



THE R M O D Y N A M I K

**RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM**

F. Sander / R. Span

# Einfluss der Betriebsparameter einer sauerstoffpermeablen Membran in einem Kohle befeuerten Kraftwerksprozess mit CO<sub>2</sub>-Abscheidung

Frank Sander\* und Roland Span

VDI Thermodynamik-Kolloquium 2007,  
Universität Rostock, 8.-10. Oktober 2007

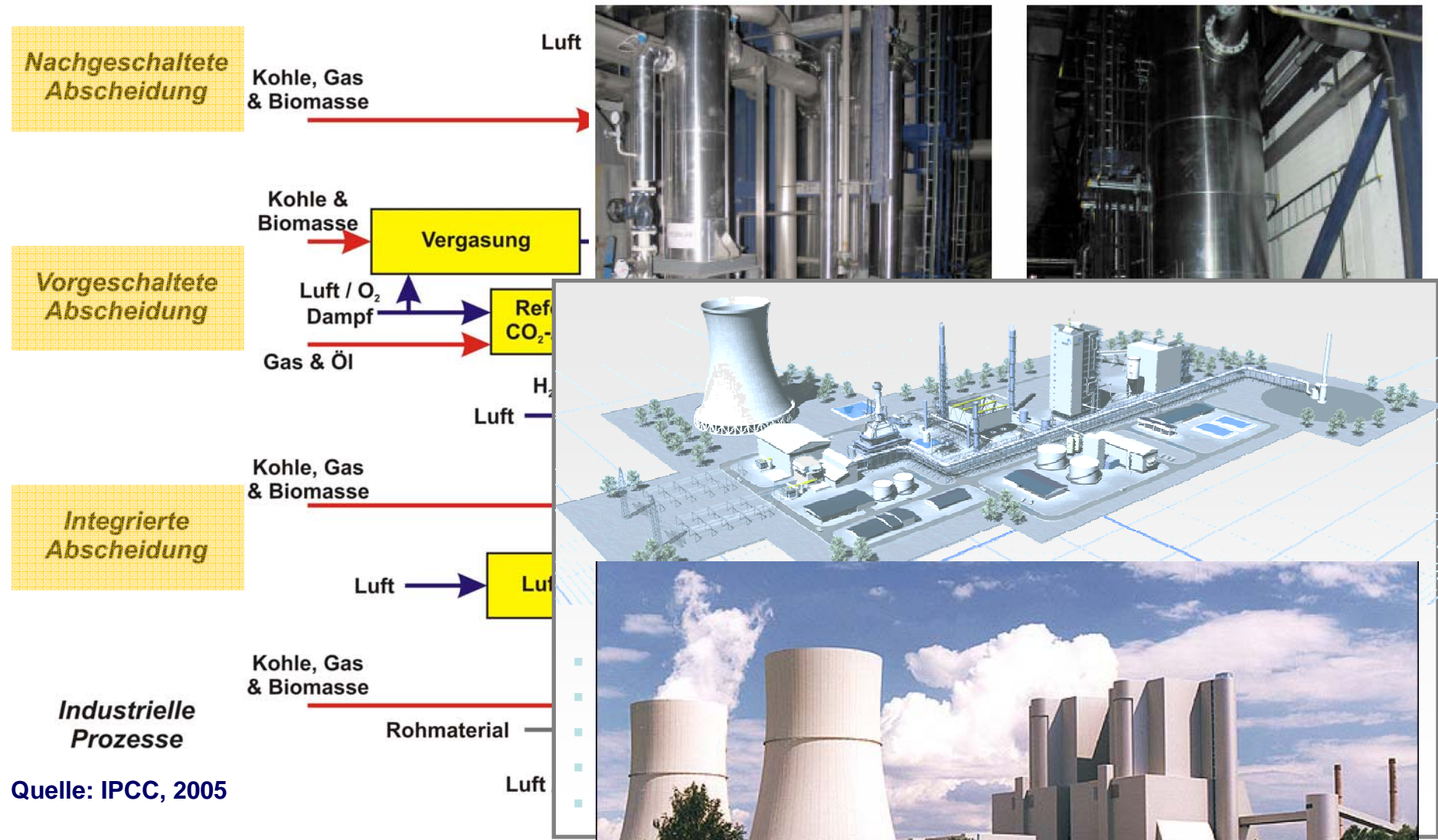
Thermodynamik, Ruhr-Universität Bochum

\*) [Frank.Sander@thermo.rub.de](mailto:Frank.Sander@thermo.rub.de)



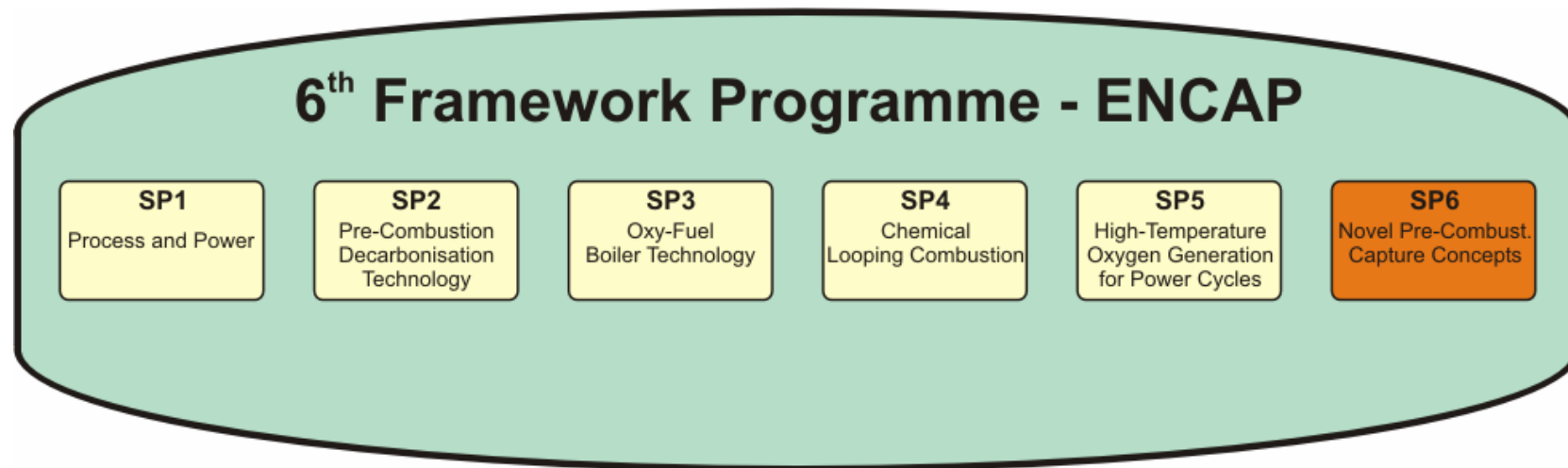
- CO<sub>2</sub>-Abscheidung bei Kohle befeuerten Kraftwerksprozessen
- Daten des Projektes ENCAP
- Varianten des Braunkohle befeuerten Dampfkraftprozesses
- Modellierung der sauerstoffpermeablen Membran
- Parameterstudien am OTM Reaktor
- Parameterstudien für den Gesamtprozesses
- Auswirkungen auf den Gesamtprozesses
- Zusammenfassung und Ausblick

