

Vortragsveranstaltung Nutzung von Verlustenergien, speziell Abgasenergie

Thema

„Nutzung der Abgasenergie durch thermochemische Rekuperation zur Wirkungsgradsteigerung von erdgasbetriebenen Blockheizkraftwerken“

Termin/Ort

10.09.2013, 17:00 – 19:00 Uhr
WTZ gGmbH, Roßlau

ZBT GmbH
Carl-Benz-Straße 201
47057 Duisburg
Germany

Telefon: +49-203-7598-0
Telefax: +49-203-7598 2222
www.zbt-duisburg.de

Dipl.-Ing. Carsten Spieker

Telefon: +49-203-7598-2747
Telefax: +49-203-7598 2222
Email: C.Spieker@zbt-duisburg.de



Vorstellung des ZBT

•Das ZBT:

- Unabhängiges, anwendungsorientiertes Forschungs- und Entwicklungsinstitut
- Arbeitsbereiche sind Brennstoffzellen, Wasserstofftechnik und Batterie-Technologie
- Dienstleister für die Industrie bei der Realisierung neuer Energietechnologien
- öffentlich geförderte Projekte
- 100 Festangestellte + ca. 40 Studenten

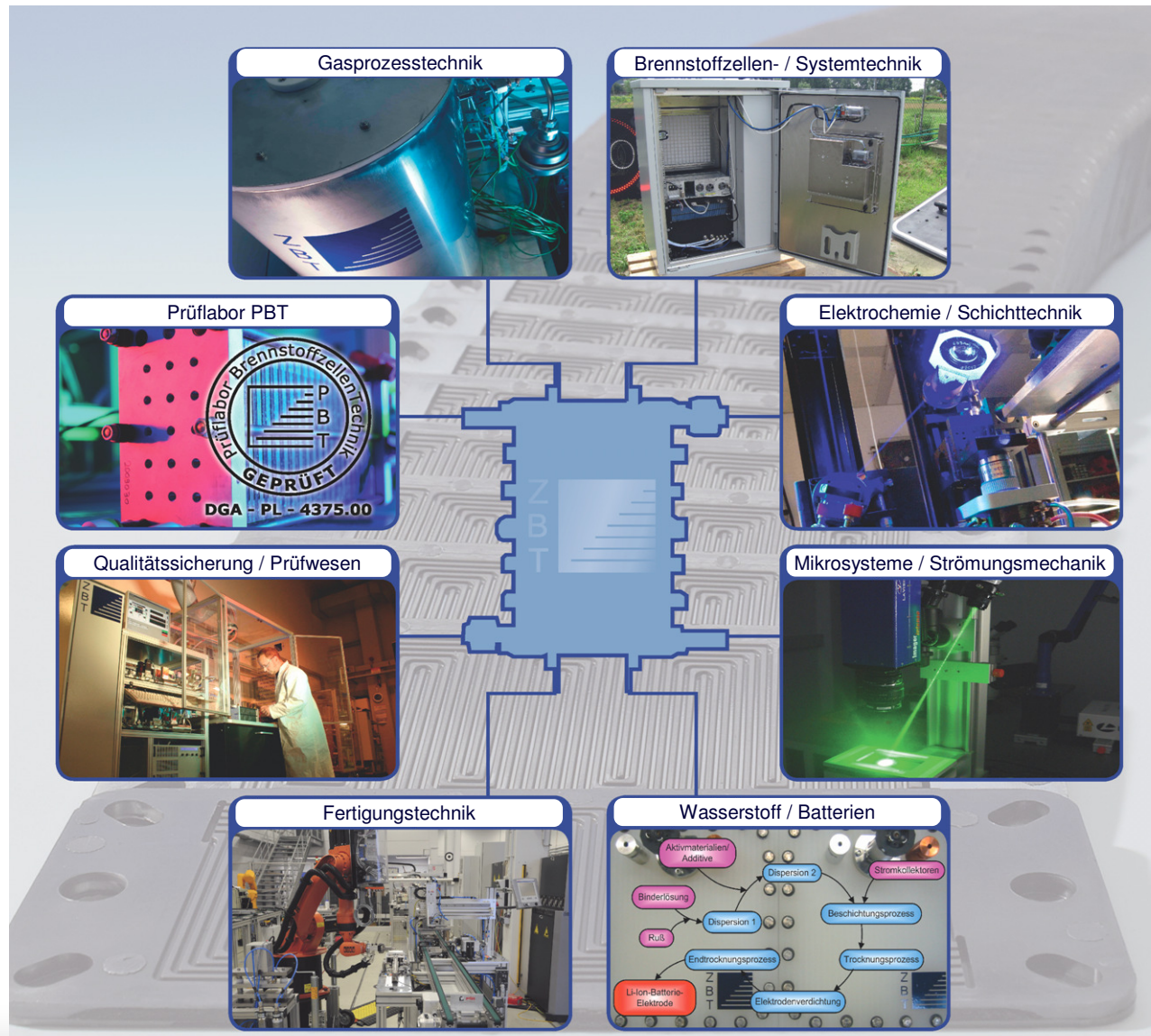
•Infrastruktur:

- 1200 m² Laborfläche
- 4 Geheimplabore mit 220 m²
- Flexible und vollautomatisierte Teststände mit moderner Mess- und Analysetechnik
- 3 Klimakammern inklusive Vibrationstisch
- Erstes akkreditiertes Prüflabor für Brennstoffzellensysteme
- 120 m² Laborfläche für Spritzguß und Compoundherstellung
- Prototypen-Fertigungslinie



Project supported by the European Funds for
Regional Development and the Region of North
Rhine-Westphalia, Germany





Homepage

<http://www.zbt-duisburg.de/>

Mit detaillierten Informationen zu den Arbeitsbereichen, zur technischen Ausstattung, zum Dienstleistungsportfolio, zu Ansprechpartnern etc.



Nutzung der Abgasenergie durch thermochemische Rekuperation zur Wirkungsgradsteigerung von erdgasbetriebenen Blockheizkraftwerken

Derzeitige Nutzung der Abgasenergie durch:

1. Bereitstellung von Niedertemperaturwärme => z.B. Raumheizung
2. Bereitstellung von Hochtemperaturwärme => z.B. Prozesswärme, Dampferzeugung

In beiden Fällen hat die Nutzung aber keine direkte Rückkopplung auf den Brennstoff bzw. auf den elektrischen Wirkungsgrad

Nutzung der Abgasenergie durch Thermochemische Rekuperation:

Nutzung eines Teils der thermischen Energie des Abgases zur Erhöhung des Energieinhaltes des zugeführten Brennstoffes.

Thermische Energie => Chemische Energie
Chemische Energie wird dem Motor mit dem Brenngas zugeführt !

Wie geht das?



Das Verfahren der Dampfreformierung

Benötigt wird ein Verfahren mit einer endothermen Reaktion, um den Energieinhalt des Brenngases zu erhöhen:

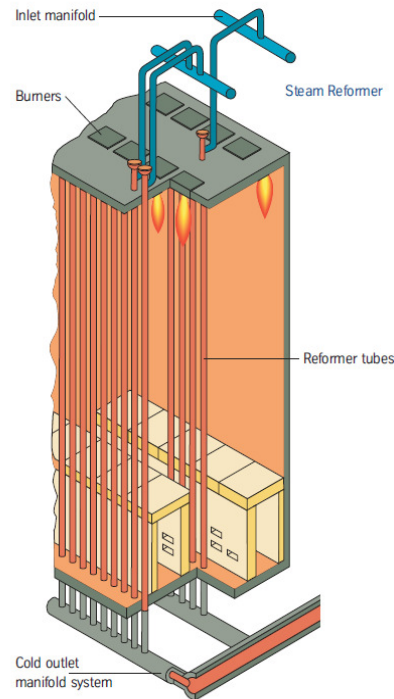
- Verfahren der Dampfreformierung
- Etabliertes Verfahren, anwendbar für jeden gasförmigen/flüssigen Kohlenwasserstoff
- Wird bei der industriellen Wasserstofferzeugung aus Erdgas eingesetzt



ZBT-Reformer-Systeme mit 0,3-3,0 Nm³H₂/h



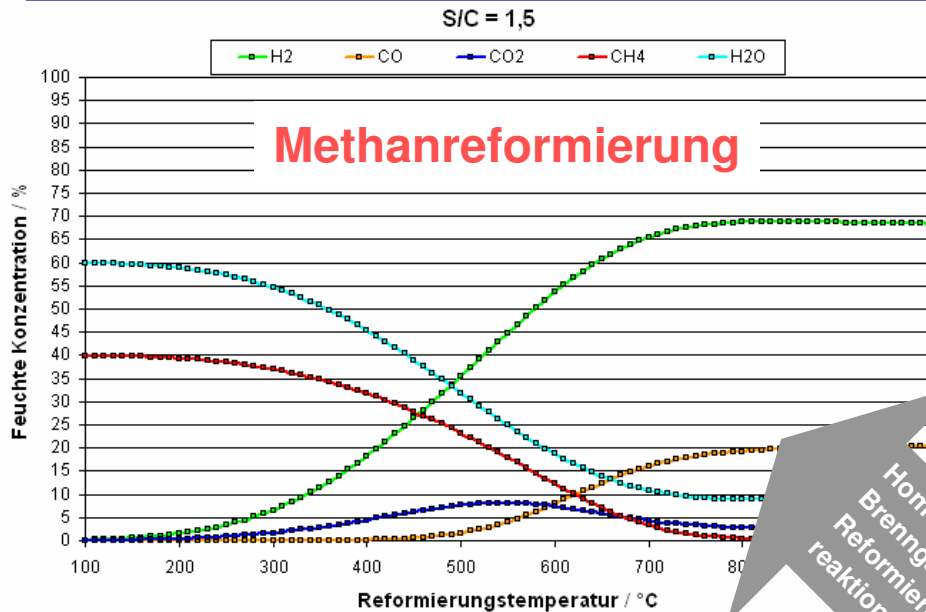
196.000 Nm³H₂/h
(Jose Refinery, Venezuela)



