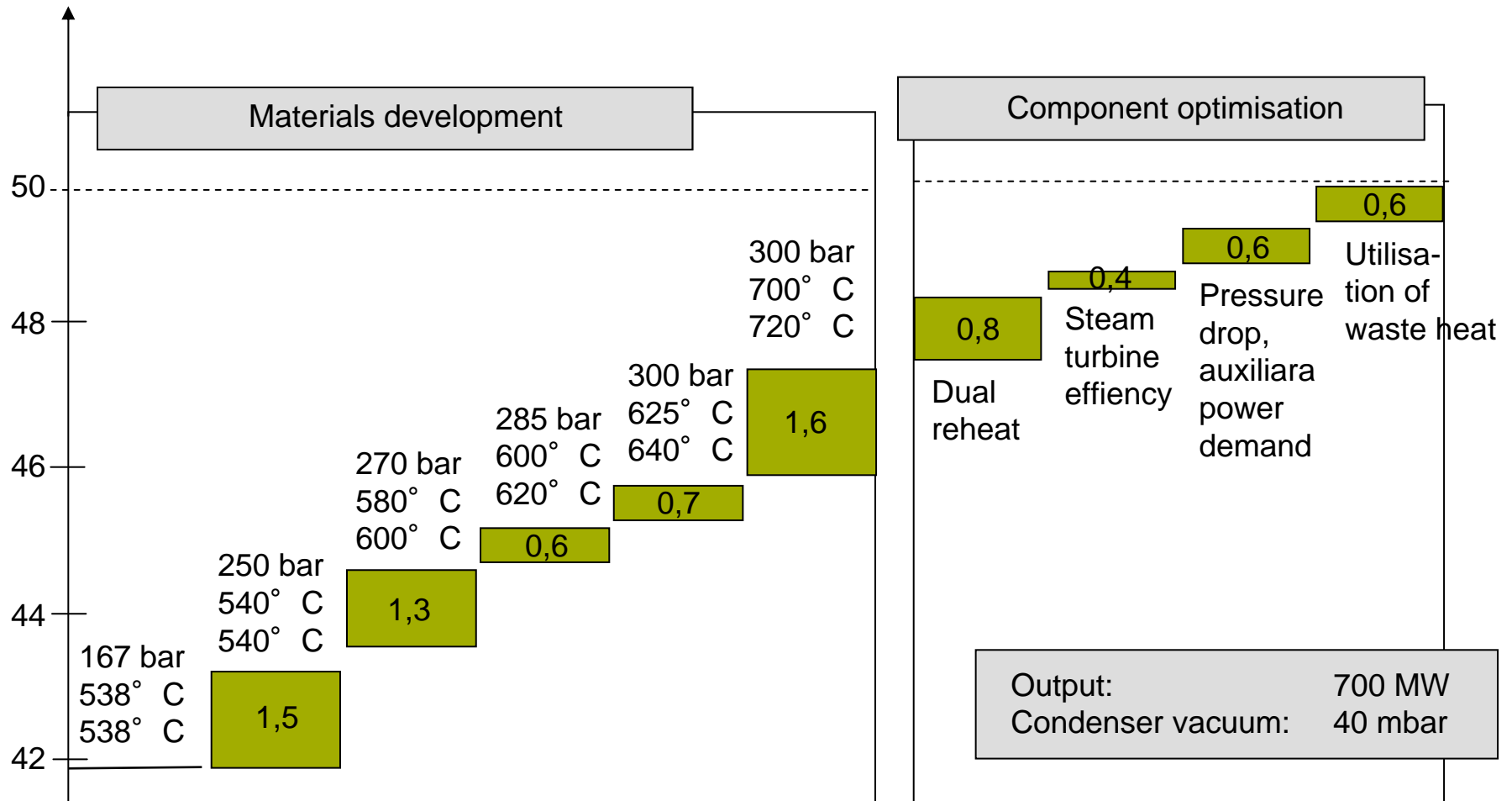
## Materialentwicklung und Dampfzustände

|   | 250                       | 250 | 270                      | 300 | 300-350              |
|---|---------------------------|-----|--------------------------|-----|----------------------|
| LS pressure [bar]                           | 250                       | 250 | 270                      | 300 | 300-350              |
| LS temperature [° C]                        | 540                       | 566 | 580                      | 600 | 700-720              |
| RH temperature [° C]                        | 560                       | 566 | 600                      | 620 | 700-720              |
| Membrane wall                               | 13 CrMo 44                |     | HCM 2S<br>7 CrMoVTiB1010 |     | HCM 12,<br>T91, A617 |
| Final superheater<br>and reheater<br>stages | X20 CrMoV 121<br>T91, T92 |     | Austenitic<br>steels     |     | Nickel<br>alloys     |
| Steam pipes, header                         | P91                       |     | NF616 / E911<br>P92      |     | Nickel<br>alloys     |
| Turbine parts                               | 1-2 % Cr                  |     | 9-12 % Cr                |     | Nickel<br>alloys     |