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



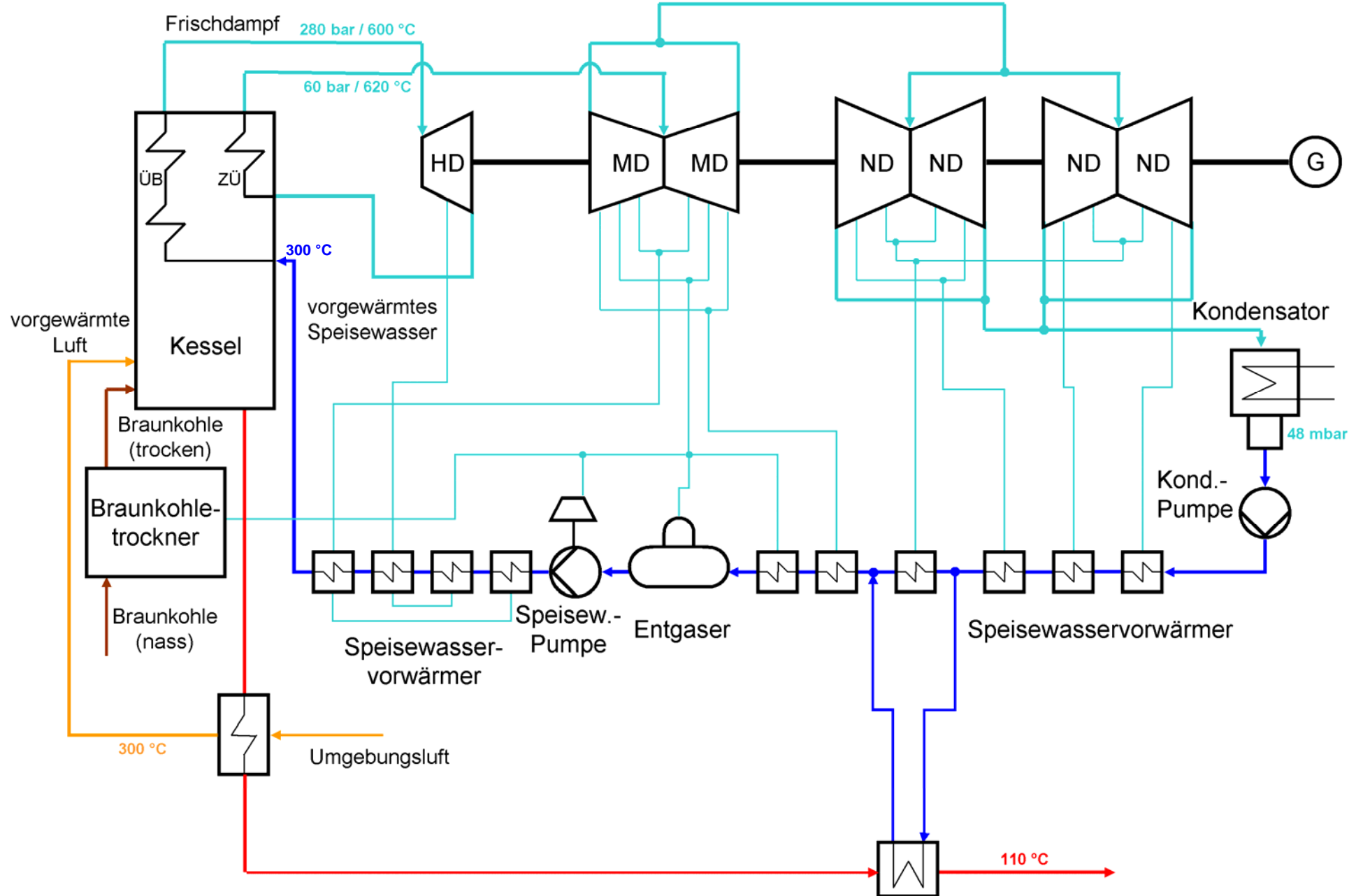
CO<sub>2</sub>-Abscheidung ⇒ Reduzierung des Wirkungsgrades 7-10 %-Punkte

Vattenfall, Deutschland

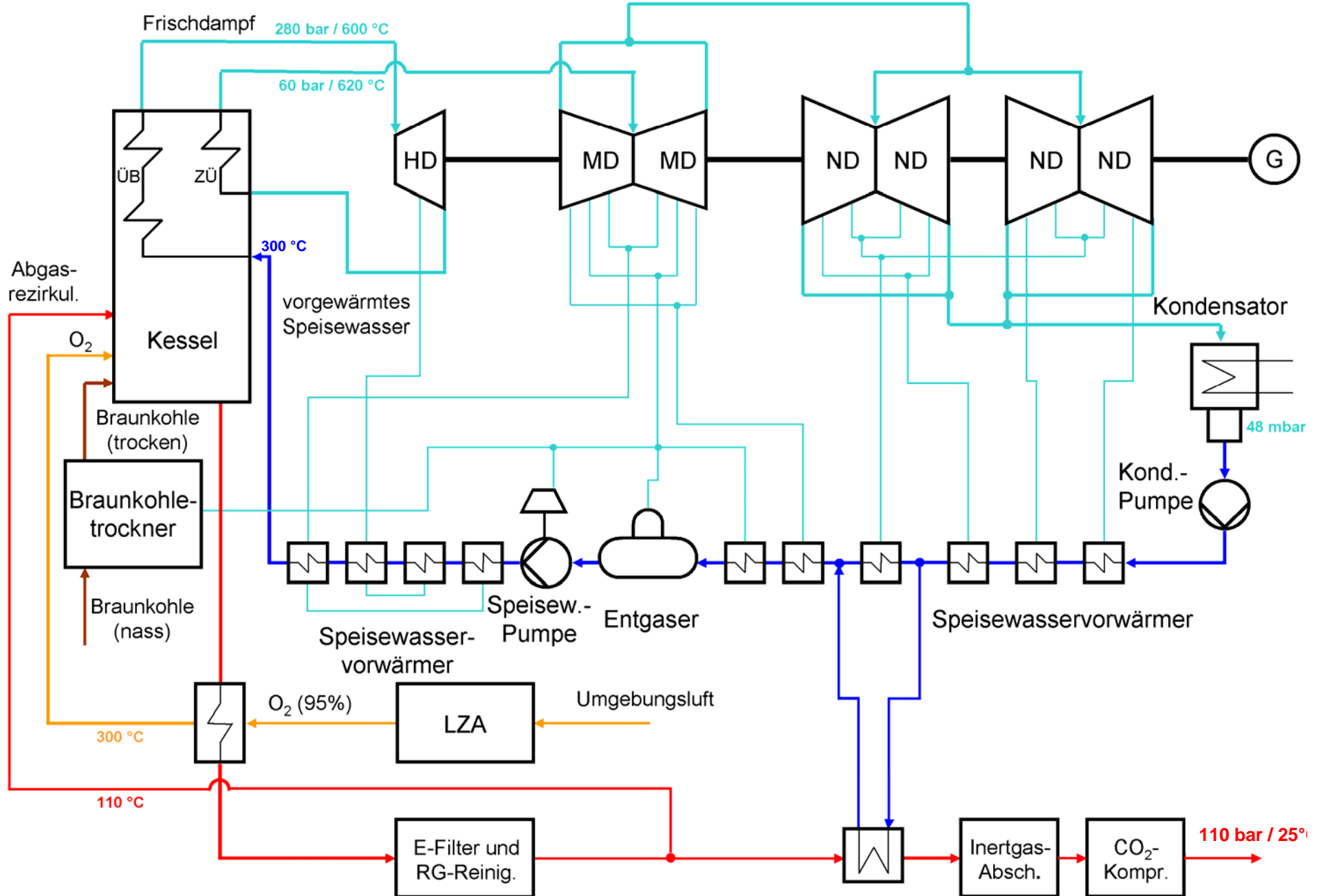


- Entwicklung von Prozessen mit vorgeschalteter und integrierter CO<sub>2</sub>-Abscheidung
- Integriertes Projekt mit 33 Partnern (22 Mio. €; 5 Jahre)
- Ziel: 90% CO<sub>2</sub>-Abscheidungsrate; Kosten < 20 €/t CO<sub>2</sub>