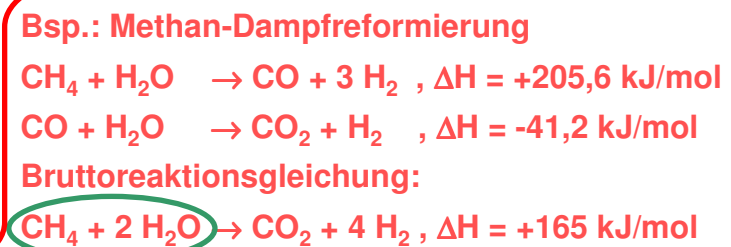
Reformerkonzept der Uhde GmbH

Zur Durchführung werden benötigt:

- Wärmequelle
- Katalysator
- Wasserdampf
- Wärmeübertrager bzw. Reaktor



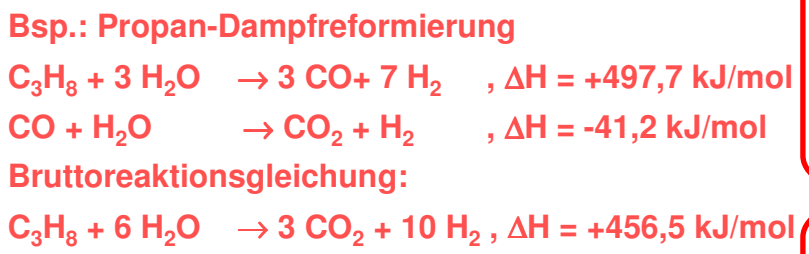
Methanreformierung



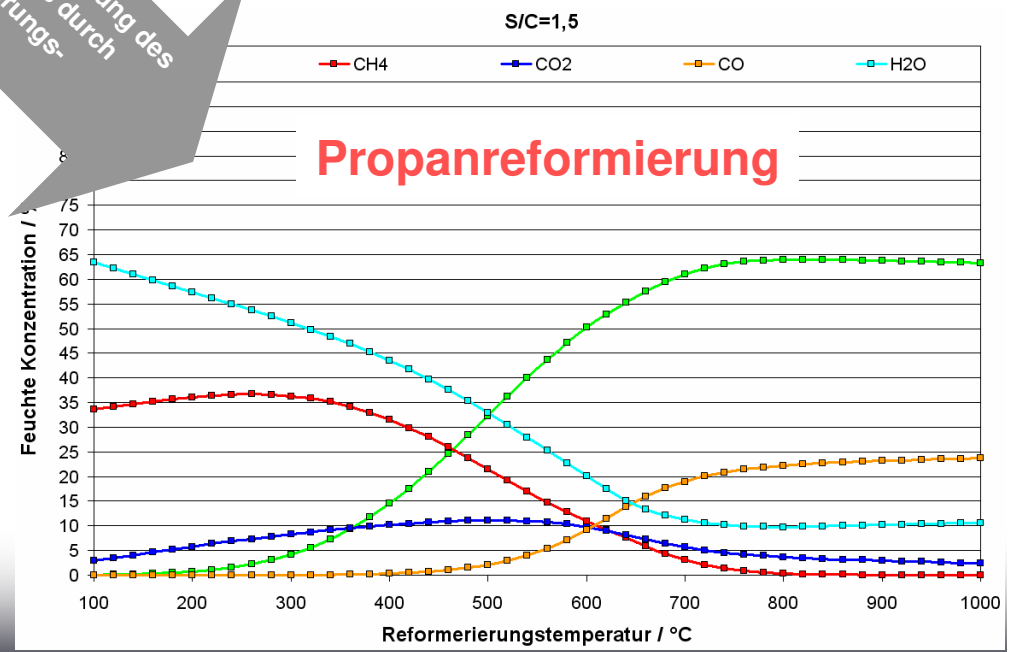
S/C-Verhältnis; Steam to carbon Ratio

$$S/C = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}}{x \cdot \dot{n}_{\text{C}_x\text{H}_y}} \quad S/C = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}}{1 \cdot \dot{n}_{\text{CH}_4}}$$

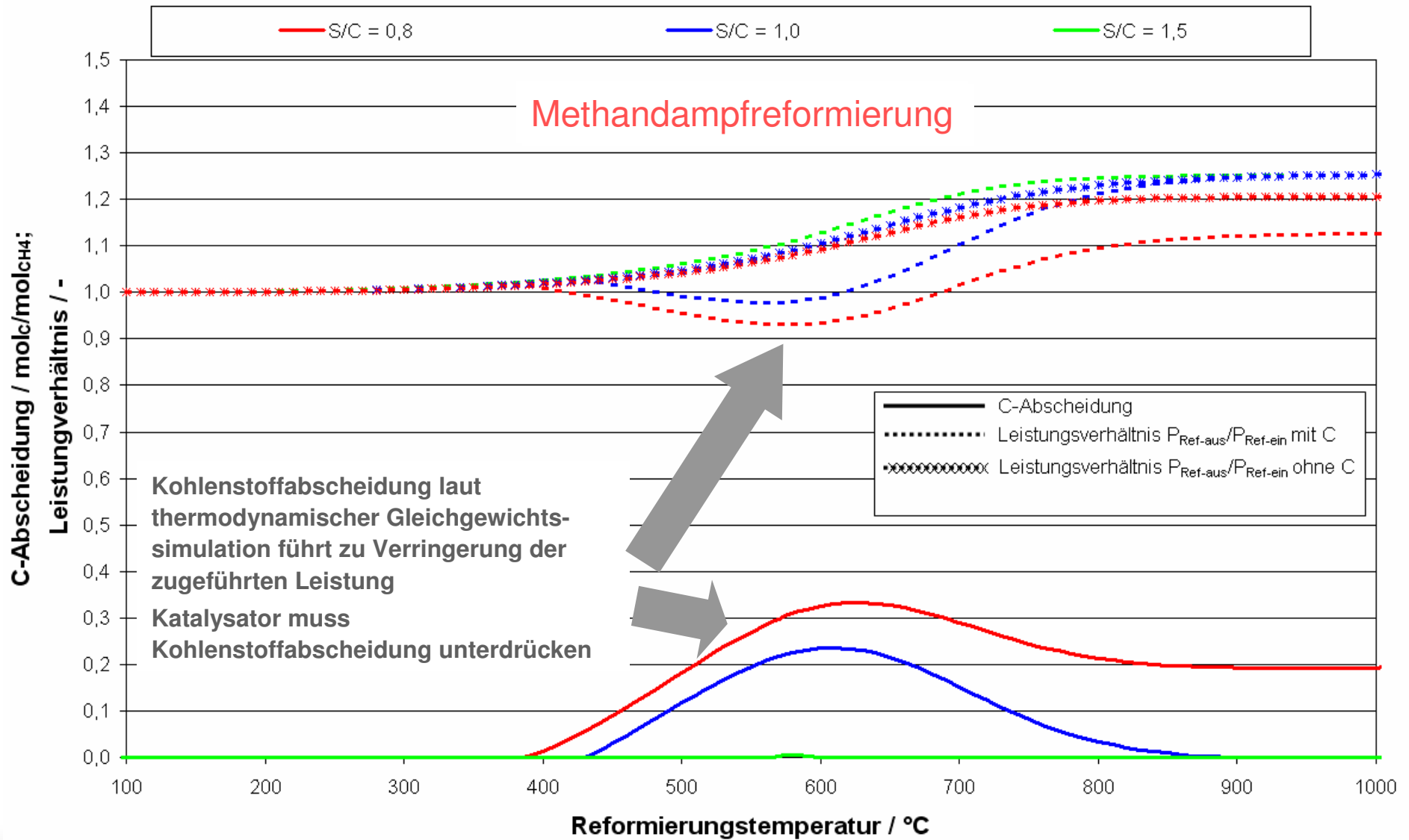
Homogenisierung des Brenngases durch Reformierungsreaktion