### 3. Effizienzsteigerung

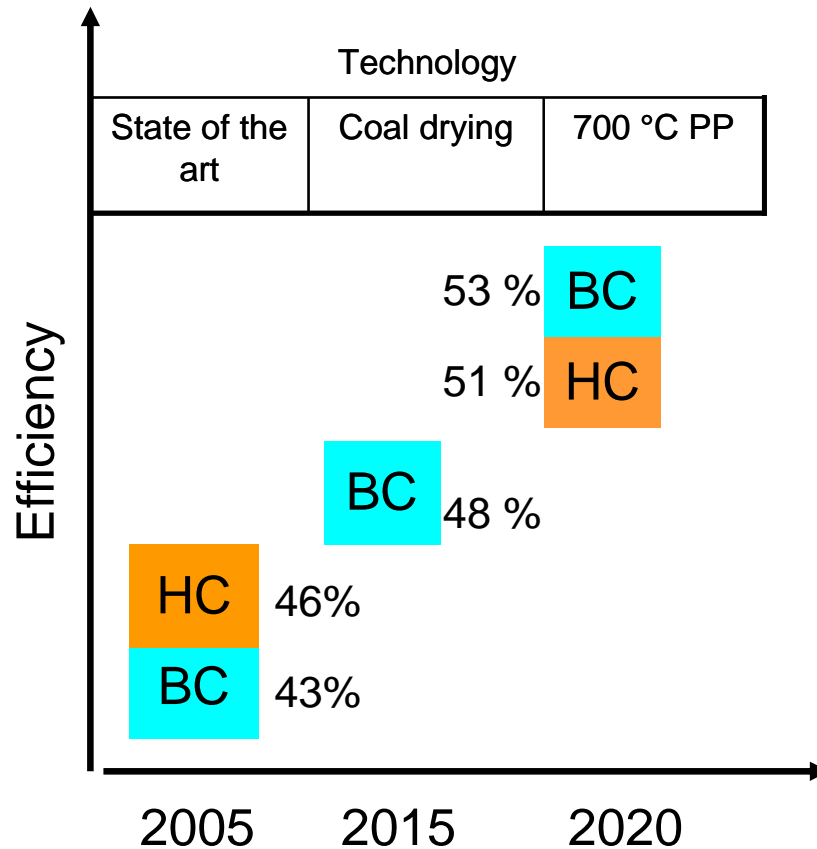
## Weiterentwicklung





### 3. Effizienzsteigerung

## Entwicklung Braunkohle - Steinkohle



- **Advanced steam power plant**
  - Development and qualification of boiler and turbine steels
  - Target: 700 – 750 ° C power plant with efficiency above 50 %

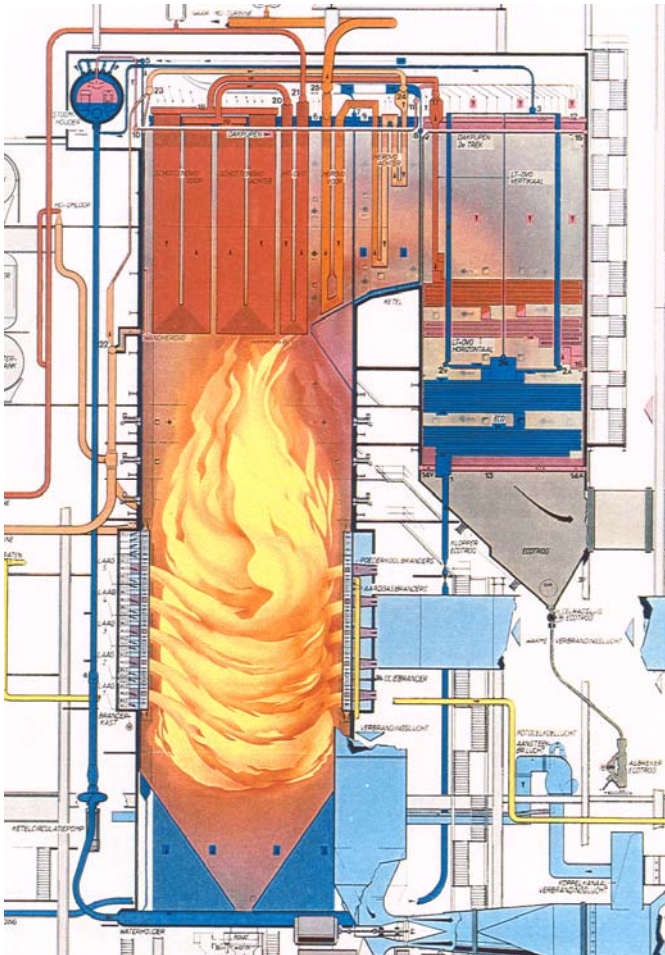
### 3. Effizienzsteigerung

## Weiterentwicklung

|                       | Staudinger       | Rostock          | NRW              | R&D<br>Thermie   | R&D<br>Thermie   |
|-----------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|
| Commissioning         | 1992             | 1994             | project          | project          | project          |
| Net power [MW]        | 510              | 510              | 556              | 556              | 556              |
| LS pressure [bar]     | 250              | 262              | 285              | 350              | 375              |
| LS temperature [°C]   | 540              | 545              | 600              | 700              | 700              |
| RH temperature [°C]   | 560              | 562              | 620              | 720              | 720 / 720        |
| RH pressure [bar]     | 53               | 54               | 60               | 60               | 120 / 23,5       |
| Condensor press.[bar] | 0,038/0,052      | 0,027/0,033      | 0,045            | 0,045            | 0,045            |
| Cooling               | Cooling<br>tower | Cooling<br>tower | Cooling<br>tower | Cooling<br>tower | Cooling<br>tower |
| Feed water temp. [°C] | 270              | 270              | 304              | 304              | 335              |
| Number preheater      | 7                | 7                | 8                | 8                | 8                |
| <b>Efficiency [%]</b> | <b>42,7</b>      | <b>43,8</b>      | <b>45,9</b>      | <b>48,7</b>      | <b>50,1</b>      |