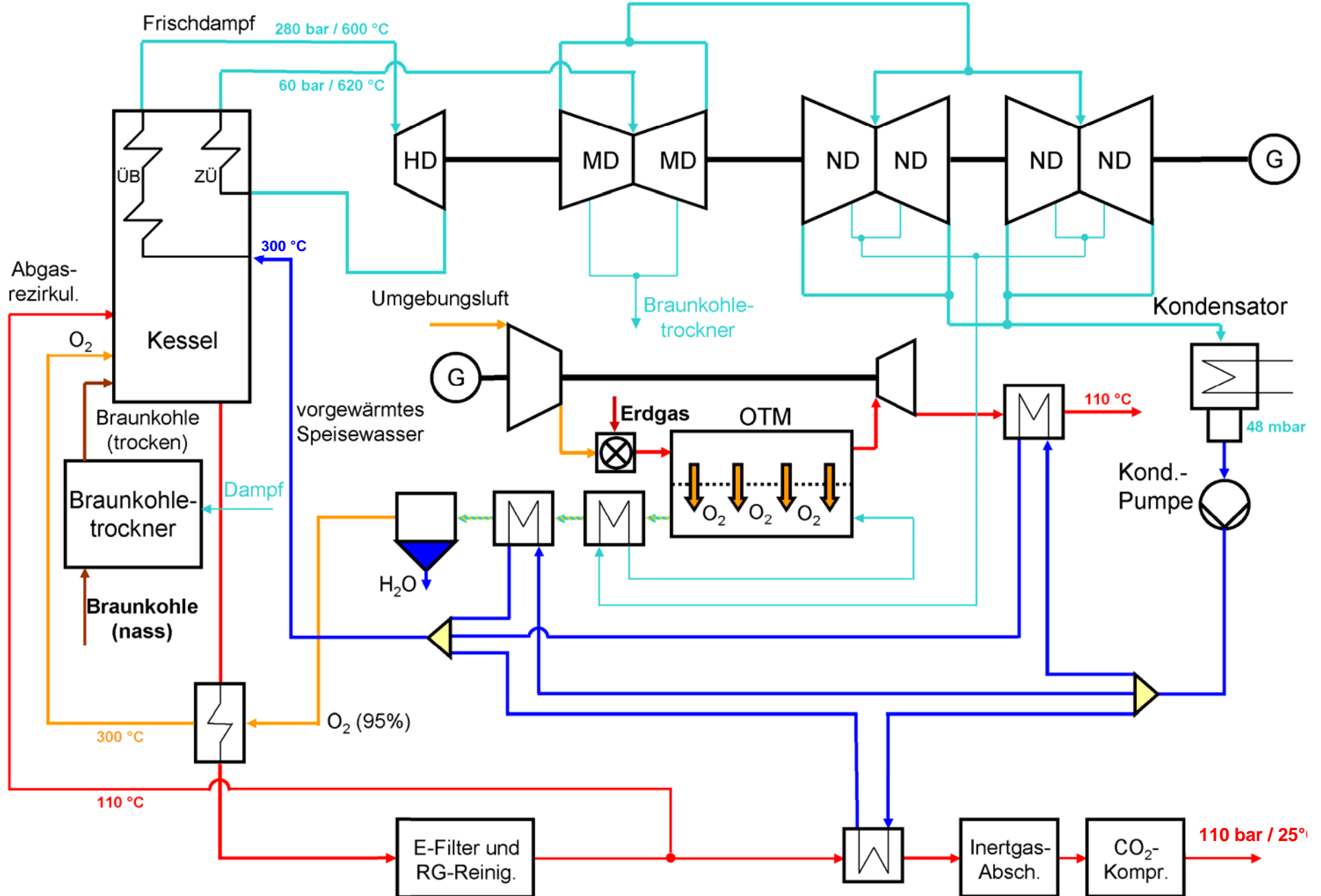
# Dampfkraftprozess – Referenzprozess



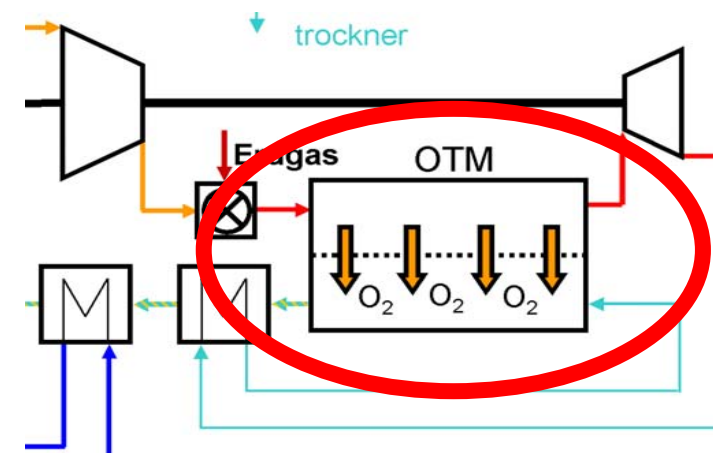
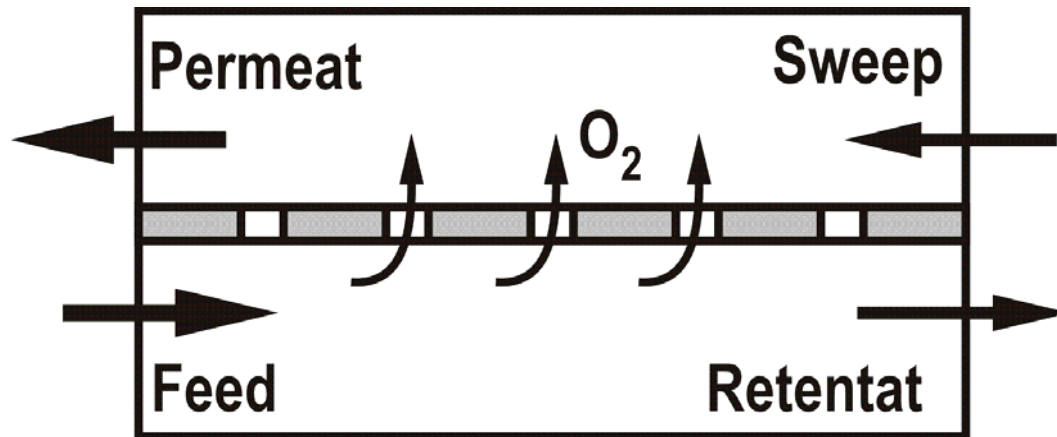
# Dampfkraftprozess – Oxyfuel mit LZA



# Dampfkraftprozess – Oxyfuel mit OTM



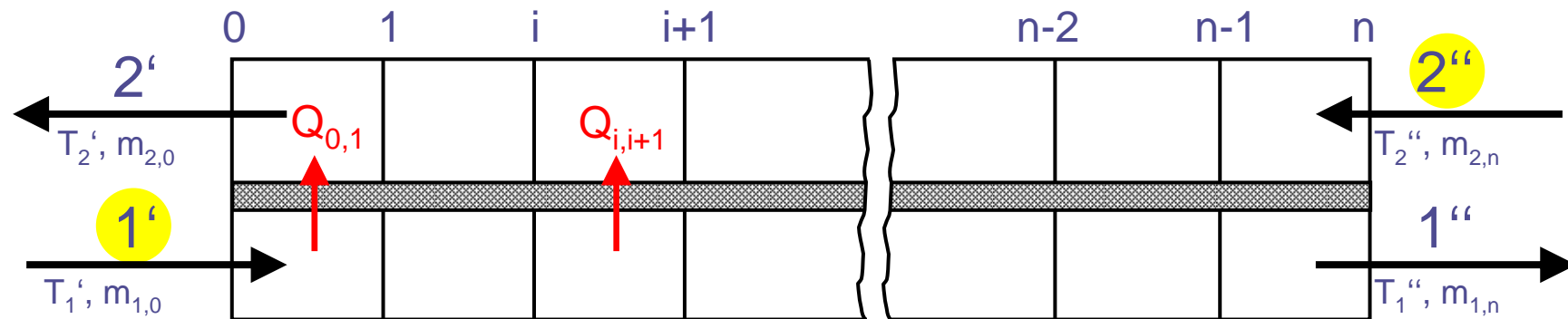
# Modell des OTM Reaktors



- Dampf wird als Spülgas benutzt (Sweep Strom) (MD/ND-Dampfturbine)
- Gegenstromapparat (Wärme- und Stoffübertragung)
- Modell mit finiten Differenzen
- Vereinfachtes Modell der Strömungsbedingungen
- Feed Strom konstant (Zusammensetzung; Massenstrom; Druck)
- Variation der Membranoberfläche  $\Rightarrow$  konstanter Sauerstoffmassenstrom



# Wärme-/ Stoffübertragung im Reaktor



- Berechnung der Wärmeübertragung für Gegenstrom

⇒ Temperaturverteilung

- Modellierung des Stoffübergangs üblicherweise mit der „Wagner Gleichung“

- Iterative Berechnung

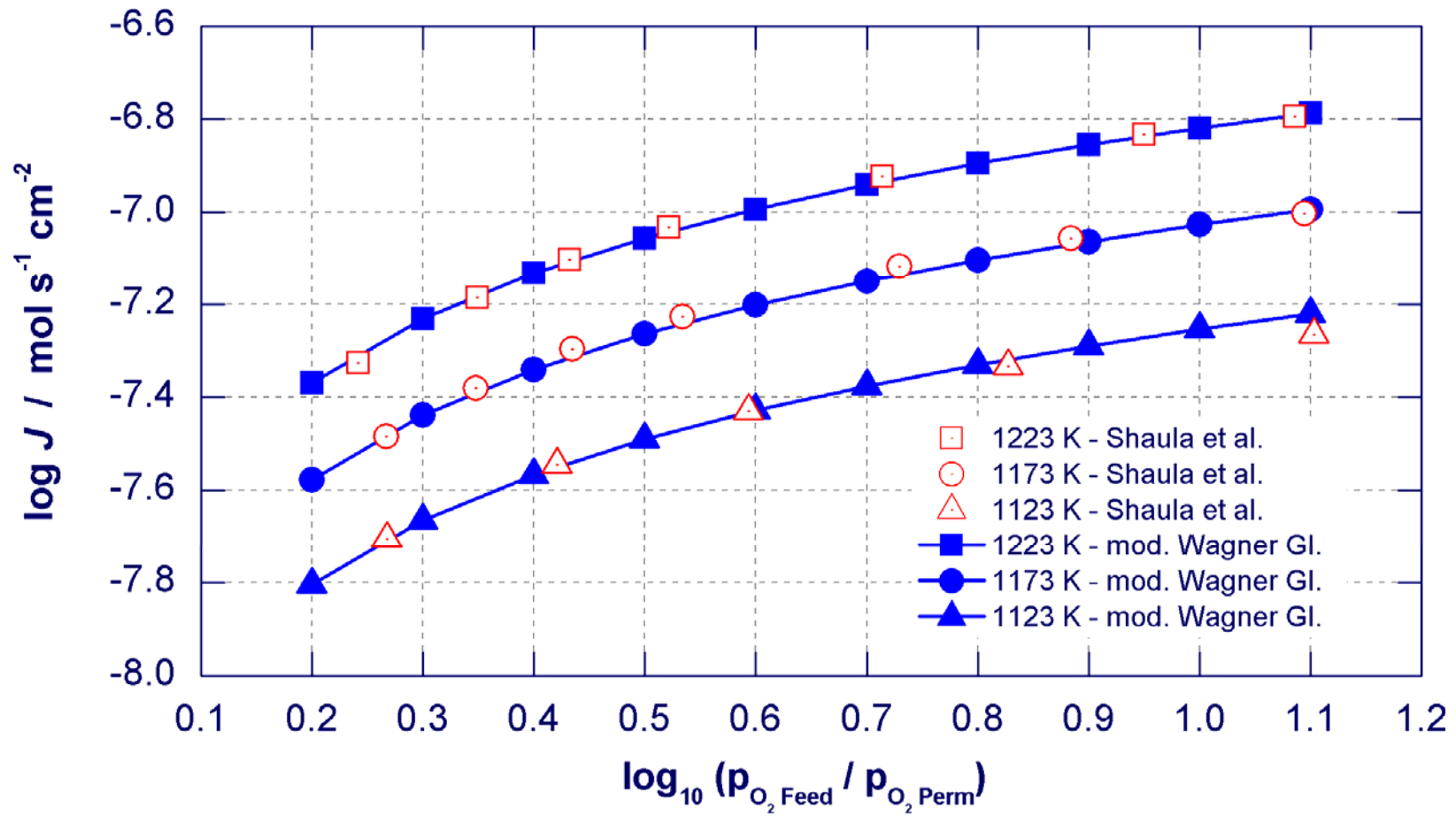
$$j = \frac{D}{l_M + c} \cdot e^{-\frac{E_A}{R_0 T}} \left[ \log_{10} \left( \frac{p_{O_2 \text{ Feed}}}{p_{O_2 \text{ Perm.}}} \right) \right]^b$$