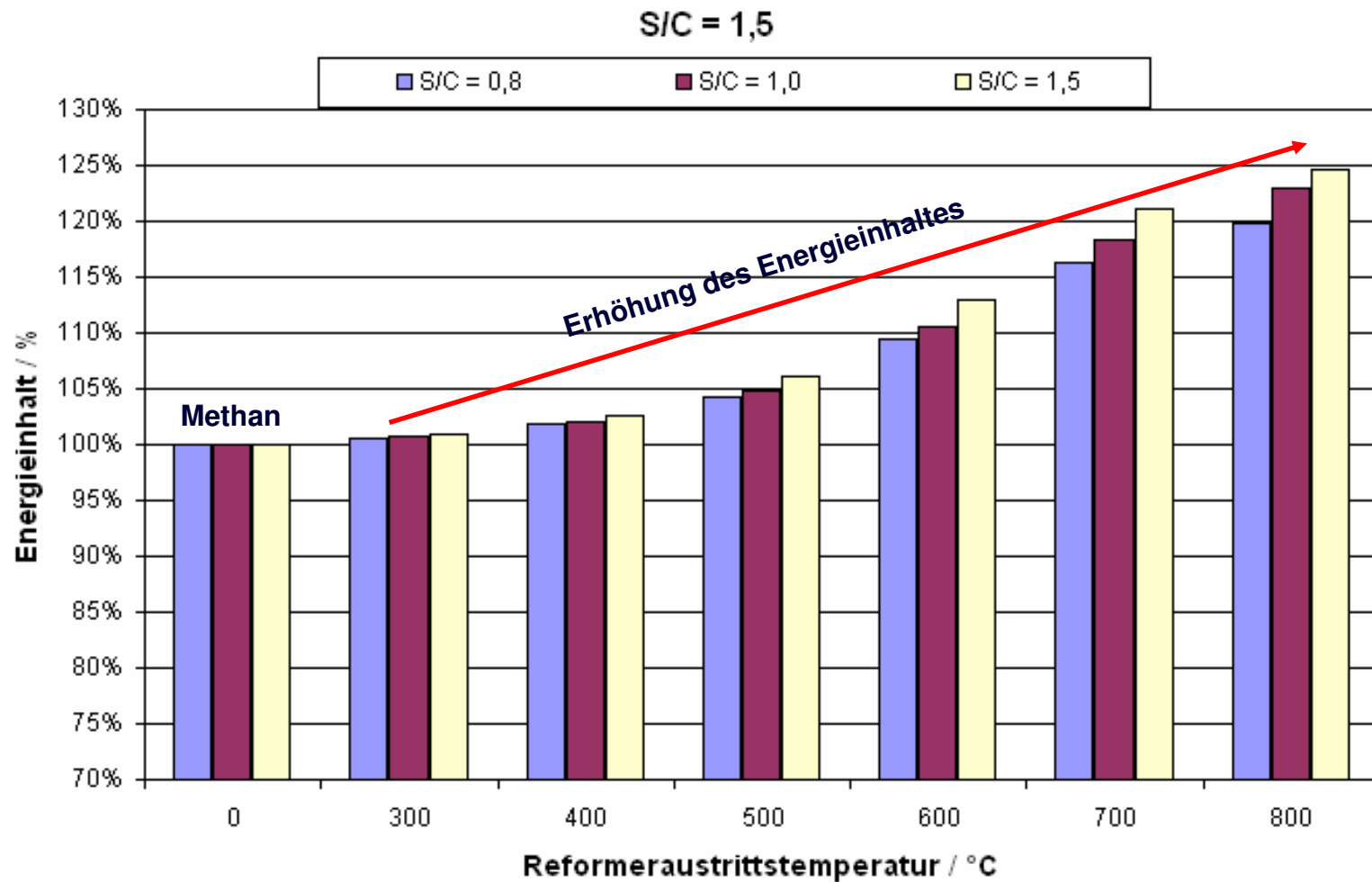


$$S/C = \frac{\dot{n}_{\text{H}_2\text{O}}}{3 \cdot \dot{n}_{\text{C}_3\text{H}_8}}$$



Propanreformierung





Durch die Dampfreformierung kann also der Energieinhalt des Brenngases (hier Methan) in Abhängigkeit der Temperatur und des S/C-Verhältnisses um bis zu 25 % gesteigert werden

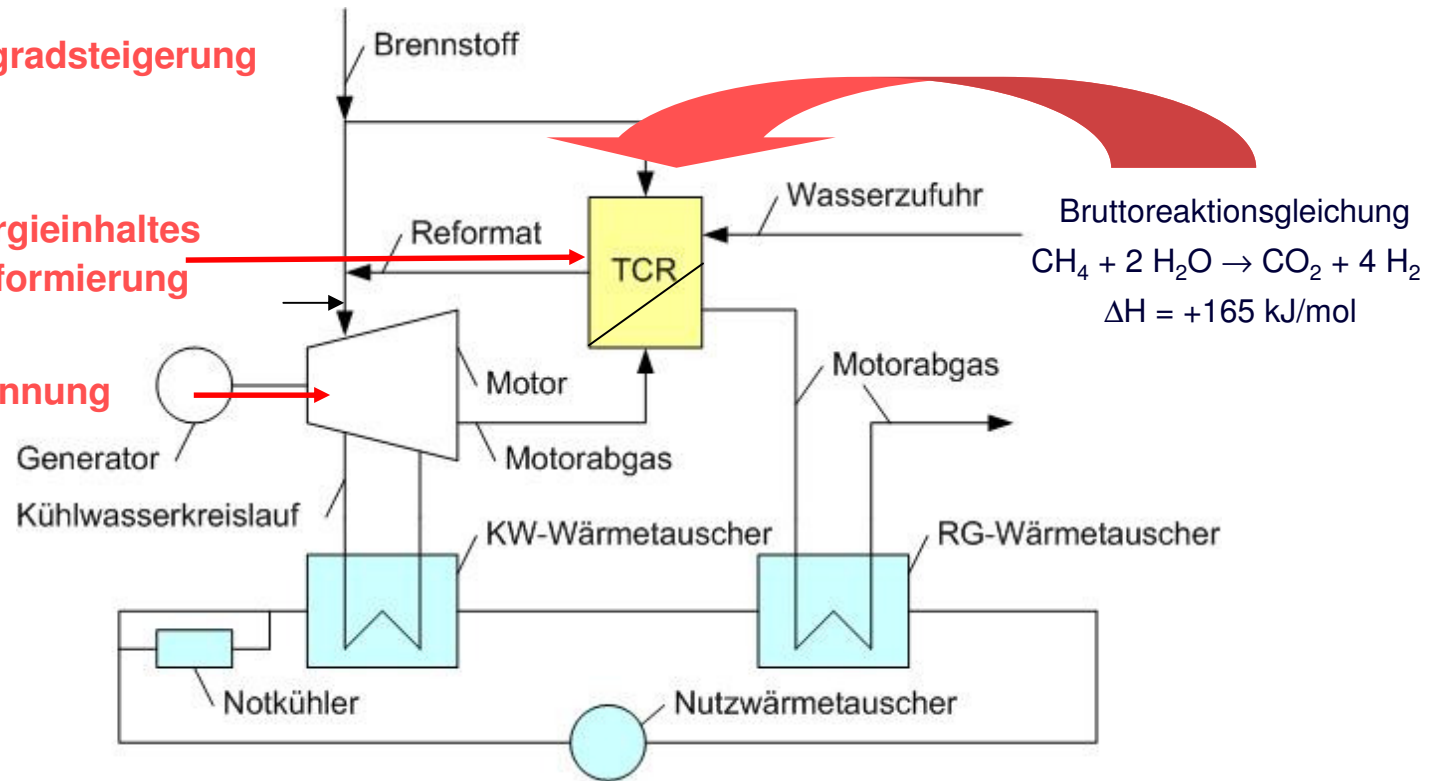
- **Erhöhung des Energieinhaltes bis zu 25 % möglich**
- **Homogenisierung der Zusammensetzung des Reformatgases für unterschiedliche Brennstoffe**
- **Reformierungsreaktion ist nicht äquimolar => Volumenzunahme**
- **Richtige Wahl der Betriebsparameter entscheidet über Katalysatorlebensdauer und Zusammensetzung des Reformatgases**



Thermochemische Rekuperation zur Wirkungsgradsteigerung im BHKW

Beiträge zur Wirkungsgradsteigerung

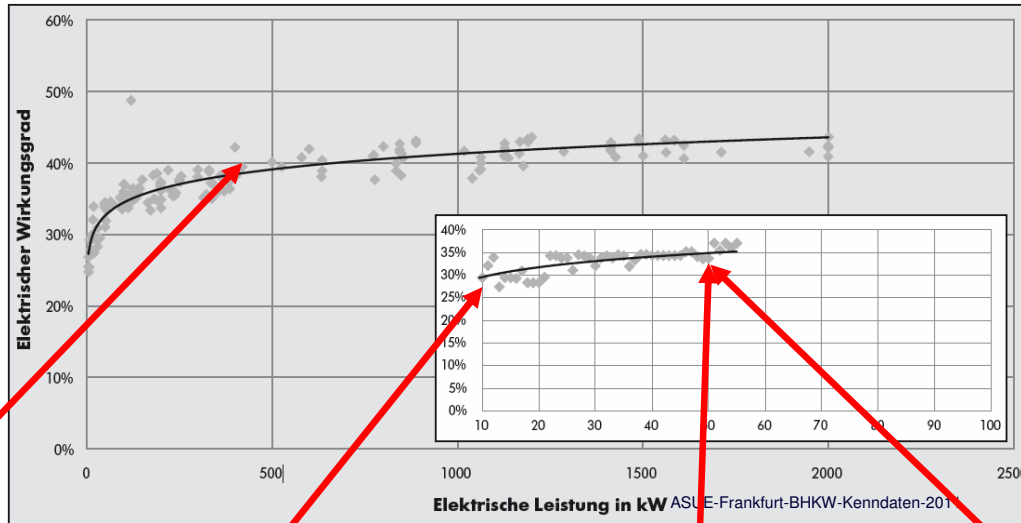
1. Erhöhung des Energieinhaltes durch die Dampfreformierung
2. Motorische Verbrennung von Reformatgas