### 3. Effizienzsteigerung

## Biomassemitverbrennung

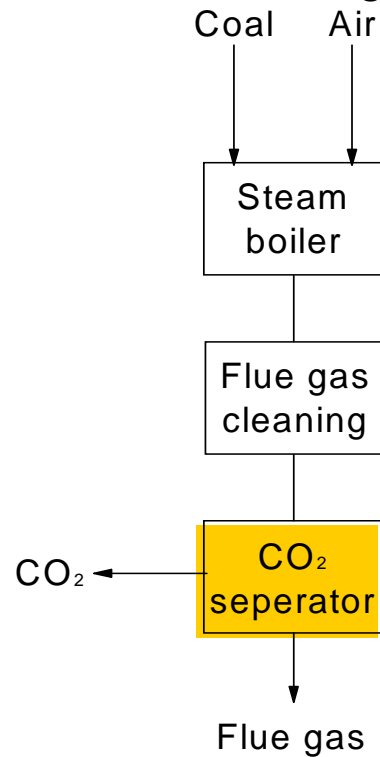


- Maasvlakte/ NL
- 2 x 540 MWel Pulverized Coal
- Co-firing of biomass up to 6.8 % (energy), future up to 20 %
- Biomass:
- Questions:
  - Combustion behaviour
  - Emissions, trace emissions
  - By-products
  - Slagging, fouling, corrosion

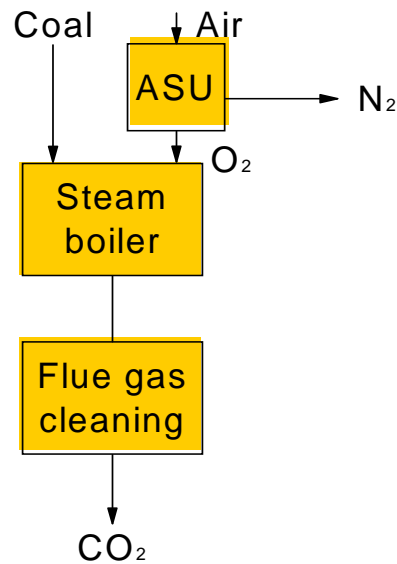
#### 4. Carbon Capture Storage

## Überblick CO<sub>2</sub>-freie Kraftwerke

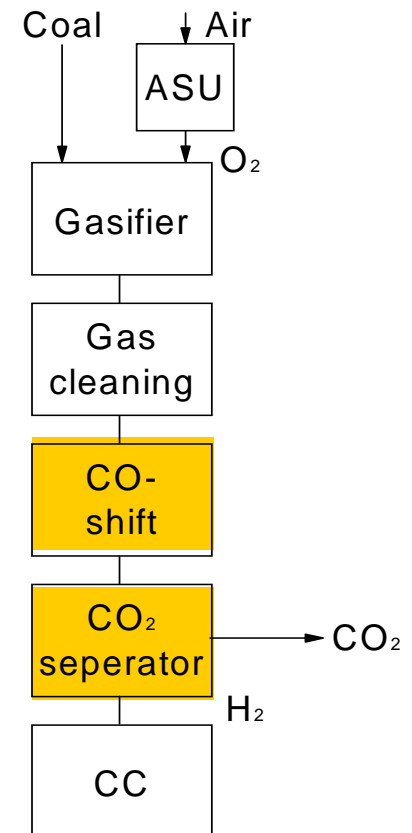
Post-combustion:  
chem. Abscheidung



Pre-combustion:  
O<sub>2</sub>-Verbrennung

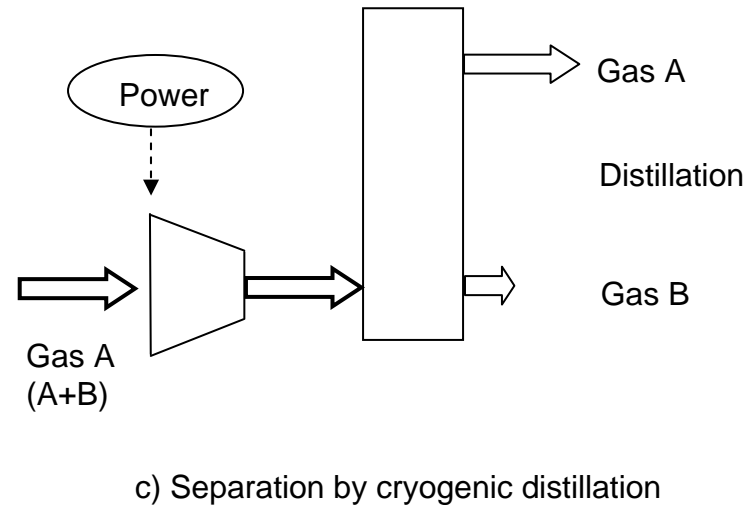
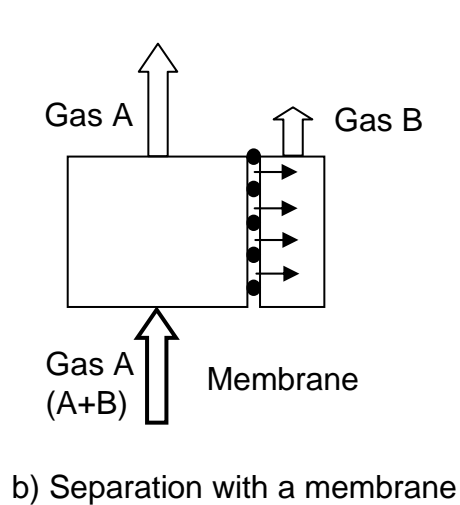
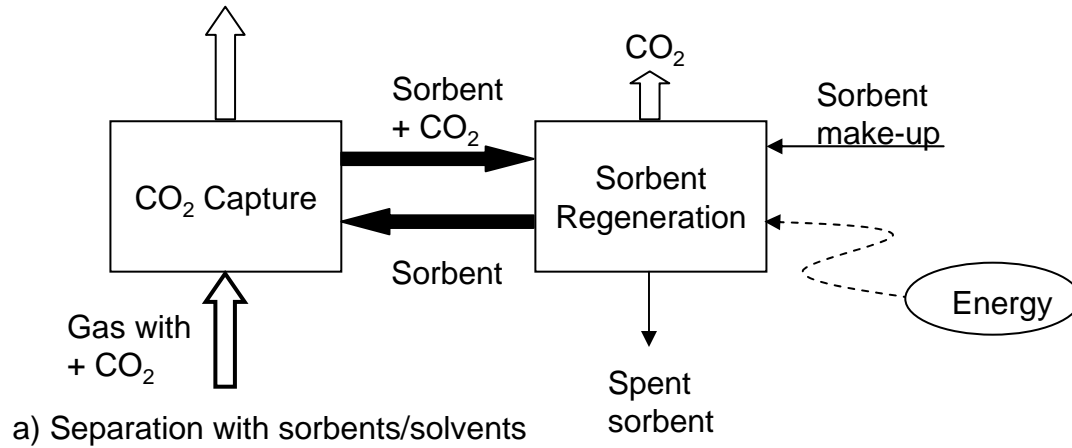


