

# VDEh- Betriebsforschungsinstitut GmbH

„Vorstellung eines weiterentwickelten Messgerätes  
zur Ermittlung von Gasbeschaffenheitsschwankungen  
bei Erd- und Prozessgasen“

Sebastian Bialek, Bernhart Stranzinger, Tobias Lorenz



- › Gasbeschaffenheit und Gasbeschaffenheitsänderungen
- › Gasnutzung in der Eisen- und Stahlindustrie
- › Messung der Gasbeschaffenheit
- › Weiterentwicklung und Erprobung eines universellen Brenngasmessgerätes
- › Weitere Arbeiten und Ausblick

## Vorgestellte Ergebnisse Teilweise aus BMWi-Projekten:

FKZ 16155 N/I (AiF),

FKZ 03ET1296 (PTJ).



**Vielen Dank für die Förderung.**

Gefördert durch:

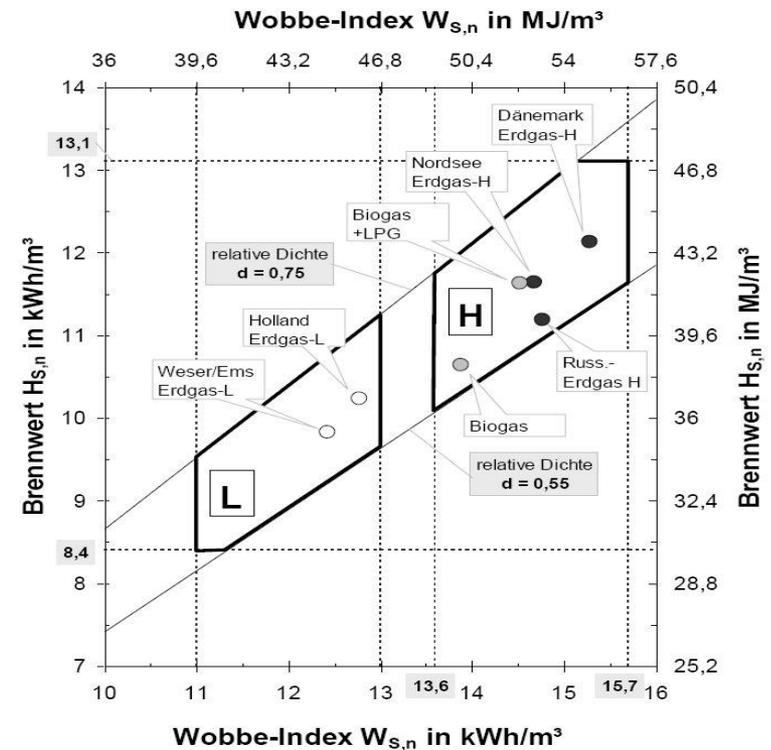


Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

# Gasbeschaffenheit Erdgas

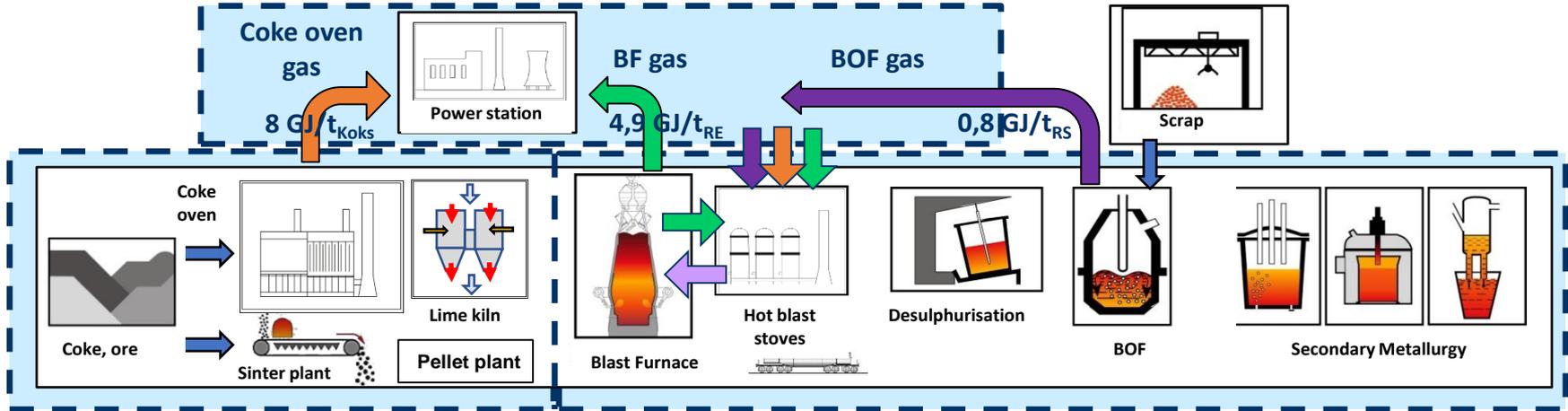
- › Durch das Fortschreiten der Energiewende werden zukünftig Gase unterschiedlicher Herkunft vermehrt gemischt, das zu Veränderungen in der Zusammensetzung führt (Ressourcen-Diversifikation, z. B. durch den Wegfall EG L, Bio-Gas, Wasserstoff, synthetische Gase)
- › Gasqualität wird nach DVGW Richtlinie G 260 geregelt
- › Europäische Regelung (DIN EN 16726) enthält keine Kenngrößen (außer der Methanzahl)