$$D_0 = 0.1502 \text{ mol s}^{-1} \text{ m}^{-1} \quad b = 0.7873$$

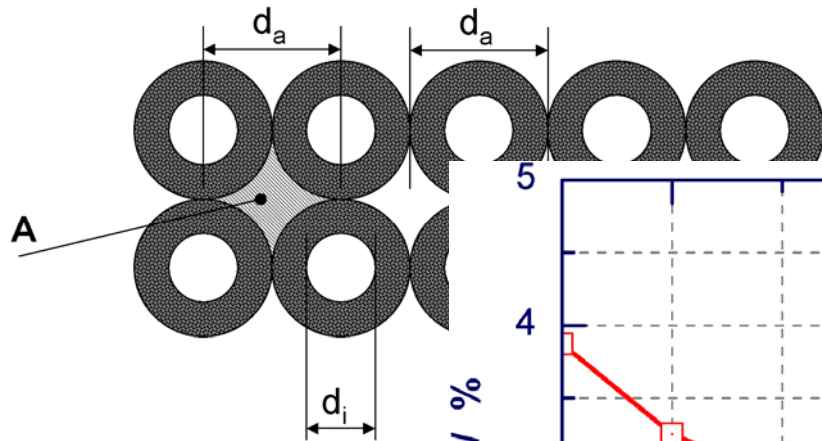
$$l_M = 1.0 \text{ mm} \quad c = 0.2987$$