- Motorabgaswärmenutzung zur Brennstoff-Reformierung in einem Reaktor
- Reformierung nur eines Teilstromes des Brennstoffes oder des vollständigen Brennstoffs unter Wasserzufuhr



1. Nutzung der Abgaswärme für die Dampfreformierung bei einem BHKW



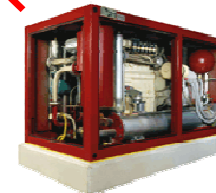
2G
Agenitor 312
450 kW
 $\eta_{el} = 41,0 \%$
 $T_{Abgas} = 415/710 \text{ } ^\circ\text{C}$
nach/vor
Turbolader



Senertec
SenerTec Dachs
5,5 kW
 $\eta_{el} = 27 \%$;
 $T_{Abgas} = 550 \text{ } ^\circ\text{C}$

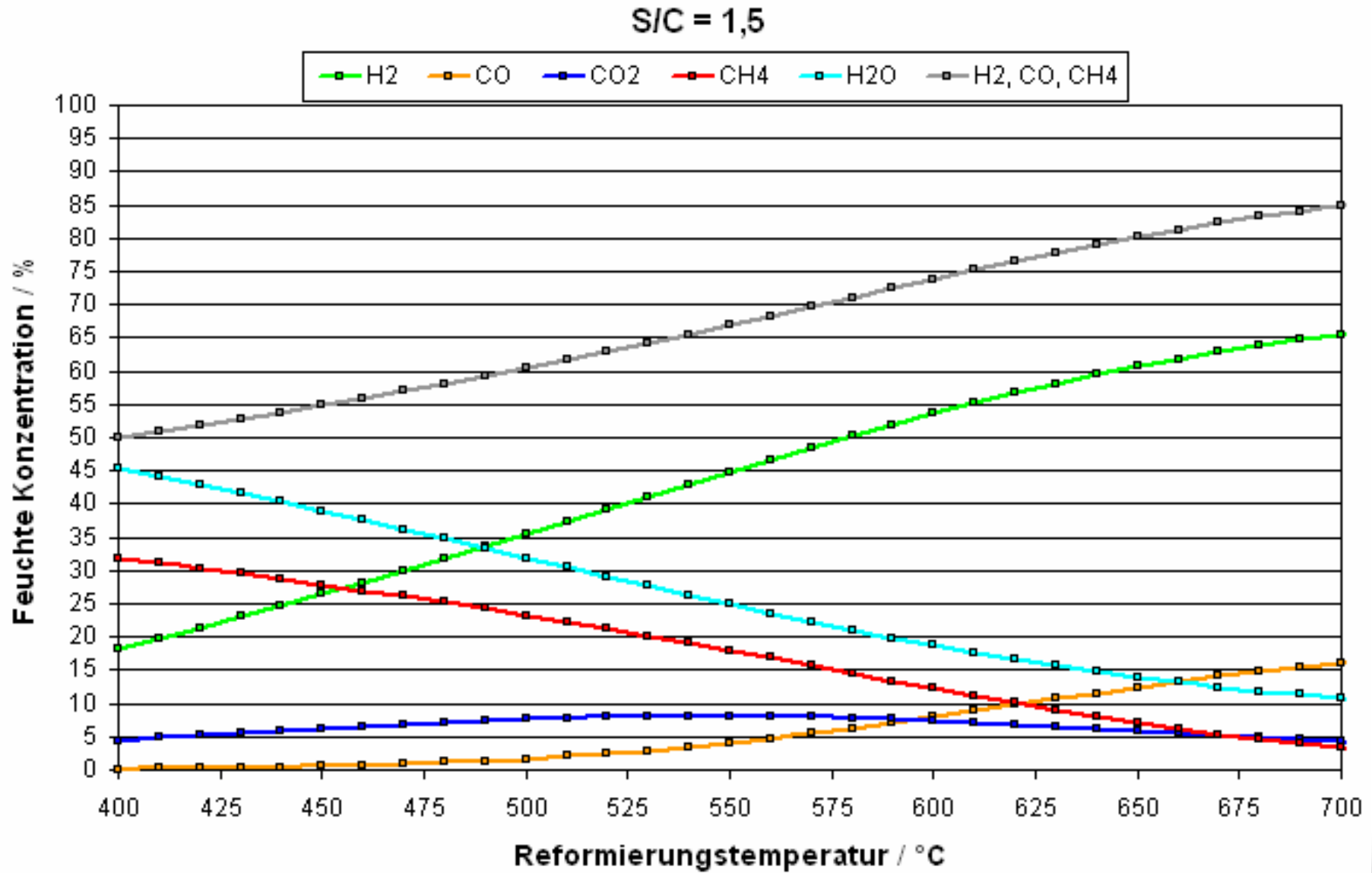


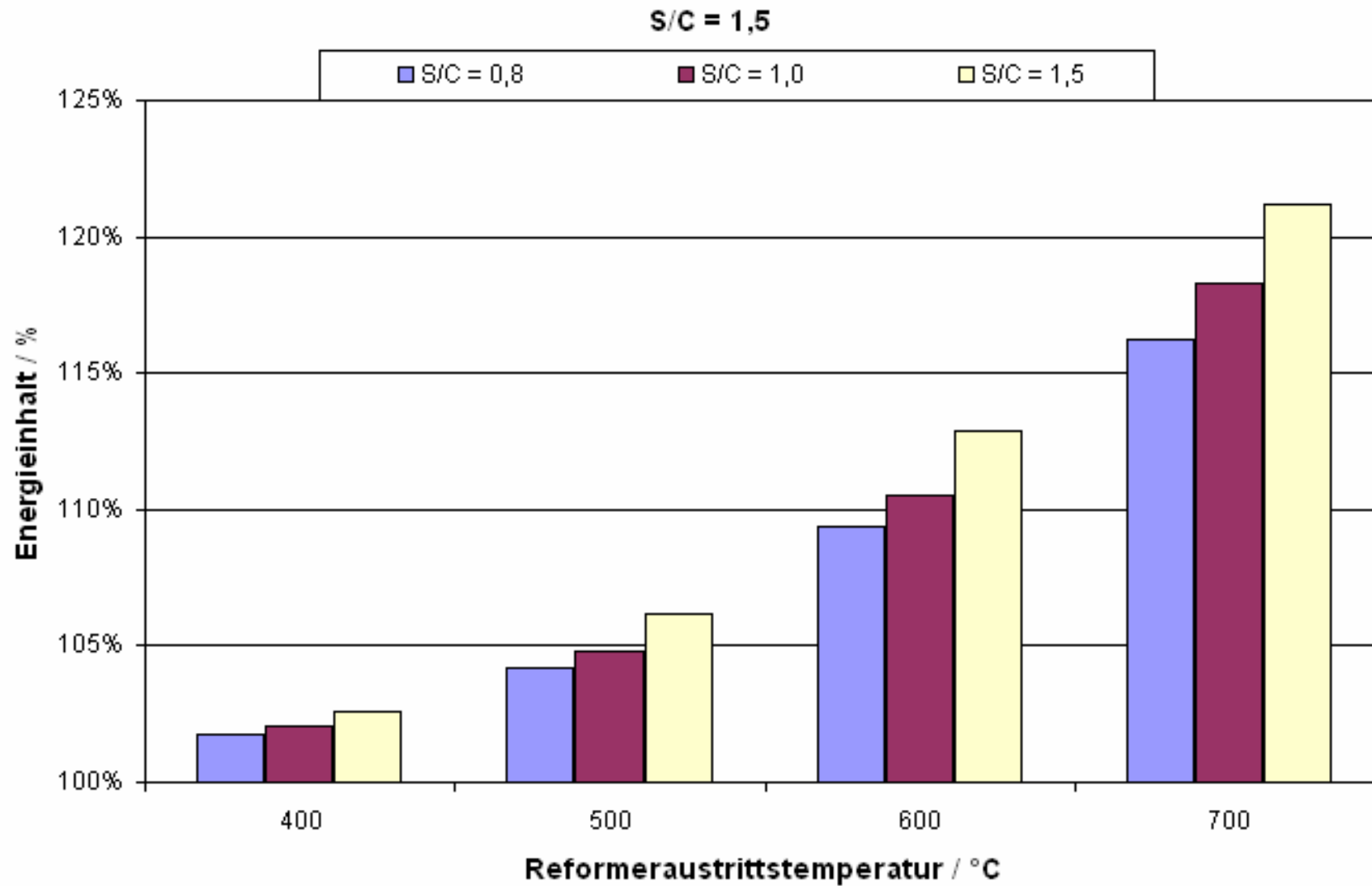
Deutz- Weichai
G 226-6B
50 kW
 $\eta_{el} = 31,2 \%$
 $T_{Abgas} = 450 - 480 \text{ } ^\circ\text{C}$