- › Auslegung von Industrieöfen ist individuell mit Referenz: Durchsatz, Produkt und Gasspezifikation
- › In der Theorie ist die Gas-Austauschbarkeit gegeben durch „ $W_o \times p_f = \text{const.}$ “
- › In der Praxis ändern sich mit dem Wobbe-Index wichtige Parameter für die Prozessfeuerung:
  - › Mindestluftbedarf  $\rightarrow$  Residual- $O_2 \rightarrow$  (feuerungstechnischer) Wirkungsgrad  $\rightarrow$  Produktqualität
  - › Adiabate Flammentemperatur ( $T_{ad} \sim H_u$ )
  - › Flammenlänge und -profil:  $l_f \sim d$
  - › Spezifische  $CO_2$ -Emissionen
  - › Abgasmenge und Zusammensetzung  $\rightarrow$  Wärmeübergang, Rekus
  - › Impulsverhältnis am Brennermund  $\rightarrow$  Ausbrand/Mischung  $\rightarrow$  Temperaturspitzen  $\rightarrow$   $NO_x$ -Emissionen
  - › Wärmeübertragung im Ofen

# Stahlroute – Gasaufkommen und -verwendung

## 4. Power production by the use of process gases

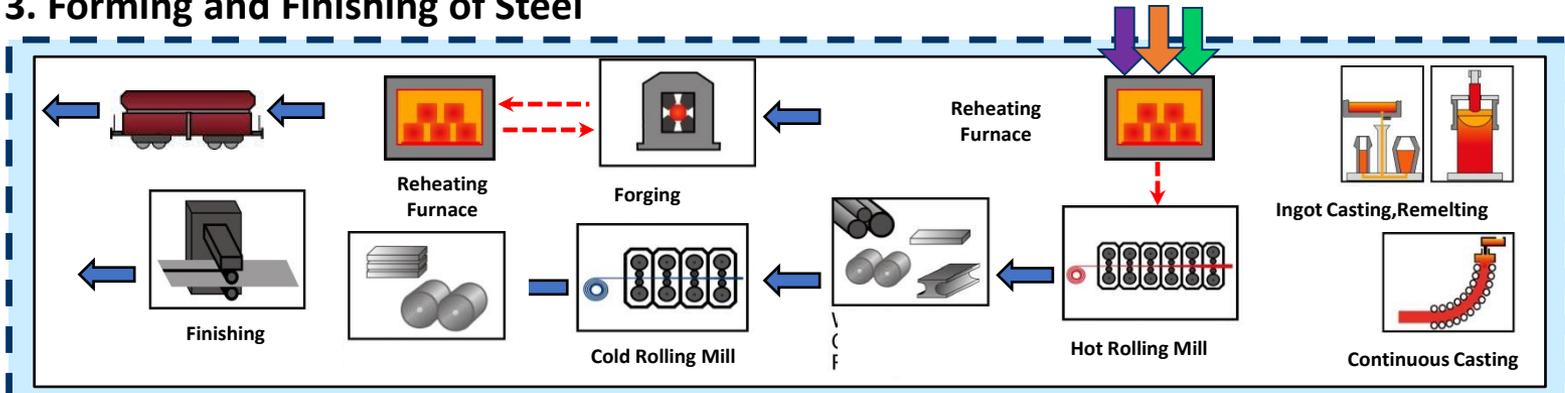


### 1. Raw material handling

### 2. Production of Hot Metal and Steel

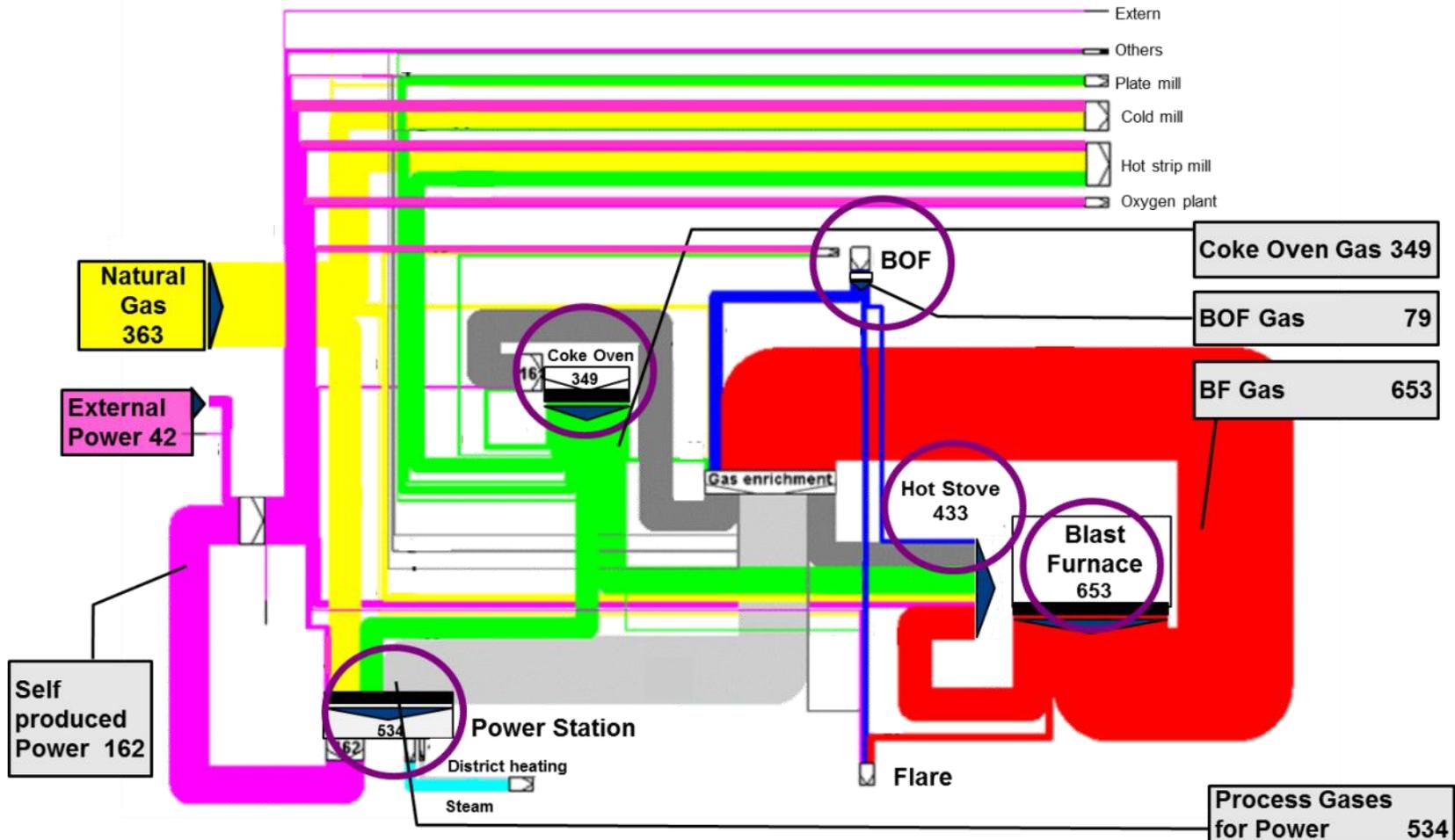
### 3. Forming and Finishing of Steel

1 t steel



Quelle: H. Rosemann, B. Stranzinger; 1st International Process Integration Forum for the Steel Industry; Lulea (2014)