$$E_A = 114.32 \text{ kJ mol}^{-1}$$

# Berechnung der Stoffübertragung



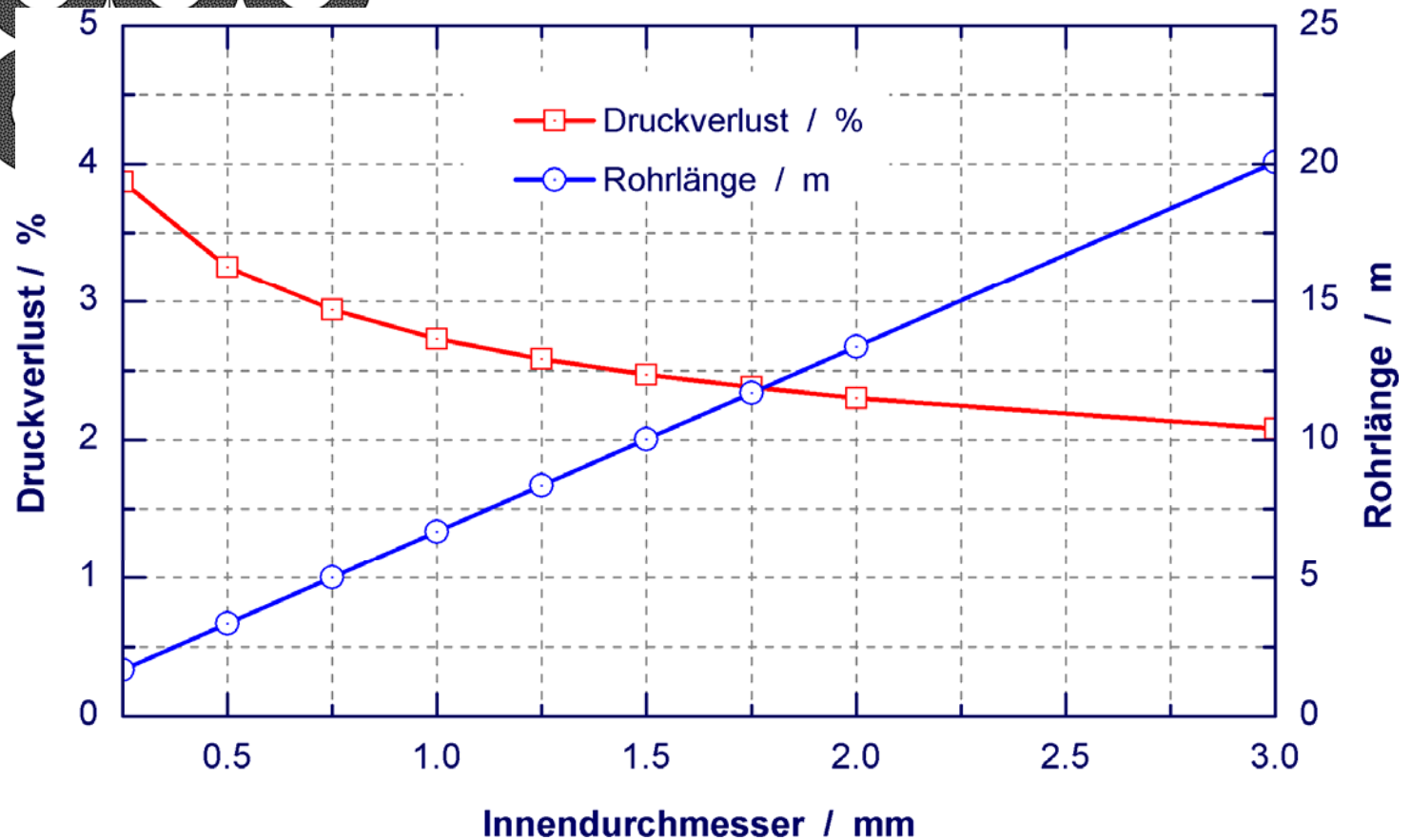
# OTM Reaktor – Druckverlust



$$Re_i = \frac{w_i \rho d_i}{\eta}$$

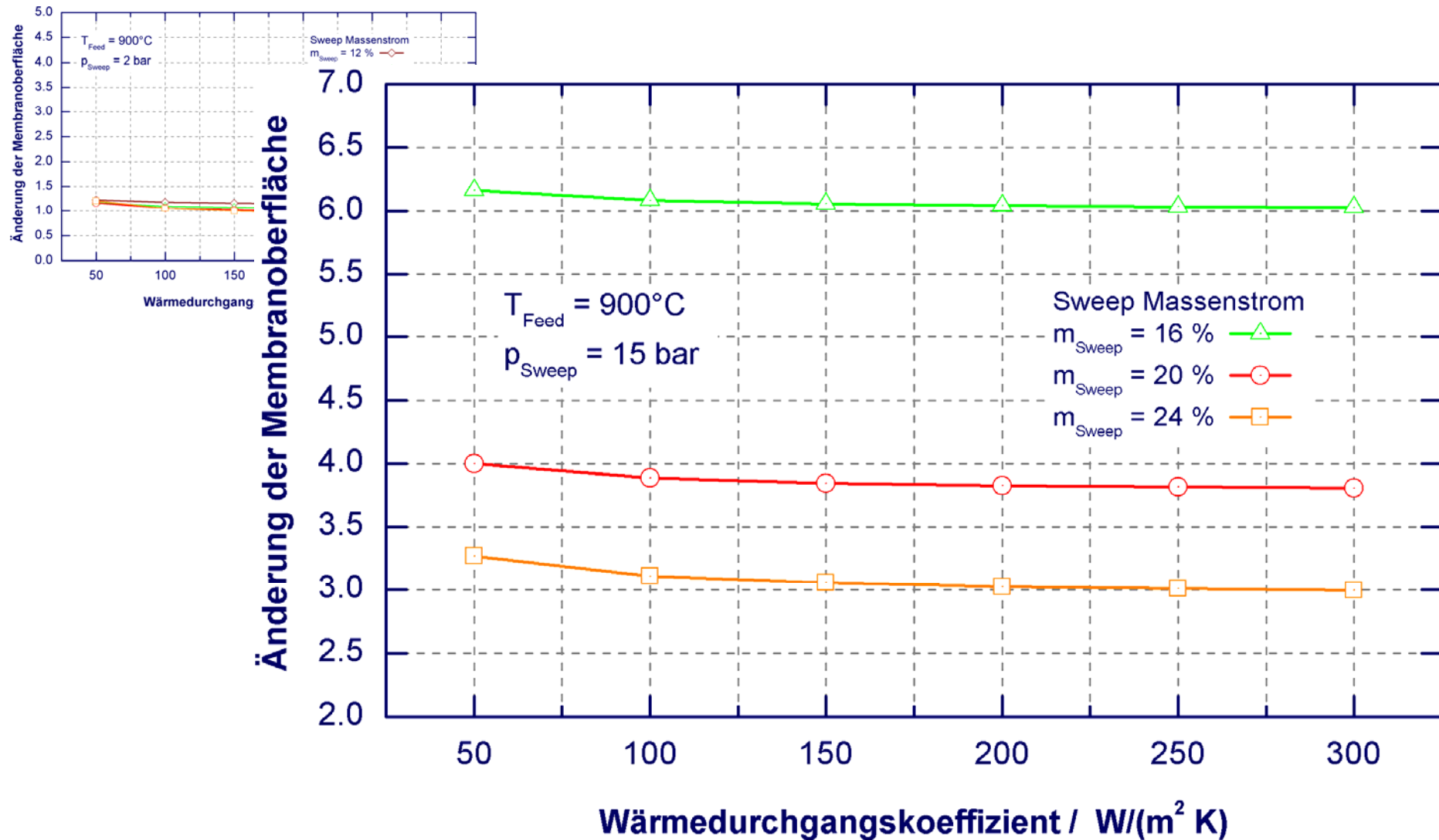
$$\xi = \frac{0,3165}{\sqrt[4]{Re_i}}$$

$$\Delta p = \xi \frac{l \rho w_i^2}{2d_i}$$



- Für konstante Strömungsgeschwindigkeit
  - ⇒ Zusammenhang zwischen Rohrlänge und Innendurchmesser

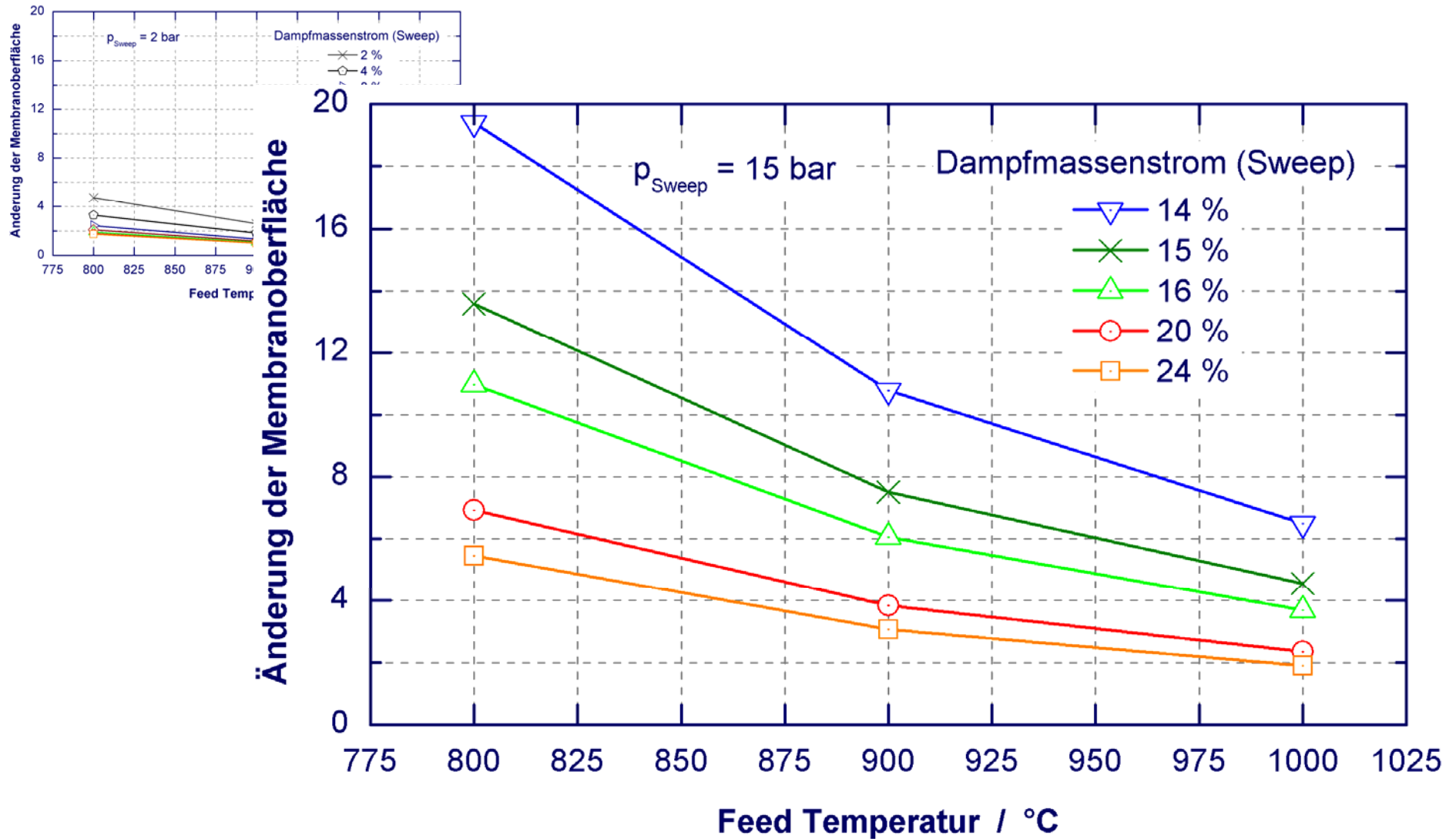
# Wärmedurchgangskoeffizient



- Geringe Änderung der Membranoberfläche (für alle Sweep-Drücke)