Pre-combustion:  
Vergasung



## 4. Carbon Capture Storage

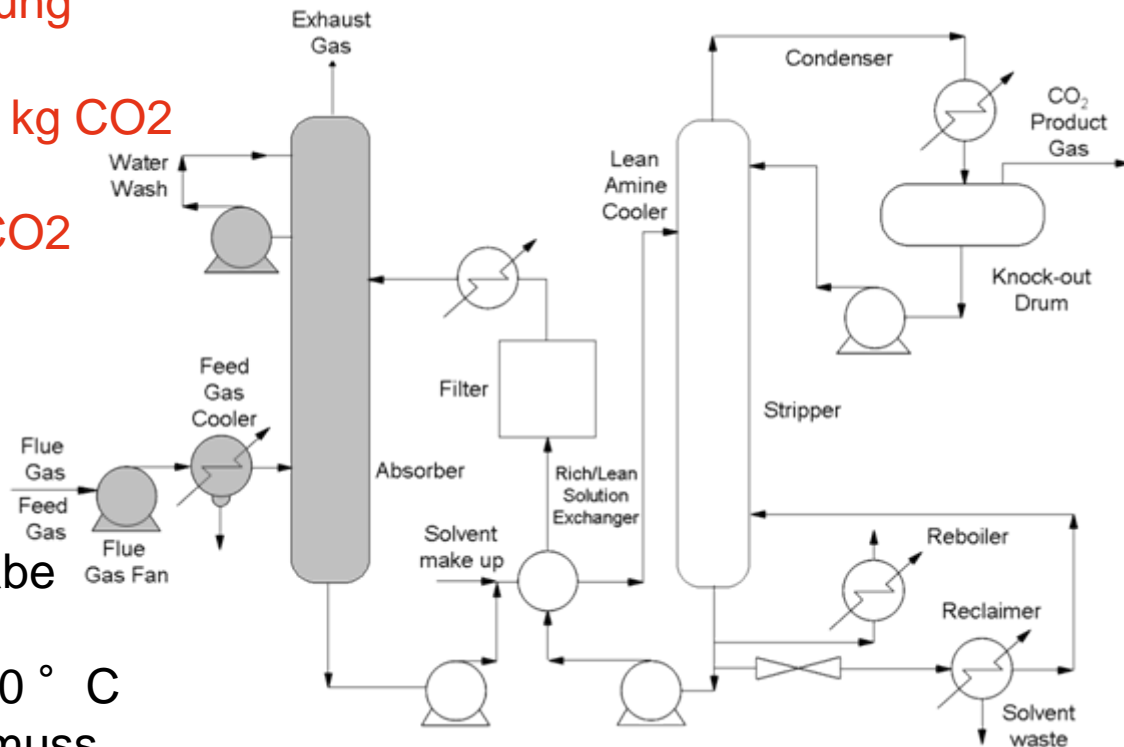
# CO<sub>2</sub>-Trennverfahren



#### 4. Carbon Capture Storage

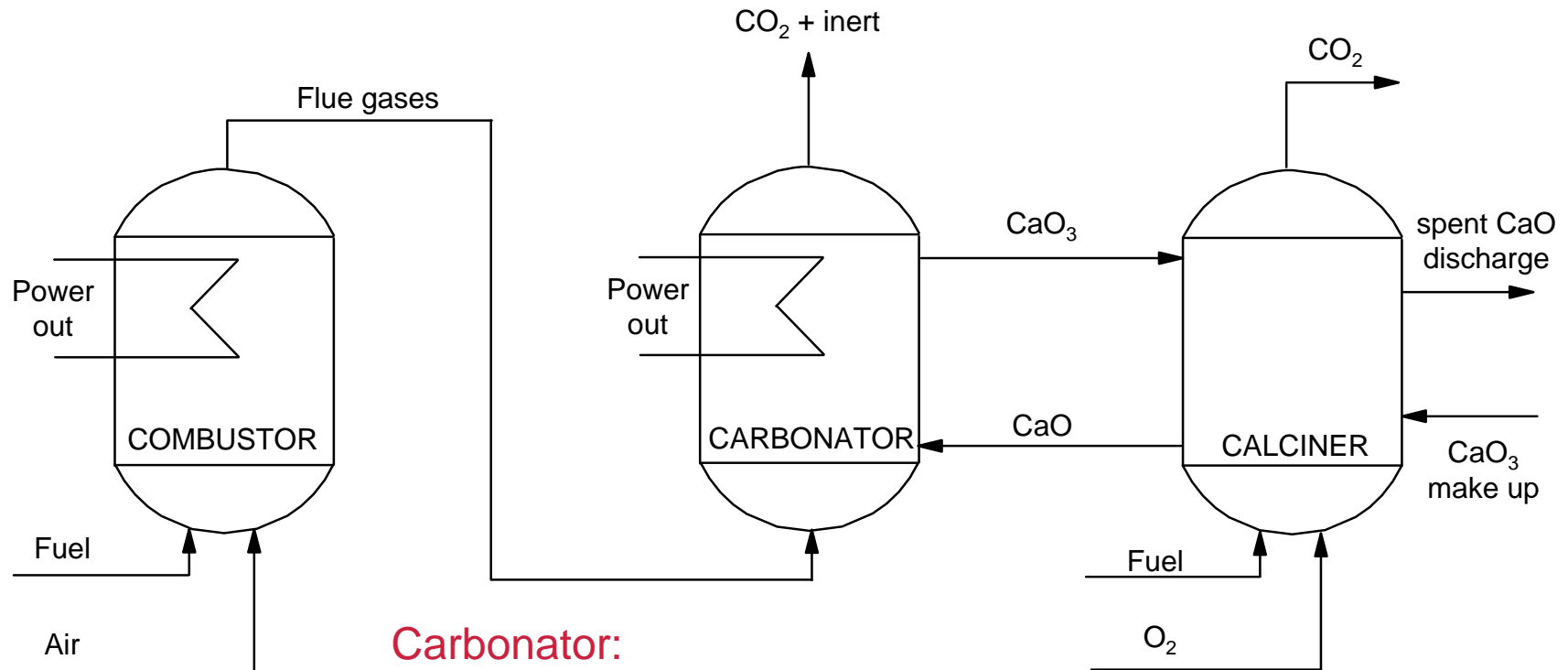
## CO<sub>2</sub>-Abscheidung durch chemische Absorption

- Wirkungsgradabschätzung
  - Verlust an Stromerzeugung  
0,2-0,35 kWh/ kg CO<sub>2</sub>
  - Kompression 0,13 kWh/ kg CO<sub>2</sub>
- Summe 0,35-0,5 kWh/ kg/ CO<sub>2</sub>
- Kraftwerk  $\eta = 45 \%$   
 $\Delta \eta = 10 - 14 \%$
- CO<sub>2</sub>-Absorption: Wärmeabgabe (exotherm) bei niedrigem Temperaturniveau ca. 50-100 ° C
- CO<sub>2</sub>-Regeneration: Wärme muss zugeführt werden (endotherm) bei ca. 200 ° C