# Energiebilanz der integrierten Hütte (Daten in MW)



<sup>1)</sup> Ref.: Best Available Techniques (BAT) Reference Document for Iron and Steel Production, European Commission, 08-March-2012,

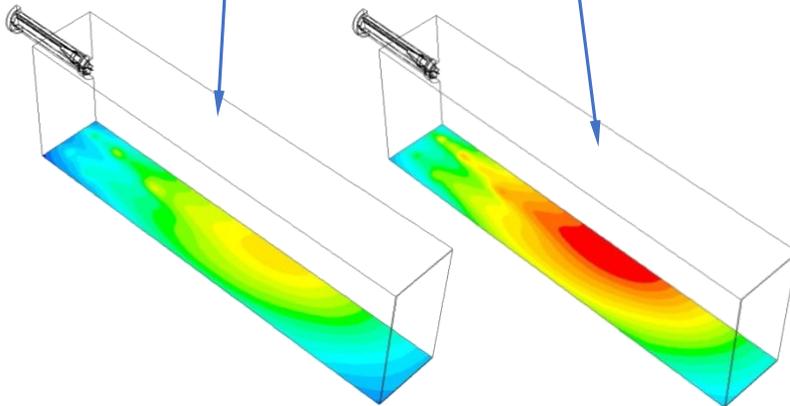
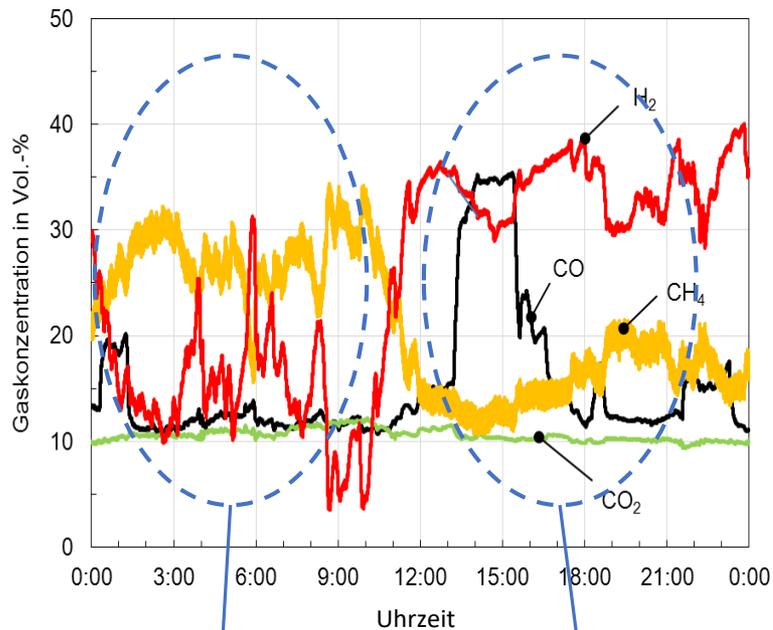
# Beispiel: Dynamische Gasmischung der integrierten Hütte

	Einheit	Gichtgas	Koksofengas	Erdgas	GG + EG	GG + KG
CO	Vol.-%	28,20	5,70	-	21,92	15,27
H <sub>2</sub>	Vol.-%	2,10	47,30	-	1,63	28,08
CH <sub>4</sub>	Vol.-%	-	22,10	86,25	19,21	12,70
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	Vol.-%	-	1,00	8,56	1,91	0,57
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	Vol.-%	-	-	1,89	0,42	-
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	Vol.-%	-	-	0,39	0,09	-
CO <sub>2</sub>	Vol.-%	16,60	1,60	1,91	13,33	7,98
O <sub>2</sub>	Vol.-%	-	0,40	-	-	0,23
N <sub>2</sub>	Vol.-%	43,90	9,90	1,00	34,35	24,36
H <sub>2</sub> O	Vol.-%	9,20	12,00	-	7,15	10,81
H <sub>u</sub>	kJ/m <sup>3</sup>	3,789	14,396	38,713	<b>11.566</b>	<b>9.887</b>
L <sub>min</sub>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0,72	3,51	10,21	<b>2,83</b>	<b>2,33</b>
Dichte	kg/m <sup>3</sup>	1,31	0,55	0,83	1,20	0,87
Wobbe	kJ/m <sup>3</sup>	3,763	22,058	48,213	<b>11,981</b>	<b>12,025</b>
Emissionsfaktor	-	0,20	0,16	0,14	0,17	0,18
V <sub>AG, f</sub>	m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	1,61	4,43	11,79	3,87	3,23
CO <sub>2</sub> AG, f	Vol.-%	27,90	7,09	9,54	15,46	11,49
T <sub>ad</sub>	°C	1,339	1,893	1,916	<b>1,726</b>	<b>1,774</b>