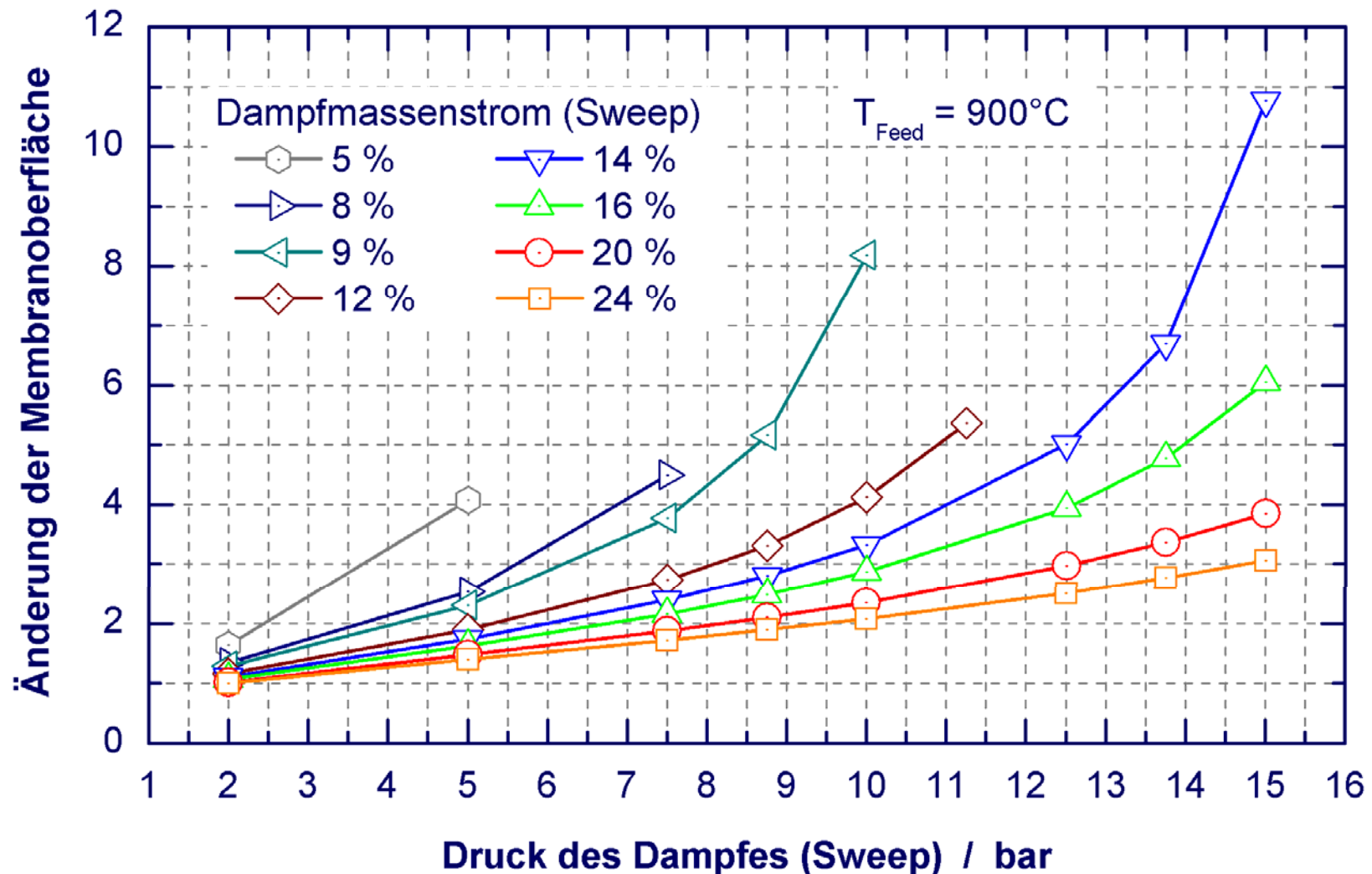


# Temperatur des Feedstroms



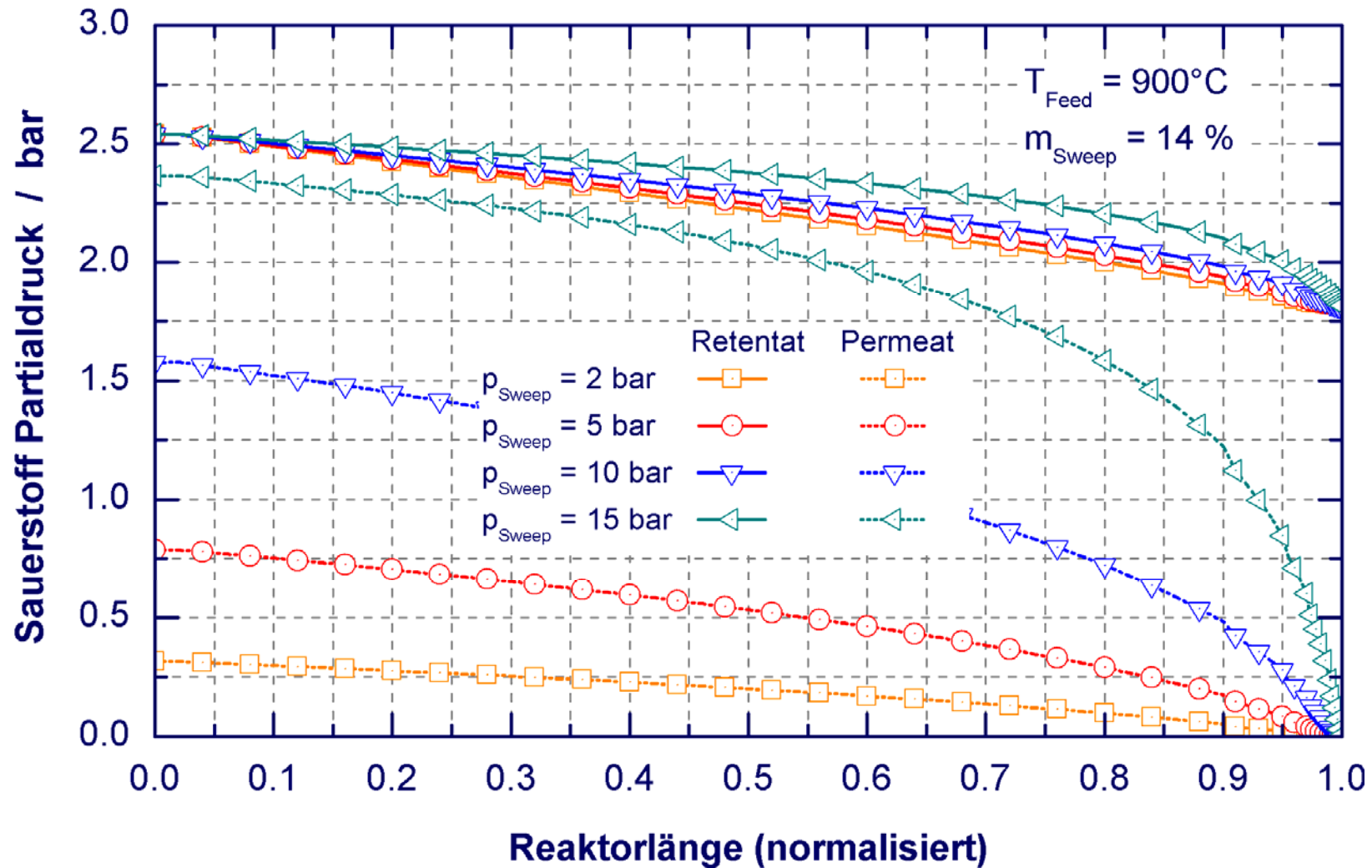
- Bei hohem Sweep-Druck steigt der Einfluss der Feed Temperatur

# Variation – Druck und Massenstrom



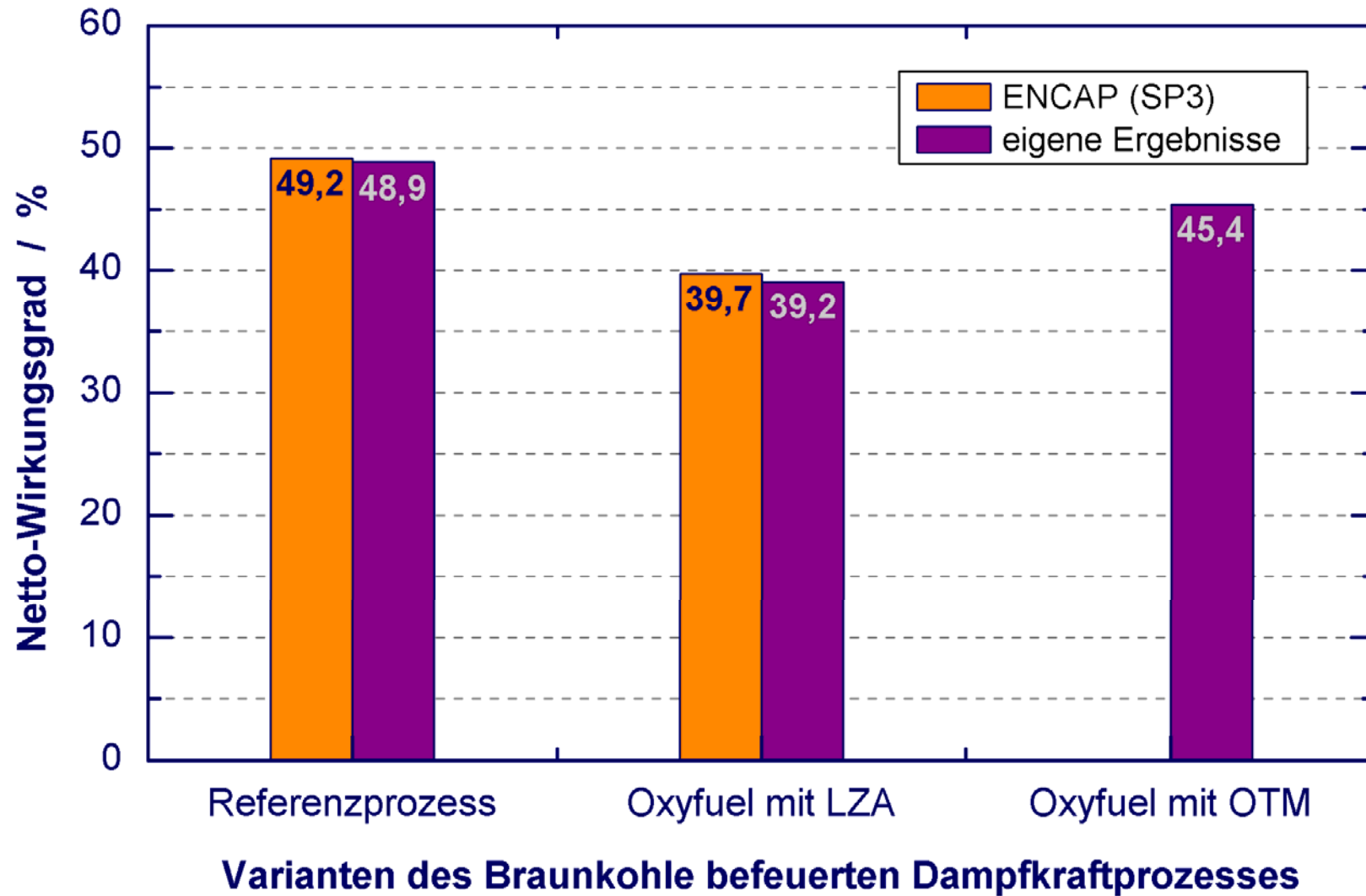
- Kleine Dampfmassenströme erfordern niedrige Sweep-Drücke (**große**  $\Delta p_{\text{Ges.}}$ )
- Dampfmassenstrom bestimmt maximalen Sweep-Druck (**kleine**  $\Delta p_{\text{Ges.}}$ )
- Effekt verstärkt sich bei niedrigerer Feed Temperatur