#### 4. Carbon Capture Storage

## CO<sub>2</sub>-Abscheidung durch Adsorption

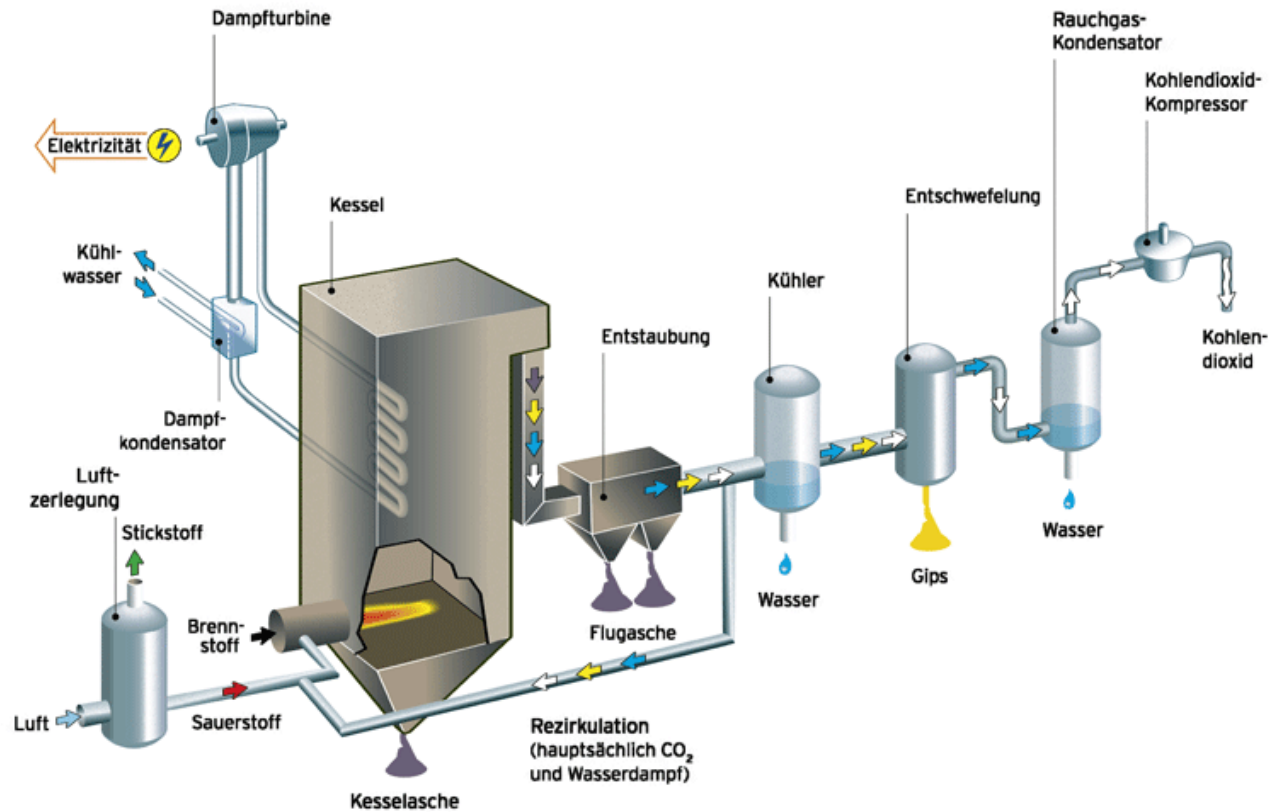


Carbonator:  
 $\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$   
 (exotherm !!!)  
 $T = 650^\circ \text{C}$

$\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$   
 Endotherm !!!  
 $T = 800-900^\circ \text{C}$