› Zielgröße  $Wo_o = 12 \text{ MJ/m}^3$

› Annahme: konstantes  $\lambda = 1,05$

# Beispiel: Dynamische Gasmischung der integrierten Hütte

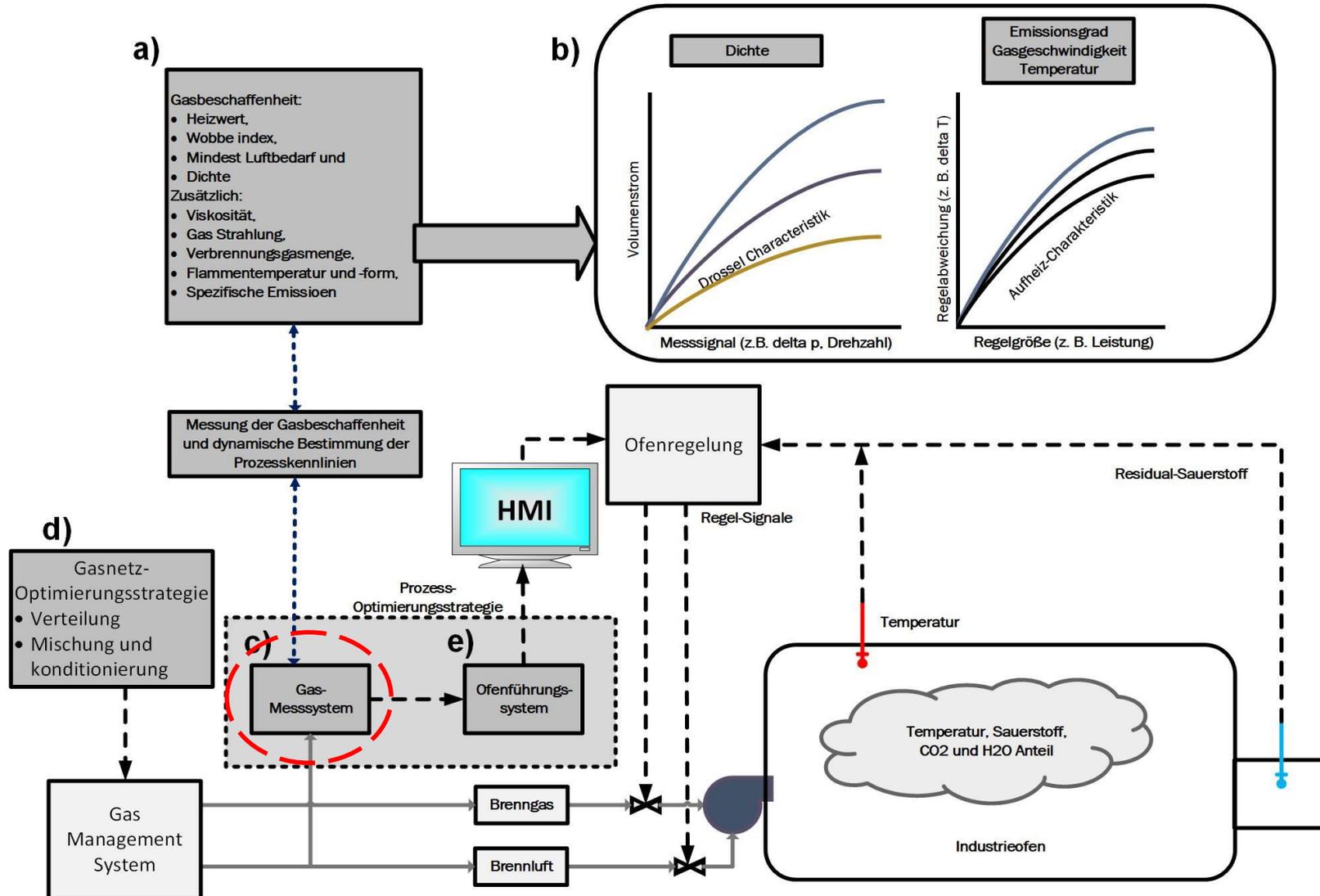


- › Effiziente Gas-Substitution ist durch lang- und kurzfristige Änderungen der Zusammensetzung beeinträchtigt
- › Direkte und indirekte Messverfahren versagen bei H<sub>2</sub>- und CO-Anteilen im Gas

Konsequenzen:

- › Ungenaue Messung der verbrennungstechnischen Eigenschaften (H<sub>u</sub>, W<sub>u</sub>, L<sub>min</sub>, etc.)
  - › Potenzial zur Verbesserung der Verbrennungs- und Prozessregelung (Temperatur, O<sub>2</sub>)