# Verlauf der O<sub>2</sub>-Partialdrücke



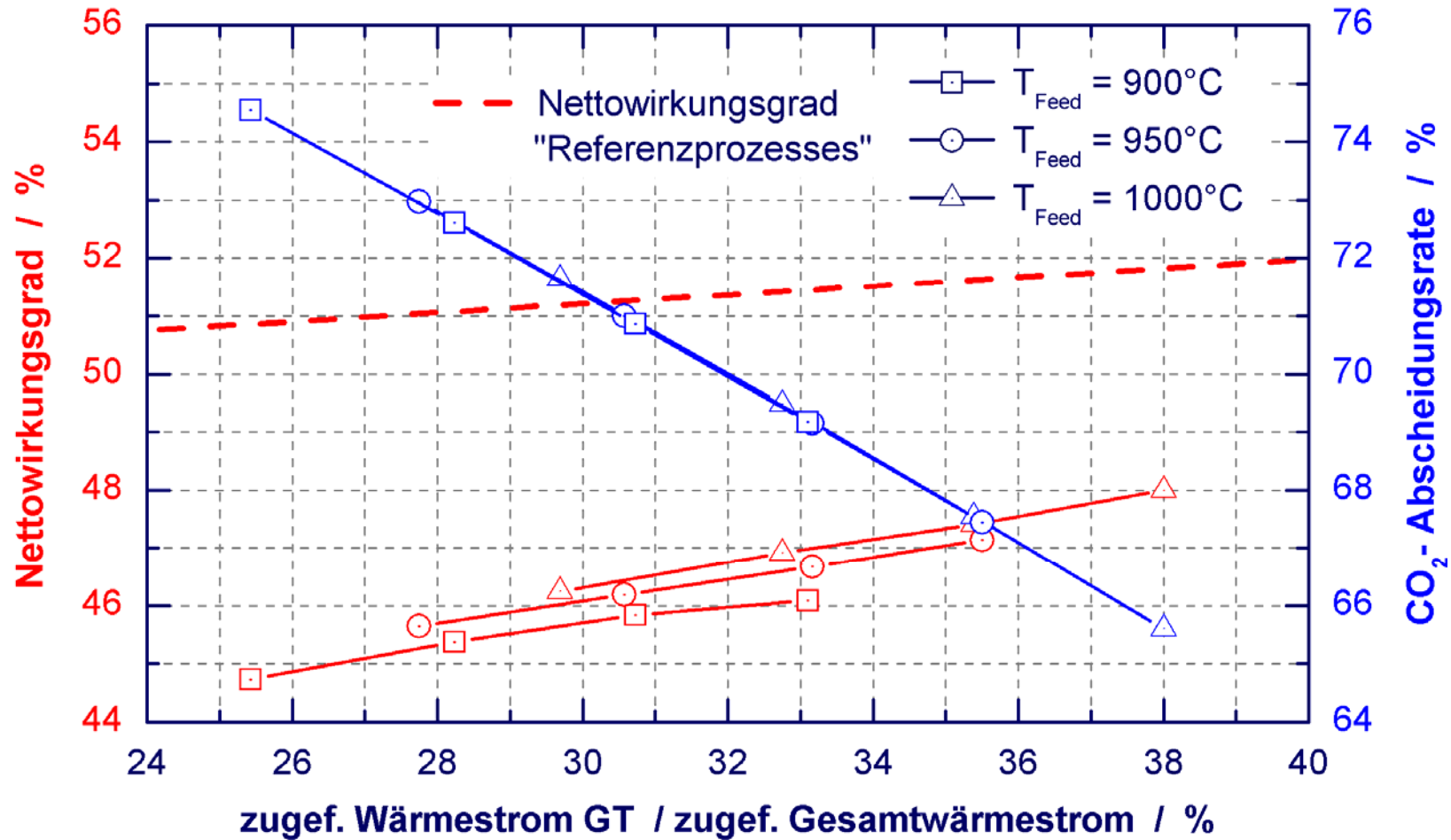
- Sweep-Druck hat den größten Einfluss auf die Membranoberfläche

# Vergleich der Prozessvarianten



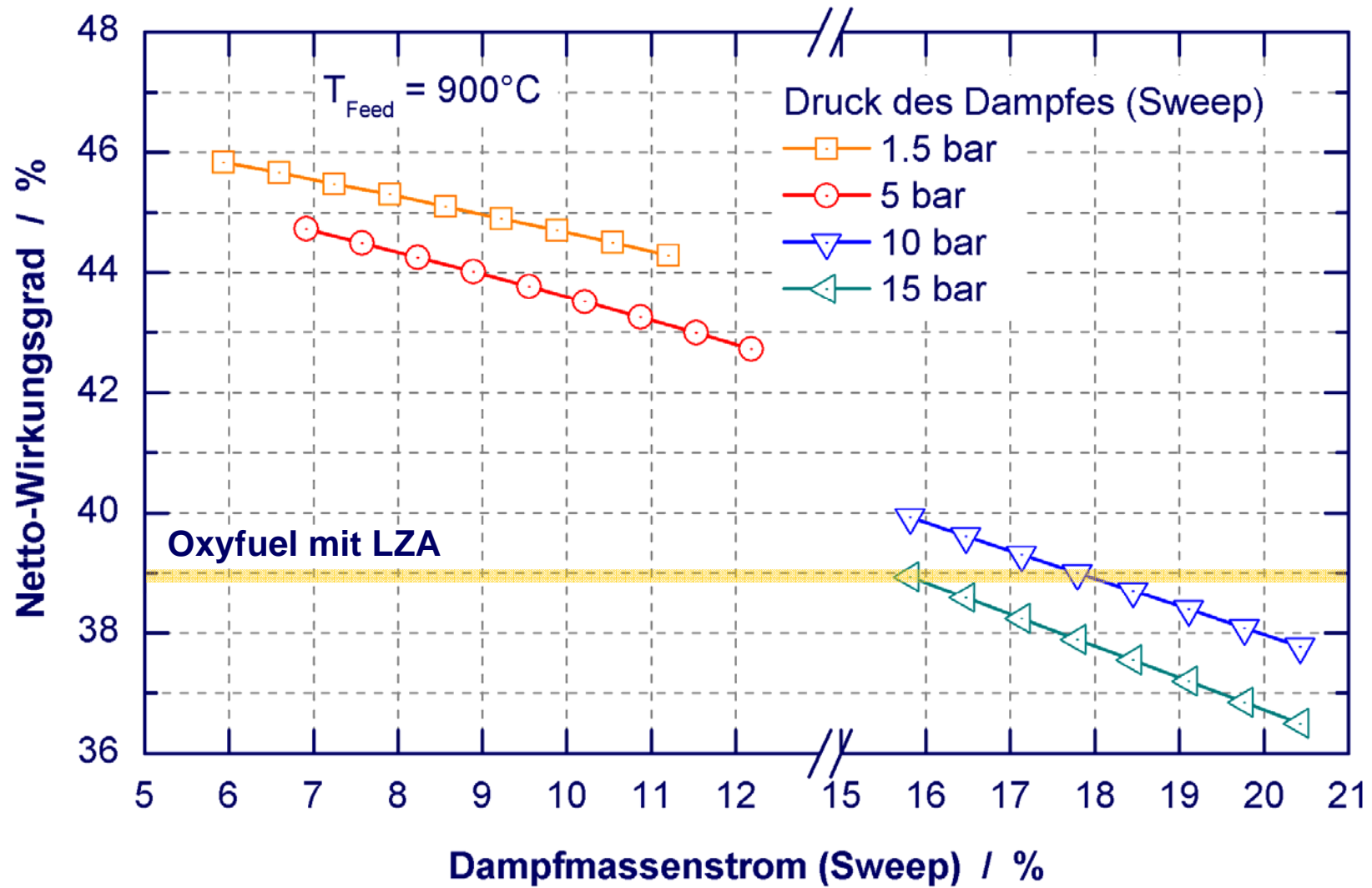


# Einfluss des Kombiprozesses



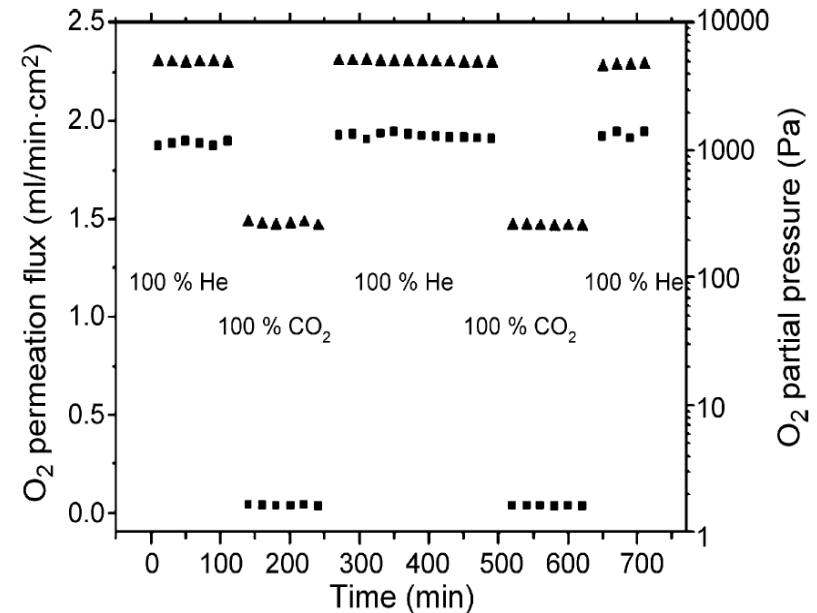
- Reduzierung des Wirkungsgrades sinkt geringfügig (Zunahme Kombiprozesses)
  - ⇒ gleichzeitige Reduzierung der Abscheidungsrate (74-66 %)