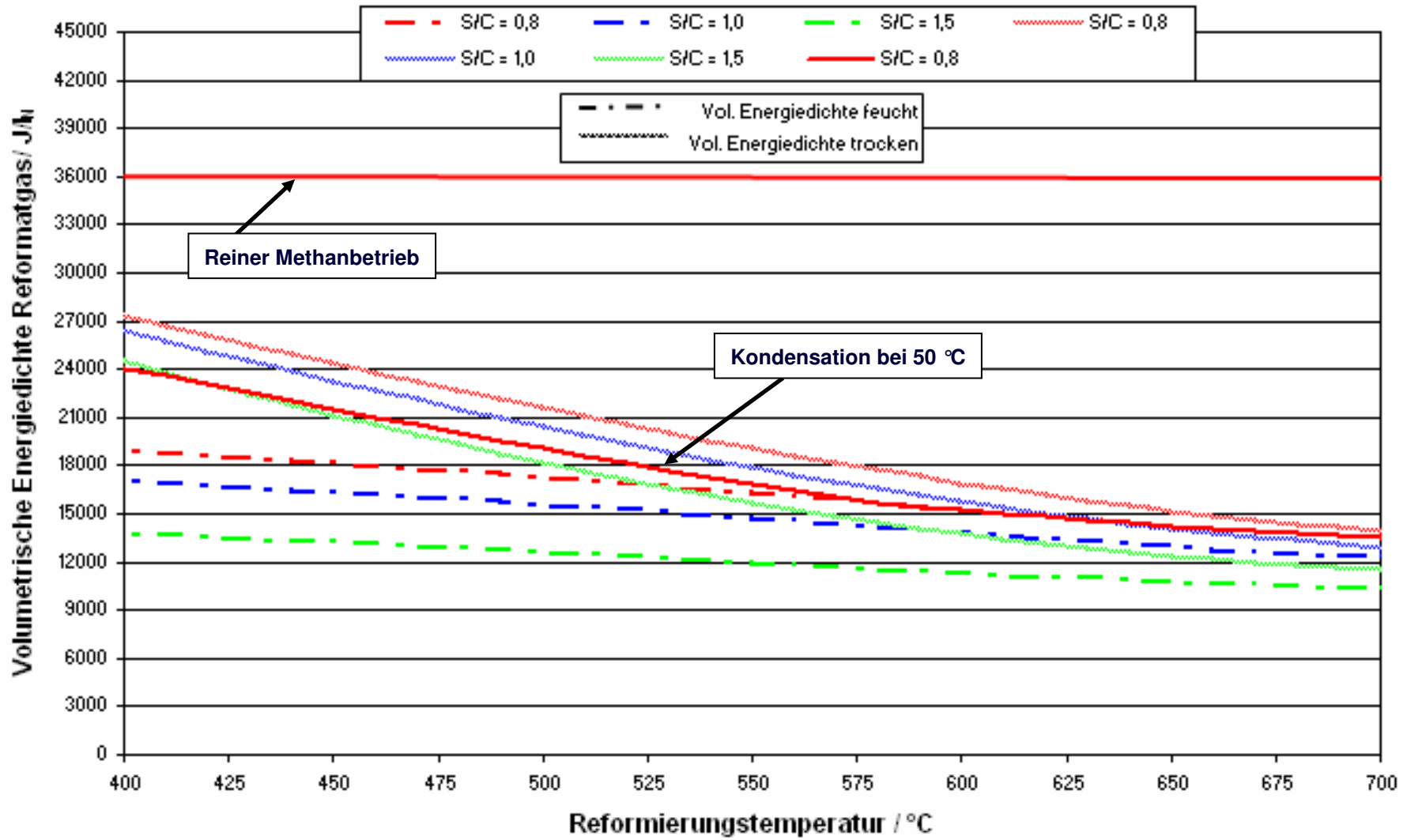


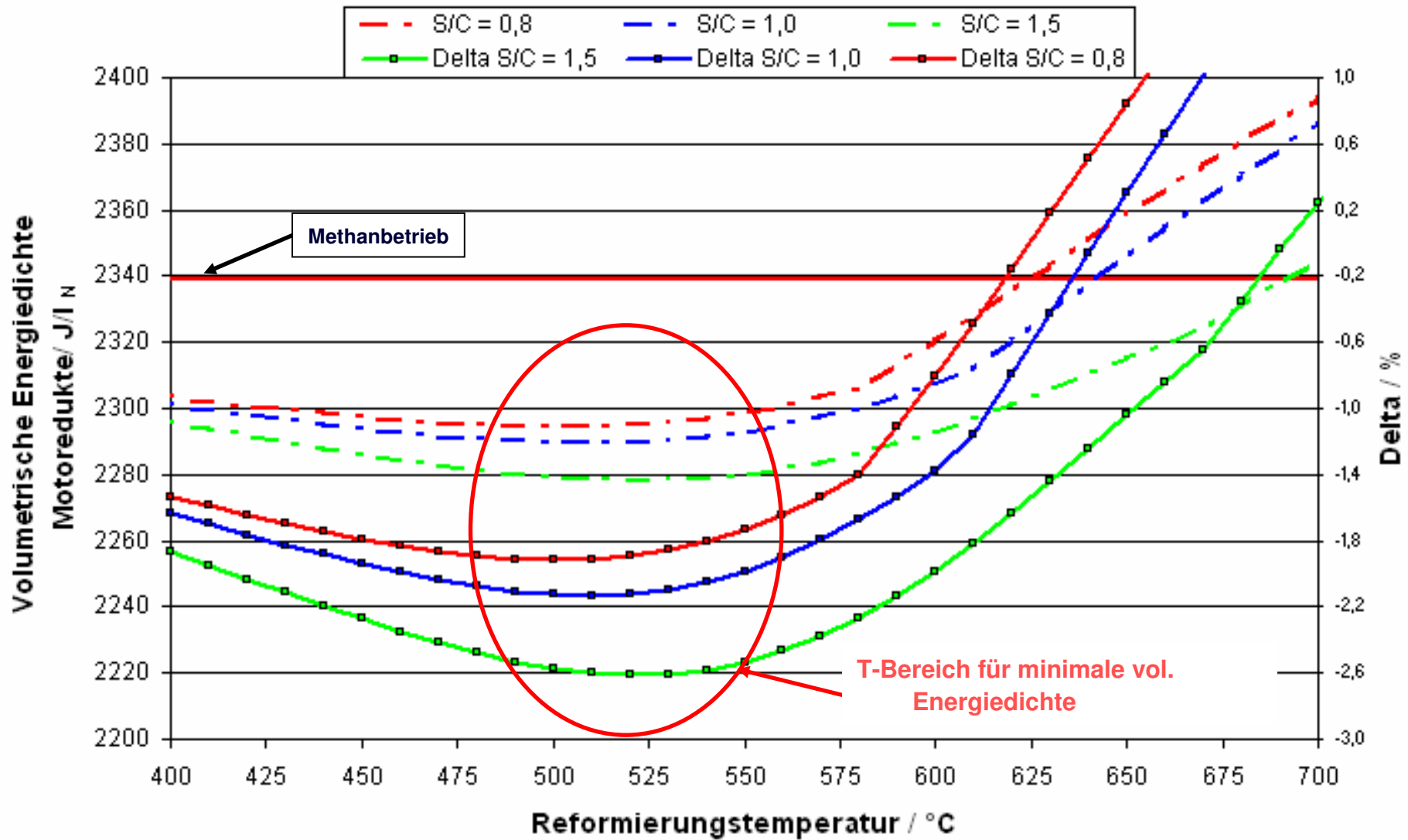
COMUNA-metall
2726/5450
52/112 kW
 $\eta_{el} = 33,0/34,0 \%$
 $T_{Abgas} = 650/600 \text{ } ^\circ\text{C}$

Abgastemperaturen von 400 – 700 °C









Senertec Dachs:

$$P_{el.} = 5,5 \text{ kW}$$

$$\eta_{el.} = 26,0 \%$$

$$T_{\text{Abgas nach Motor}} = 550 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Methanbedarf ca. 35,5 I_N/min

$$P_{\text{CH}_4} = 21,2 \text{ kW} = P_{\text{Motor, zu}}$$

$$\text{Lambda} = 1,5$$

Volumenstrom Luft ca. 508 I_N/min

Gesamtvolumenstrom ca. 543 I_N/min



Beispiel SenerTec Dachs unter der Annahme, dass Motor und Generator die gleichen Wirkungsgrade bezüglich der Erzeugung von elektrischer Leistung aus der zugeführten Leistung haben

Senertec Dachs mit TCR:

Gesamtvolumenstrom ca. 543 I_N/min

Reformierungstemperatur = 500 °C

S/C = 1,5; Lambda = 1,5

Volumenstrom Luft ca. 466 I_N/min

Reformatvolumenstrom 77 I_N/min (50 °C)

Methanvolumenstrom = 32,6 I_N/min

$$P_{\text{CH}_4} = 19,5 \text{ kW}; P_{\text{Motor, zu}} = 20,7 \text{ kW}$$

$$P_{el.} = 5,4 \text{ kW}$$

$\eta_{el.} = 27,6 \%$ (Wirkungsgradsteigerung trotz minimaler volumetrischer Energiedichte)