# Messung und Regelung von Gasen mit schwankender Zusammensetzung



An Thermoprozessanlagen werden überwiegend eingesetzt:

› Kontinuierliche Gasanalysatoren

- › Messprinzip:  $Y_{Gas} = \sum_{j=1}^N (X_j \cdot Y_j) / 100$
- › Nachteil: Querempfindlichkeit der einzelnen Komponenten

› Zyklische Gaschromatographen

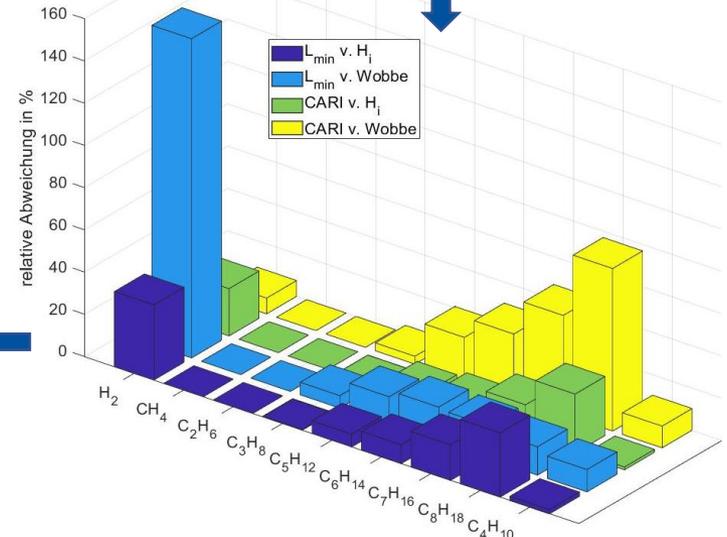
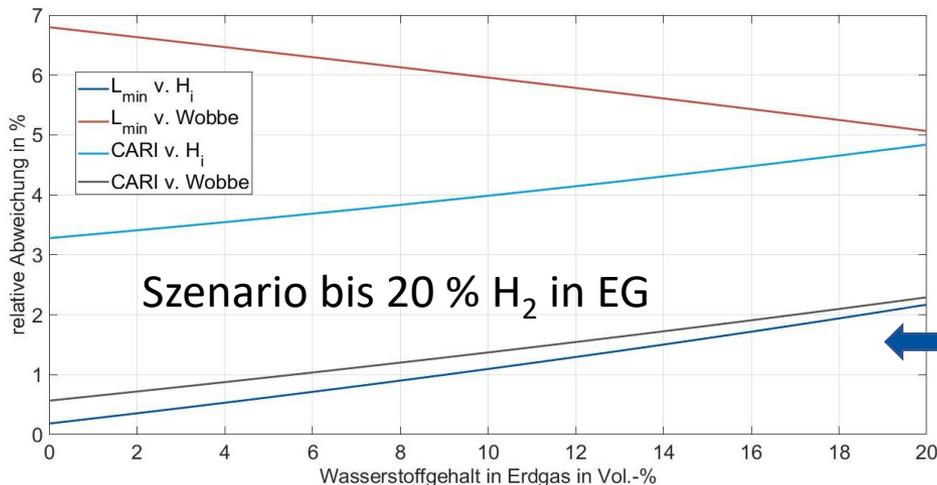
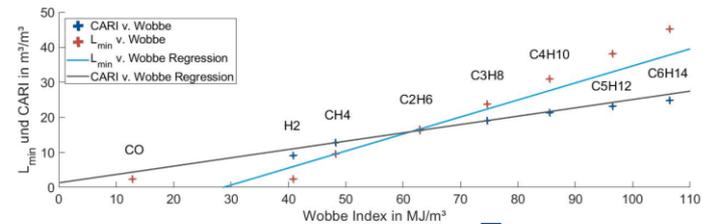
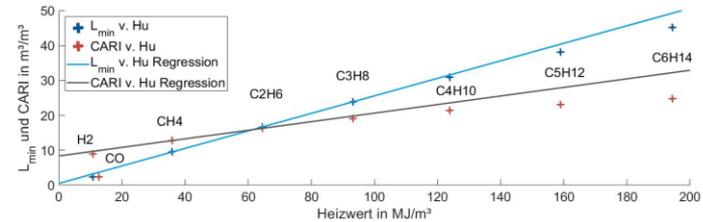
- › Messprinzip:  $Y_{Gas} = \sum_{j=1}^N (X_j \cdot Y_j) / 100$
- › Nachteil: Diskontinuierliche Messung (bis zu 12 Min.)