## 4. Carbon Capture Storage

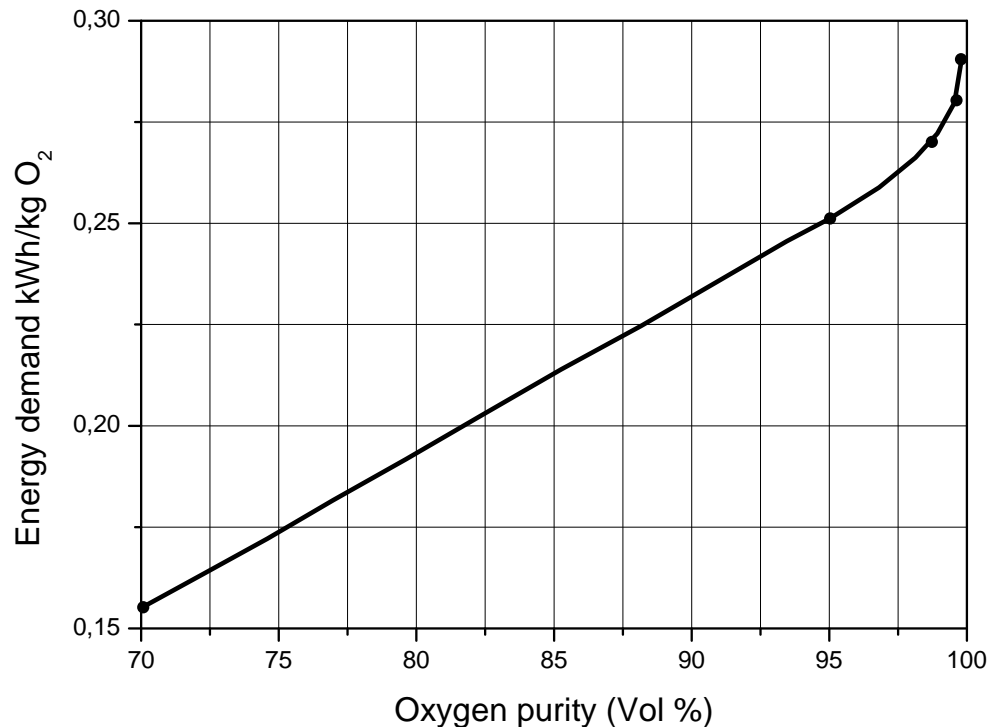
# Verbrennung mit Sauerstoff





#### 4. Carbon Capture Storage

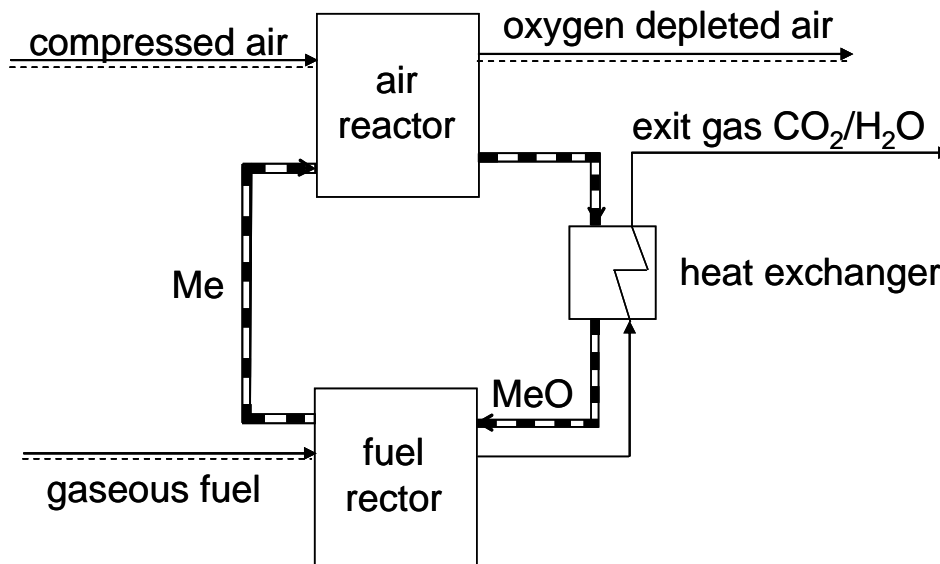
## Energieaufwand zur Sauerstoffzerlegung



- Wirkungsgradabschätzung
- Luftzerlegung (99 %  
Reinheit)  
0,3 kWh/ kg O<sub>2</sub>
- ◇ el. Bedarf 0,175 kWh/ kWel ◇
- ◇  $\Delta \eta = 8 \%$  (Luftzerlegung) +  
3,5 % (Kompression)