$T_{\text{Abgas nach Reformier}} \text{ ca. } 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Agenitor:

$$P_{el.} = 450 \text{ kW}$$

$$\eta_{el.} = 41,0 \%$$

$$T_{Abgas} = 710 \text{ }^\circ\text{C}$$

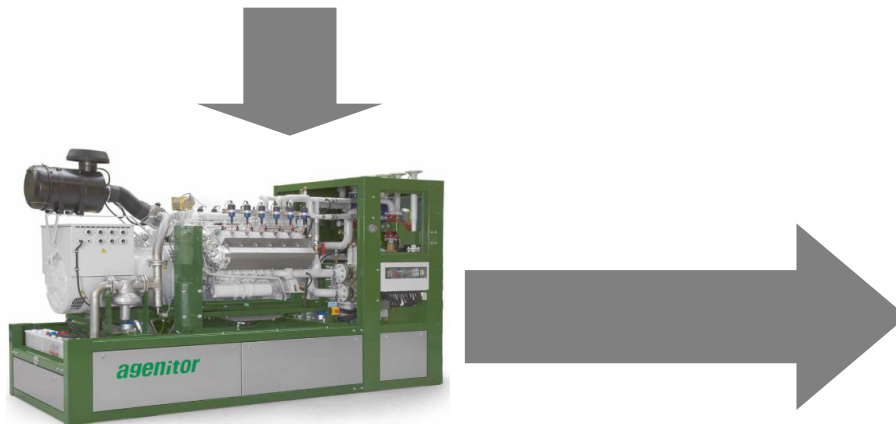
Methanbedarf ca. 1835 I_N /min

$$P_{CH_4} = 1097 \text{ kW} = P_{Motor, zu}$$

$$\text{Lambda} = 1,5$$

Volumenstrom Luft ca. 26278 I_N /min

Gesamtvolumenstrom ca. 28113 I_N /min



Beispiel Agenitor unter der Annahme, dass Motor und Generator die gleichen Wirkungsgrade bezüglich der Erzeugung von elektrischer Leistung aus der zugeführten Leistung haben

Agenitor mit TCR:

Gesamtvolumenstrom ca. 28113 I_N /min

Reformierungstemperatur = 650 $^\circ\text{C}$

Lambda = 1,5; S/C = 0,8

Volumenstrom Luft ca. 23459 I_N /min

Reformatvolumenstrom 4654 I_N /min (50 $^\circ\text{C}$)

Methanvolumenstrom = 1638 I_N /min

$$P_{CH_4} = 980 \text{ kW}; P_{Motor, zu} = 1010 \text{ kW}$$

$$P_{el.} = 453,8 \text{ kW}$$

$$\eta_{el.} = 46,3 \%$$

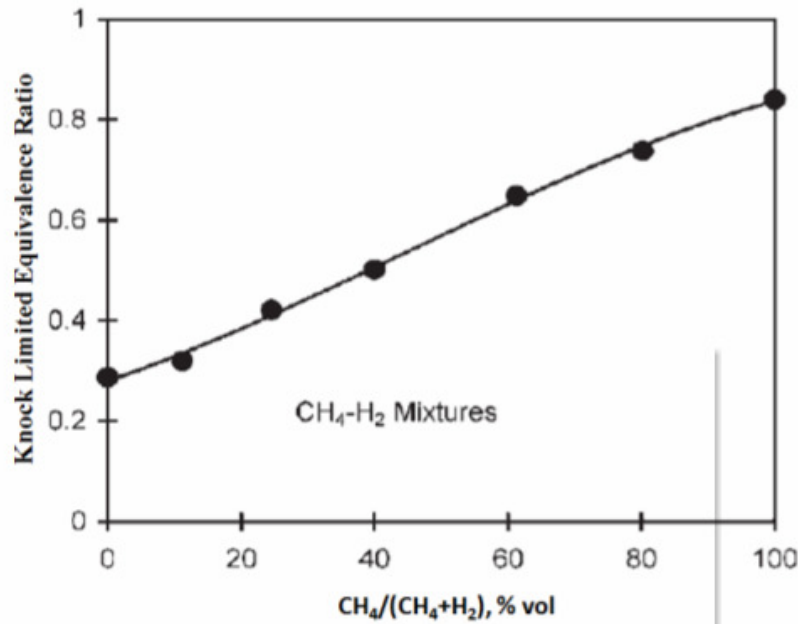
- **Elektrischer Wirkungsgrad kann im gesamten Temperaturbereich und Leistungsbereich gesteigert werden**
- **Bis zu 5 % Steigerung des elektrischen Wirkungsgrades bei einer Reformierungstemperatur von 650 °C und S/C = 0,8**
- **Bei niedrigen Reformierungstemperaturen ist die absolute elektrische Leistung möglicherweise geringfügig niedriger , bei hohen Reformierungstemperaturen ist absolute elektrische Leistung höher**
- **Niedriges S/C ist für die Reformierung zu bevorzugen**



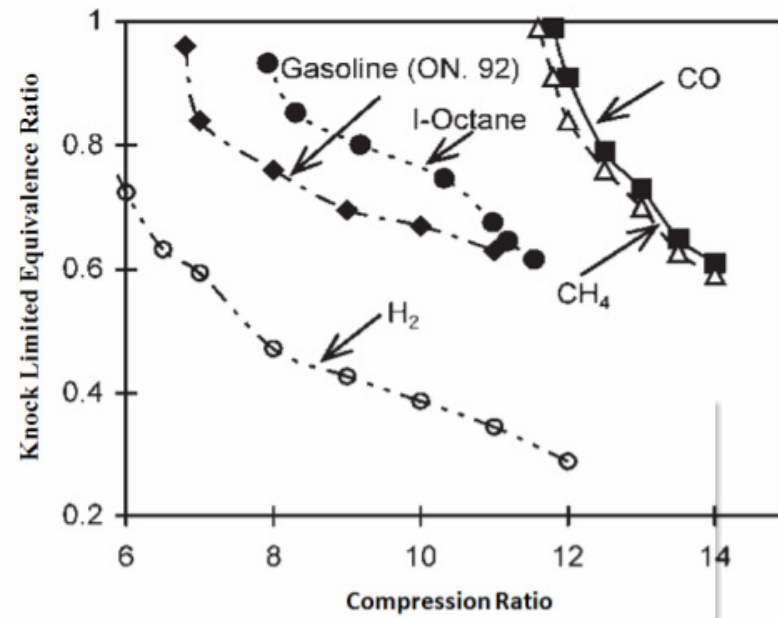
2. Motorische Verbrennung von Reformatgas

- Nur wenige Literaturstellen zur Verbrennung von Reformatgas vorhanden
- Einfluss auf die Verbrennungschemie und die Brennstoffumsetzung durch unterschiedliche physikalisch-chemische Eigenschaften

Klopffestigkeit in Abhängigkeit des Äquivalenzverhältnisses (=1/Luftverhältnis) für unterschiedliche Brenngaszusammensetzungen



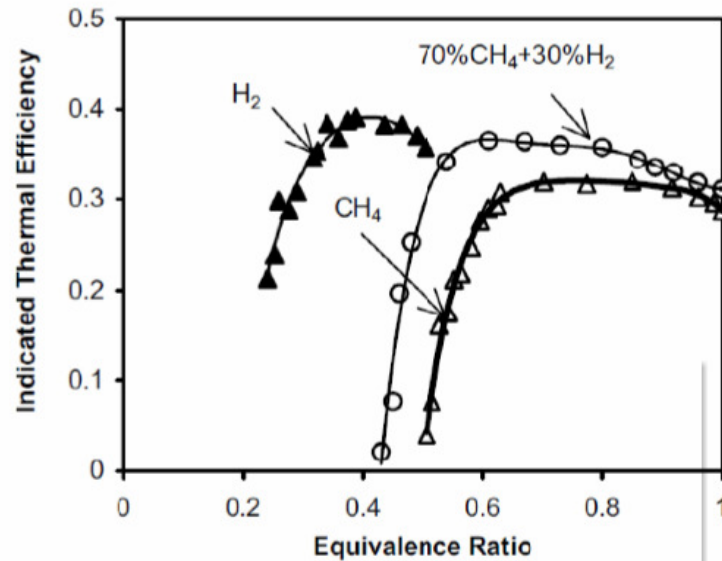
Bestimmung der Klopfgrenze variierender CH₄/H₂-Mischungsverhältnisse unter folgenden Bedingungen: Verdichtungsverhältnis = 12, Zündzeitpunkt = 12 ° hinter OT, Tein = 38 °C, n = 900 min⁻¹, vollständig geöffnete Drossel. K. Li; An Experimental Investigation of S.I. Engine Operation on Gaseous Fuels Lean Mixtures



Vergleich der Klopffestigkeit verschiedener flüssiger und gasförmiger Treibstoffe unter folgenden Bedingungen: Tein = 38 °C, n = 900 min⁻¹, vollständig geöffnete Drossel.

K. Li; An Experimental Investigation of S.I. Engine Operation on Gaseous Fuels Lean Mixtures

Wirkungsgrad



Innerer Wirkungsgrad des Versuchsmotors für verschiedene gasförmige Brennstoffe als Funktion des Äquivalenzverhältnisses (=1/Luftverhältnis)

K. Li; An Experimental Investigation of S.I. Engine Operation on Gaseous Fuels Lean Mixtures

Senertec Dachs:

$P_{el.} = 5,5 \text{ KW}$

$\eta_{el.} = 26,0 \%$

$\eta_{el.} = 27,6 \%$ (nach TCR)

$\eta_{el.}$ ca. 30 % (nach TCR + im. Verbr.)

T_{Abgas} nach Motor = ?



Agenitor:

$P_{el.} = 450 \text{ KW}$

$\eta_{el.} = 41,0 \%$

$\eta_{el.} = 46,3 \%$ (nach TCR)

$\eta_{el.}$ ca. 49,3 % (nach TCR + im. Verbr.)

$T_{Abgas} = ?$



Durch Wasserstoff wird die Klopfestigkeit bei allen Versuchen in den Veröffentlichungen gesenkt.

Allerdings ist Wasserstoff nach White, Steeper, Lutz sehr klopfest (Oktanzahl 120).