# Einfluss des Sweep Stroms



# Einfluss realer Betriebsbedingungen

- Substitution des Spülgases
  - Neue Materialien nötig
- Verunreinigungen des Feed- und des Sweep-Stroms
- Erkenntnisse für wenige Materialien
  - BSCF: Arnold, 2007 (J. Membr. Sc., 293)  
Vente, 2006 (J. Solid St. Elect., 10)  
Shao, 2000 (J. Membr. Sc., 172 )
  - SCF: Yi, 2005 (Chem. Mater., 17)
- Neue Materialien werden diskutiert
  - Ba, Sr-freie Materialien (keine Carbonatbildung)  
Caro, 2006 (Chem. Ing. Tech, 78)  
→ höhere Investitionskosten



Source: Arnold et al., J. Membr. Sc (172), 2007

# Zusammenfassung / Ausblick

- **Eigenschaften des OTM Reaktors**

- ⇒ Sweep-Strom: Massenstrom und Druck beeinflussen sich gegenseitig
  - Kleine Dampfmassenströme erfordern niedrige Drücke (große  $\Delta p_{\text{Ges.}}$ )
  - Kleine Druckdifferenzen erfordern großen Dampfmassenstrom

- **Dampfkraftprozess mit sauerstoffpermeablen Membran**

- ⇒ vielversprechende Ergebnisse nur für extreme Bedingungen des OTM Reaktors möglich
- ⇒ geringe Wirkungsgradreduzierung erreichbar

- **Einfluss realer Betriebsbedingungen**

- ⇒ Material muss Verunreinigungen ertragen

- **Weitere Gesichtspunkte**

- ⇒ Reaktoren in großtechnischem Maßstab erforderlich
- ⇒ Abschätzungen von Investitionskosten (noch) nicht vorhanden





**Der Europäischen Kommission:**  
Für die finanzielle Unterstützung im  
Rahmen des Forschungsprojektes **ENCAP**  
(Vertrags-Nr.: SES6-CT-2004-502666)

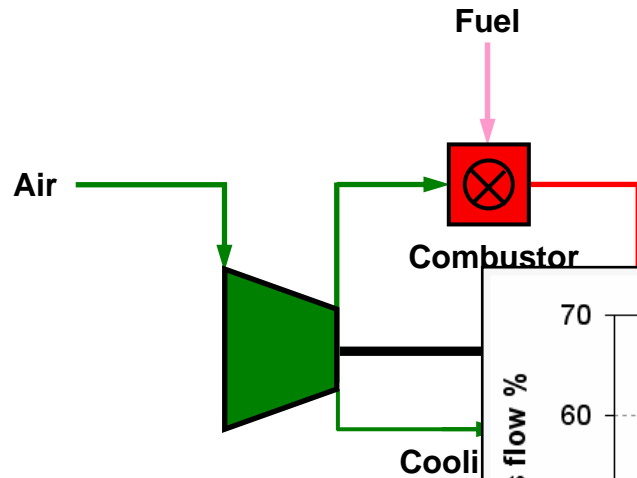
**Ihnen:**

⇒ Für Ihre Aufmerksamkeit!

Frank Sander  
Frank.Sander@Ruhr-Uni-Bochum.de  
[www.rub.de/thermo](http://www.rub.de/thermo)

# Cooling Model of the Gas Turbine

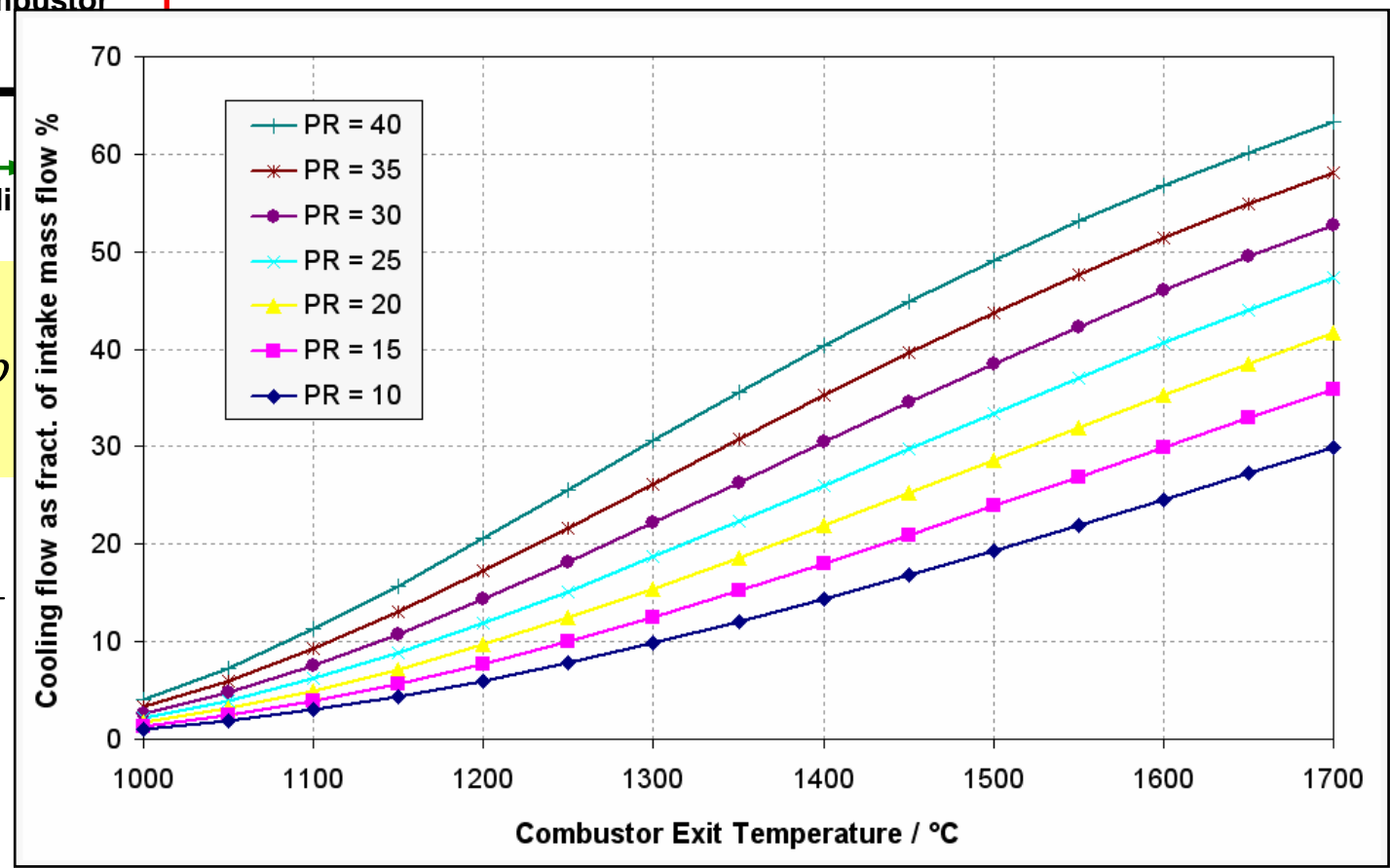
- Developed at NTNU (O. Bolland) in co-operation with Alstom und Siemens



$$\frac{\dot{m}_{Cooling} \cdot c_{p,Cooling}}{\dot{m}_{Hot\ gas} \cdot c_{p,Hot\ gas}} = b$$

$$c_{p,Cooling} = \frac{h_{Blade} - h_{Cooling}}{T_{Blade} - T_{Cooling}}$$

$$c_{p,Hot\ gas} = \frac{h_{Hot\ gas} - h_{Blade}}{T_{Hot\ gas} - T_{Blade}}$$



see Jonsson, M. et al., ECOS 2005

# Comparison of Feed Temperatures