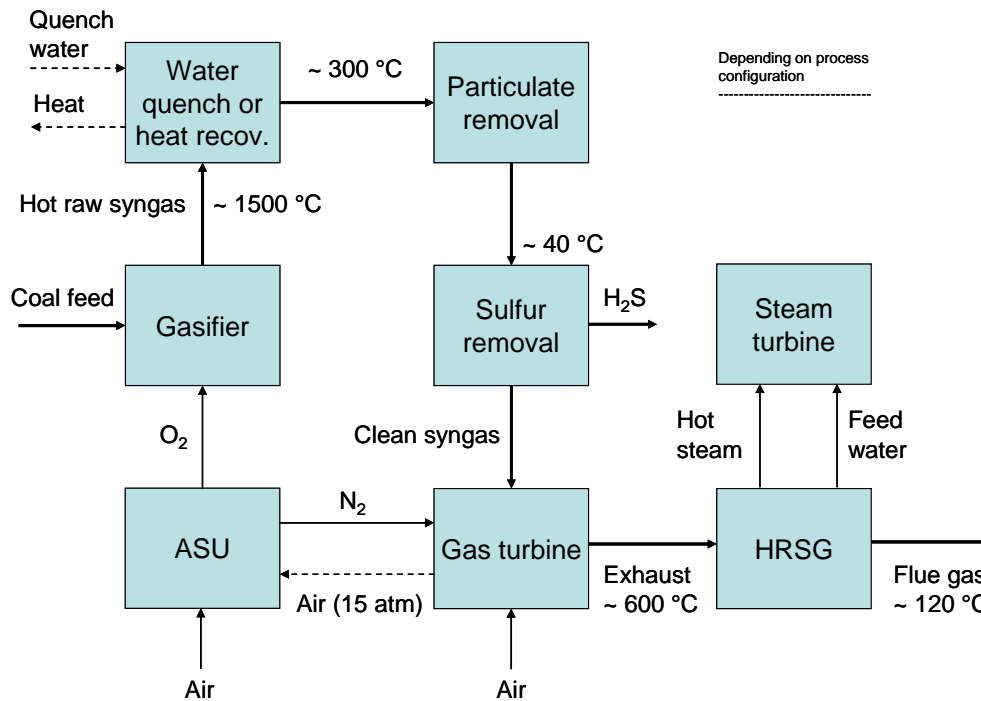
#### 4. Carbon Capture Storage

## Chemical Looping



- Sauerstoffzufuhr über Metalloxid, keine Sauerstoffzerlegung notwendig
- Wirbelschichtreaktoren bei Temperaturen 800-1200 °
- Metalle: Fe, Ni, Cu,

## 4. Carbon Capture Storage IGCC-Kraftwerk

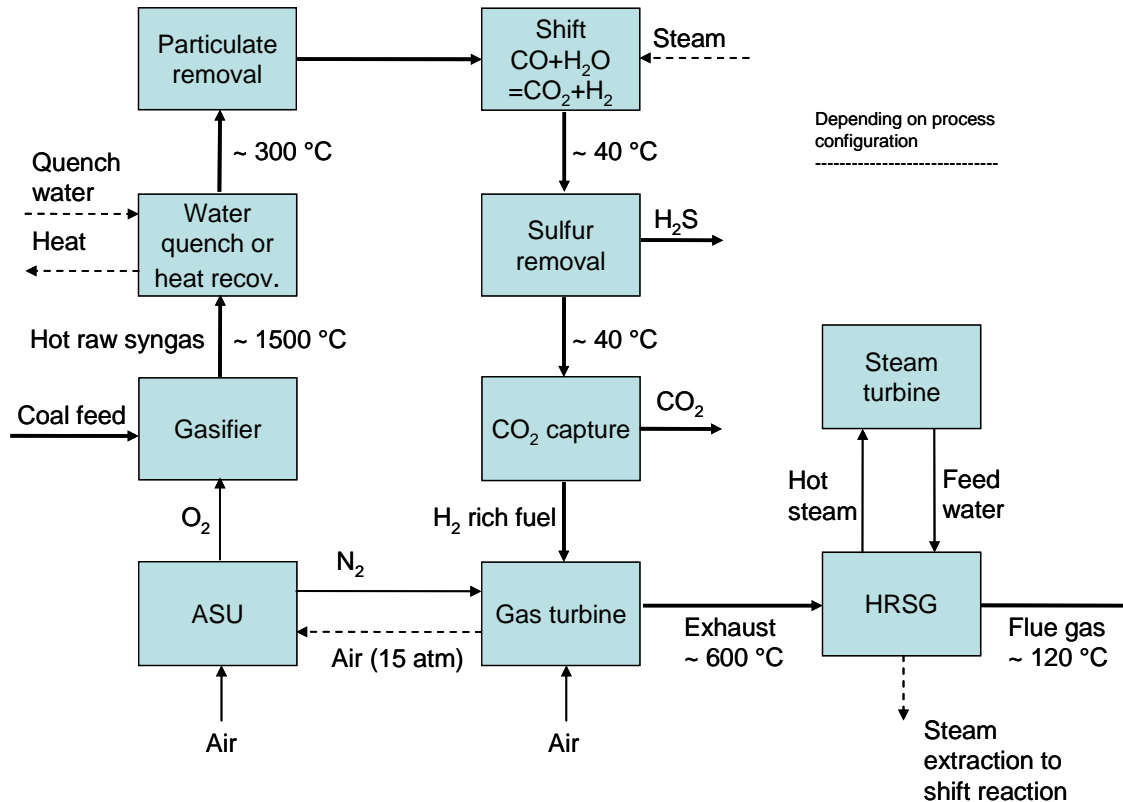


- 250 IGCC Buggenum/ NL
- 156 MW GT, 128 MW DT
- Wirkungsgrad 43 %
- Sauerstoffgeblasener Flugstromvergaser
- Kalte Gasreinigung bei 235 ° C