Wasserstoff neigt aber zur Vorzündung an heißen Oberflächen (kann konstruktiv vermieden werden).

Klopfen als Gasphasenphänomen kann nicht vermieden werden und beschränkt das maximal zu erreichende Verdichtungsverhältnis.

Beide Phänomene/Begriffe werden in der Literatur häufig nicht richtig unterschieden, so dass die Daten für die Verbrennung von Reformatgas nicht verlässlich sind.

Wirkungsgrad:

Wirkungsgradsteigerung laut Literatur bei Betrieb mit H_2 (ggfs. CO) im Vergleich zu reinem CH_4

Emissionen:

Rückgang der Methanemissionen (Methanschlupf) und der Emissionen unverbrannter Komponenten

Bezüglich der Emission von Stickoxiden ist die Literatur nicht einheitlich



IGF- Vorhaben Nr. 442 ZN / Laufzeit 01.07.2012 - 30.06.2014



„Thermochemische Rekuperation zur Wirkungsgradsteigerung von erdgasbetriebenen Blockheizkraftwerken“



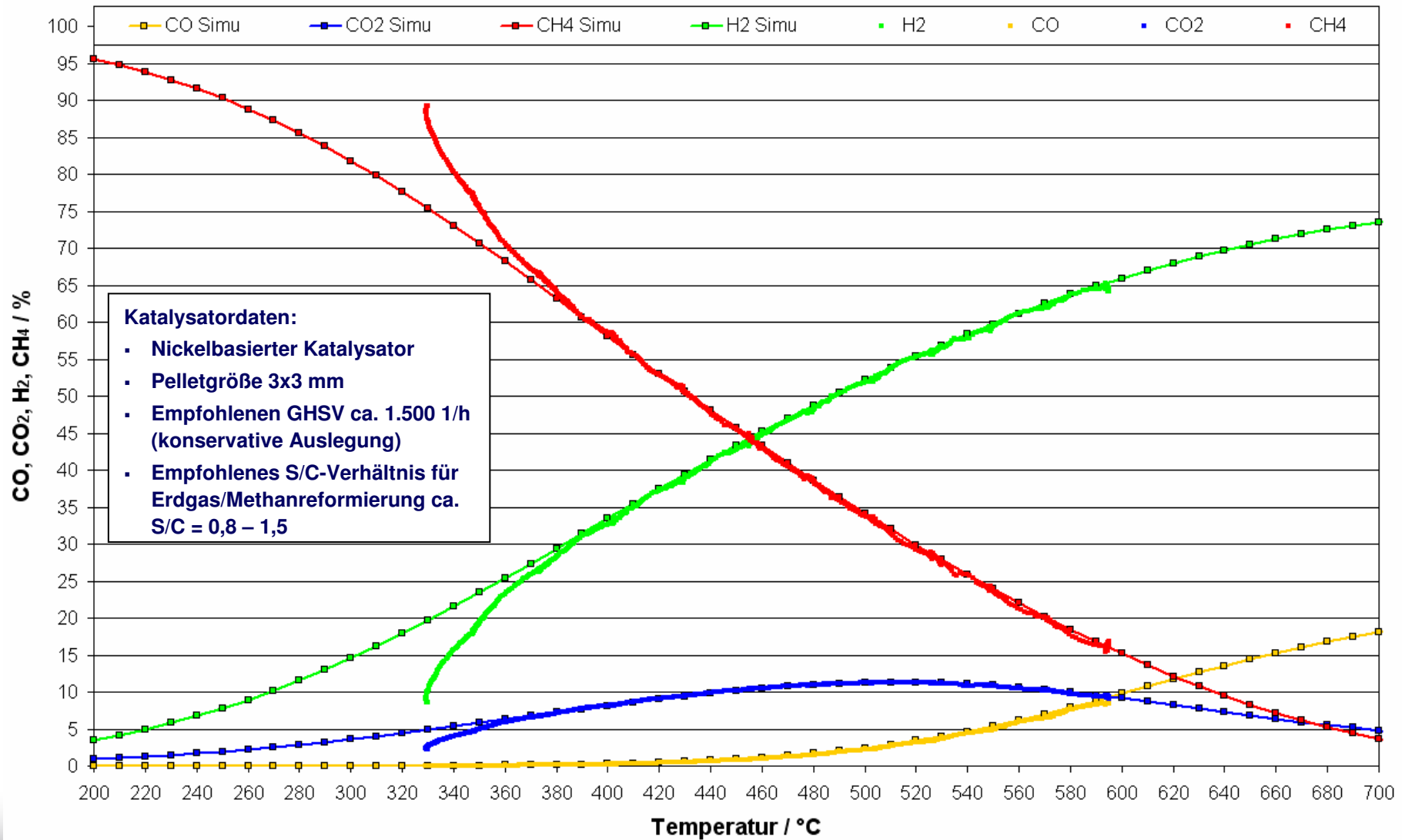
Forschungsstellen:

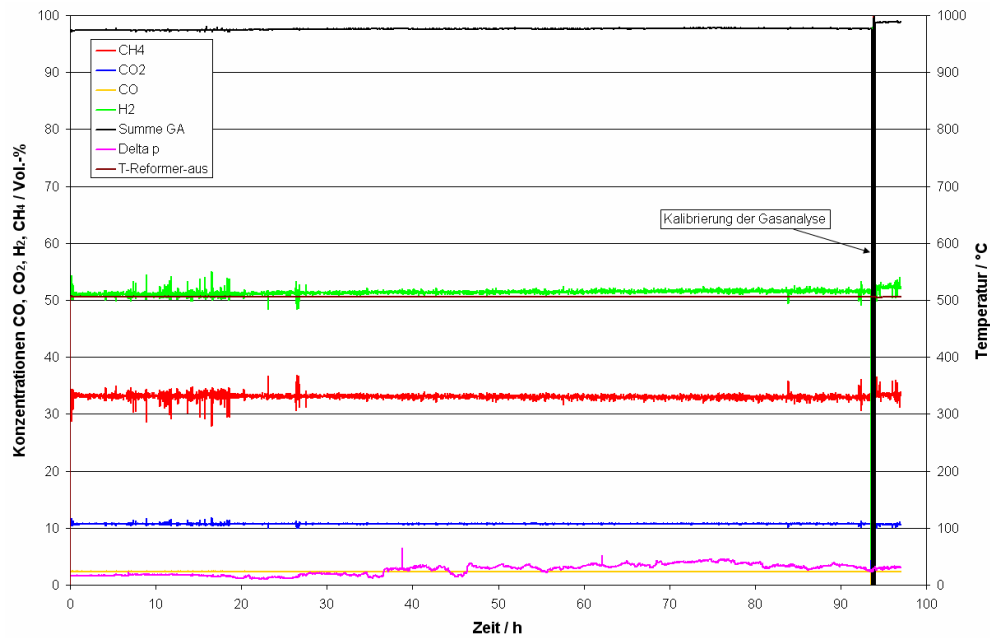


**Zentrum für BrennstoffzellenTechnik, ZBT GmbH
(Wärmeintegration, Verfahrenstechnik)**

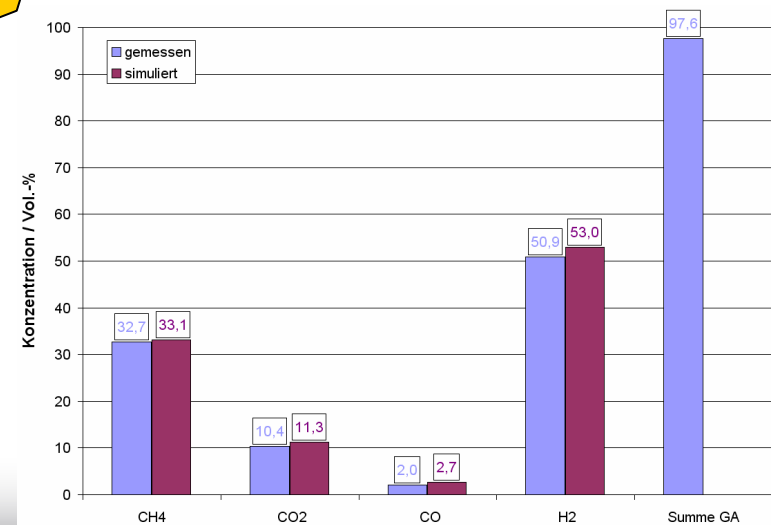
**Institut für Verbrennung und Gasdynamik, IVG – Uni Du-E
(motorische Untersuchungen)**

GHSV 1.500 1/h; S/C = 1,5

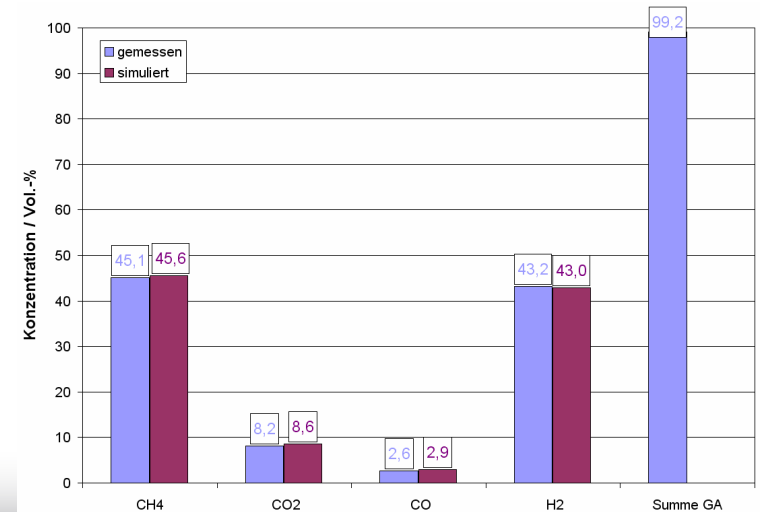
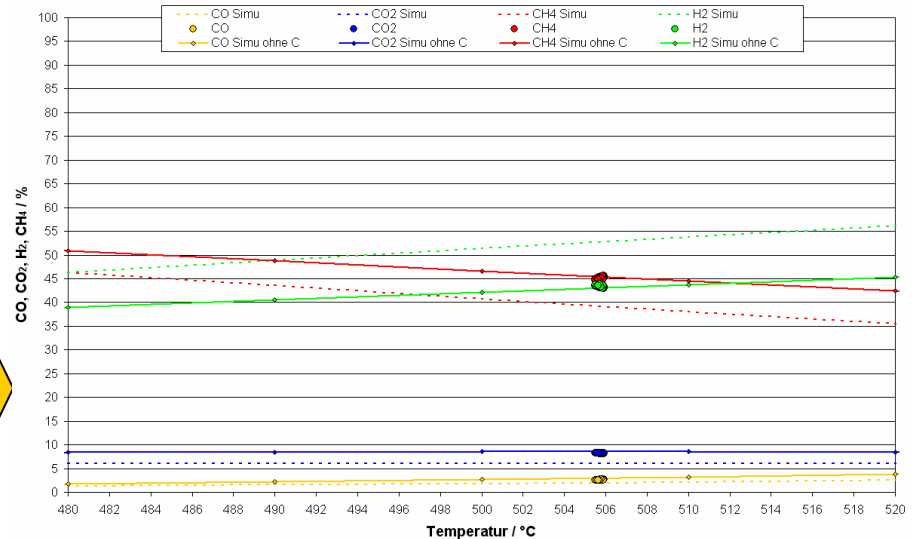
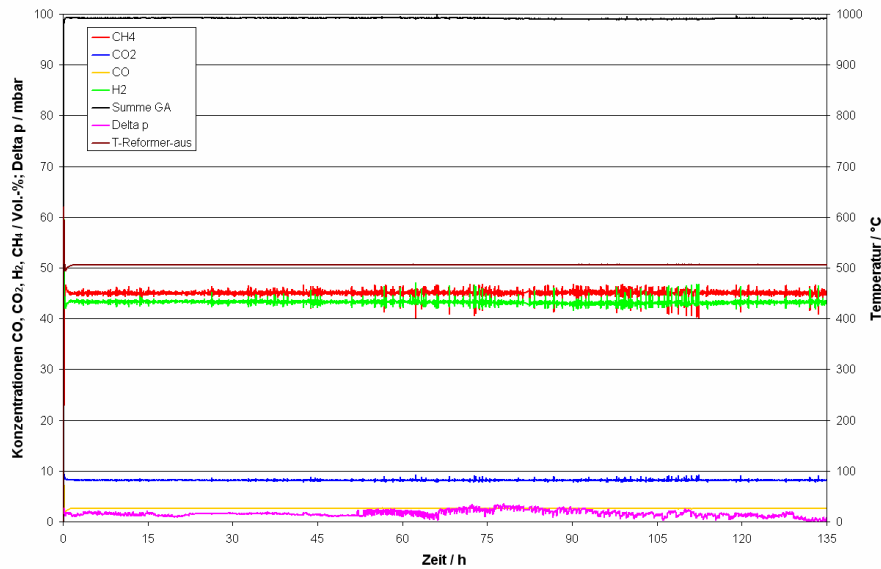




- Reformierungstemperatur ca. 500 °C über einen Zeitraum von 95 h
- Thermodynamische Gleichgewichtskonzentrationen über einen Zeitraum von 95 h ohne Degradationserscheinungen erreicht
- Druckverlust über Schüttung ca. 5 mbar
- Keine Kohlenstoffabscheidung festgestellt



Konzentrationen Langzeitversuch (GHSV = 1.500 1/h; S/C = 0,8)

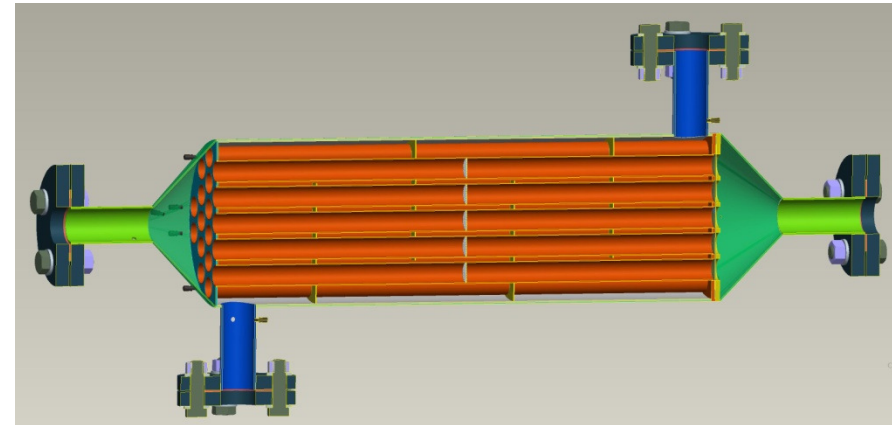


- Reformierungstemperatur ca. 500 °C über einen Zeitraum von 135 h
- Thermodynamische Gleichgewichtskonzentrationen über einen Zeitraum von 135 h ohne Degradationserscheinungen erreicht
- Druckverlust über Schüttung ca. 5 mbar
- Keine Kohlenstoffabscheidung auch bei niedrigen S/C-Verhältnissen festgestellt

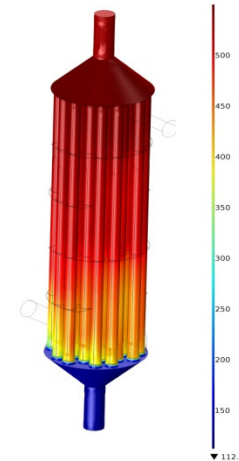
Reaktorauslegung:

- Konservative Auslegung nach Referenzpunkt (S/C = 1,5)
- Für einen Methan-Normvolumenstrom von ca. 2000 l/h
- Für einen Druckverlust auf der Reformersseite von ca. 5 mbar im Referenzpunkt
- Druckverlust Rauchgasseite < 20 mbar
- Anwendbar auch für niedrigere S/C und niedrigere GHSV
- Reformers konvektiv beheizt durch das Motorabgas

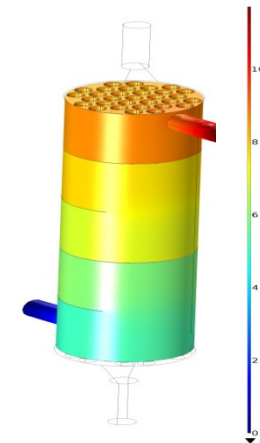
=> Auslegung als Rohrbündelreaktor



Temperatur



Druck



Strömungs- und Wärmeübertragungssimulation

ZBT:

- Aufbau des Reaktors
- Charakterisierung für unterschiedliche Betriebsparameter
- Optimierung des Reaktors aufgrund neuer Ergebnisse

IVG:

- Umbau eines SenerTec Dachs für motorische Untersuchungen (Zylinderdruckindizierung, Thermoelemente etc.)
- Charakterisierung des Versuchsmotors mit unterschiedlichen Reformatgaszusammensetzungen
- Ermittlung von Betriebsparametern für die Reformgasverbrennung und verlässlicheren Daten

Des Weiteren:

- **Durchführung einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für das TCR-Verfahren bezüglich Invest- und Betriebskosten**

Pros:

- Signifikante Steigerung des el. Wirkungsgrades bzw. der Stromkennzahl durch Steigerung des Energieinhaltes des Motoredukts
- Reduzierung der Betriebskosten
- Längere Betriebszeiten (auch bei geringer Wärmeabnahme im wärmegeführten Betrieb)
- Effiziente Verstromung von Energieträgern unterschiedlicher Qualitäten
- Gleichförmige Brennstoffqualität am Motoreingang
- Verstromung von niederkalorischen Gasen möglich
- Höheres Wirkungsgradpotential als andere Abgaswärmeverstromungskonzepte
- Reduktion der Emissionen wie z.B. Methanschlupf, NO_x-Emissionen (, da für $xH_2: \uparrow \Rightarrow \lambda: \uparrow \Rightarrow T_{\text{Verbrennung}}: \downarrow$)

Cons:

- Apparativer Aufwand (Wasserdosierung, Entschwefelung, Reaktor, Verdampfer, Überhitzer, Kondensator)
- Alternative Techniken zur Abwärmeverstromung teils weiter entwickelt (ORC-Prozess, Heißgasturbine, Stirlingmotor, Dampfmotor, ...)



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

<http://www.zbt-duisburg.de/>

**Dipl.-Ing. Carsten Spieker
ZBT GmbH
Carl-Benz-Straße 201
47057 Duisburg
Germany**

**Telefon: +49-203-7598-2747
Telefax: +49-203-7598 2222
Email: C.Spieker@zbt-duisburg.de
www.zbt-duisburg.de**