#### 4. Carbon Capture Storage

## Pre-Combustion: IGCC-Kraftwerk mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung durch physikalische Adsorption



### Verluste

- Shift-Konversion:  
Umwandlung chem.  
Energie in Wärme  $\Delta \eta = 2,5-5 \%$
- Trennarbeit CO<sub>2</sub>  
 $\Delta \eta = 1-2 \%$
- Verlust Gasturbinenarbeit  
(CO<sub>2</sub>)  $\Delta \eta = 1,2 \%$
- Kompression  $\Delta \eta = 3 \%$
- ◇  $\Delta \eta = 8-10 \%$

#### 4. Carbon Capture Storage

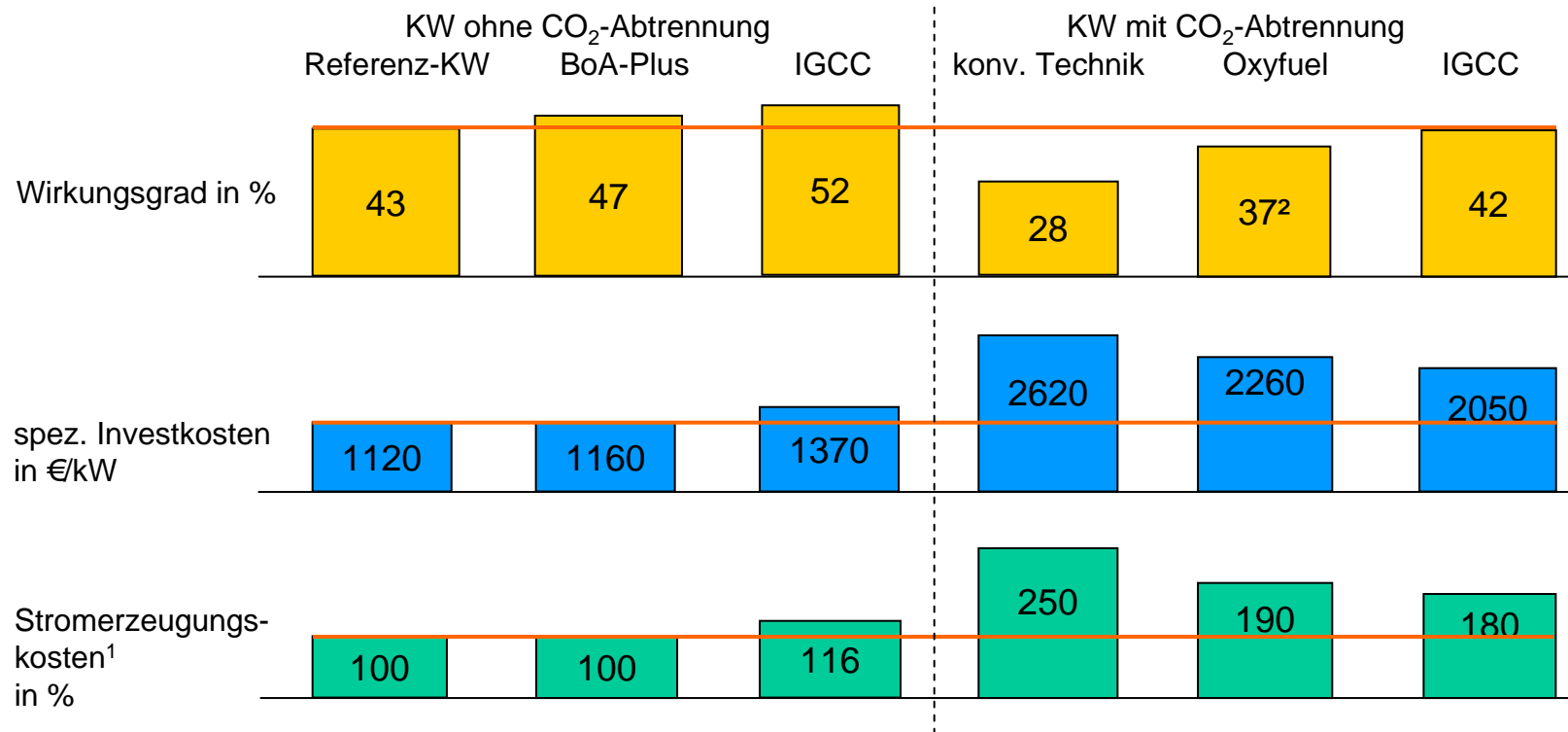
## RWE IGCC Planung



- Basic technology: IGCC
- El. capacity: 450 MW<sub>gross</sub>, 360 MW<sub>net</sub>
- Net efficiency: 40 %
- CO<sub>2</sub> storage: 2.3 mill. t/a in depleted gas reservoir or saline aquifer
- Commissioning: 2014
- RWE budget: approx. €1 billion

#### 4 Stromerzeugung

## CO<sub>2</sub>-Abscheidung – Verfahrenvergleich



<sup>1</sup>einschließlich CO<sub>2</sub>-Verdichtung, Verflüssigung und 300 km Transport

<sup>2</sup>einschließlich Vortrocknung, d.h. etwa 4%-Punkte. Vorteil gegenüber Rohkohlefeuerung berücksichtigt

## Zusammenfassung

- Effizienz

.....

- Erneuerbare
- CCS