› Kontinuierliche kalorimeterartige Messsysteme

- › Direkte ( $H_u$ ) oder indirekte ( $L_{min}$ ) Messung und empirische Korrelationen zur Bestimmung weiterer Größen
- › Nachteil: Messverfahren und speziell Korrelationen sind i. d. R. nicht geeignet für große Änderungen im  $H_2$ , oder CO-Gehalt

# Kalorimeterartige Gasbeschaffenheitsmessung

- › Linearer Zusammenhang zwischen Mindestluftbedarf und Heizwert für typische Kohlenwasserstoffe im Erdgas → mittlere Abweichung < rd. 3%
- › Abweichung H<sub>2</sub> → rd. 150 %
- › Abweichung CO → rd. 420 %



# (Weiter-)Entwicklung des Universellen Brenngasmessgerätes (UniBMG)

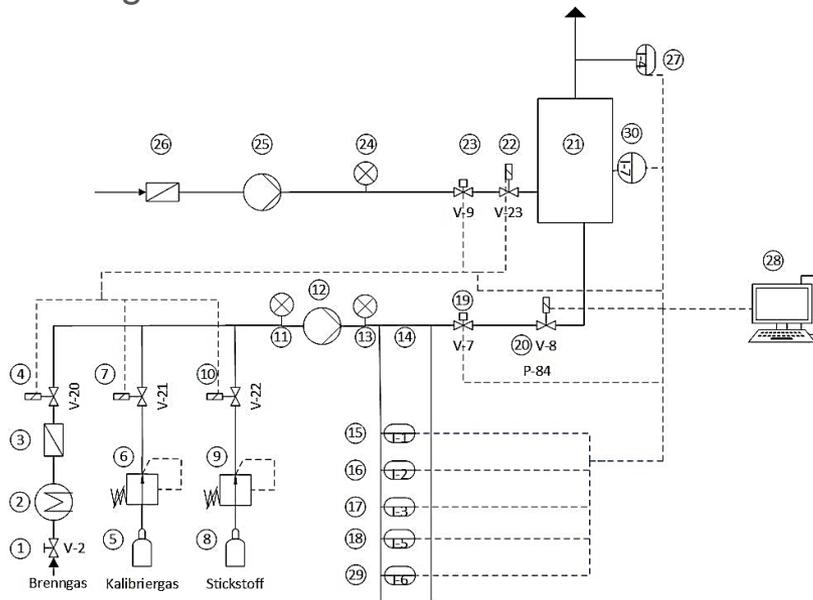
## Integration kostengünstiger Gassensoren in bewährte Heizwertmesstechnik (indirektes Verfahren)

- › Überschlägige Analyse der Gaskomponenten CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>
- › Überstöchiometrische Verbrennung in Referenzbrennkammer und Bestimmung des Residual O<sub>2</sub>
- › Dynamische Bestimmung einer Korrelation mit linearer Regression

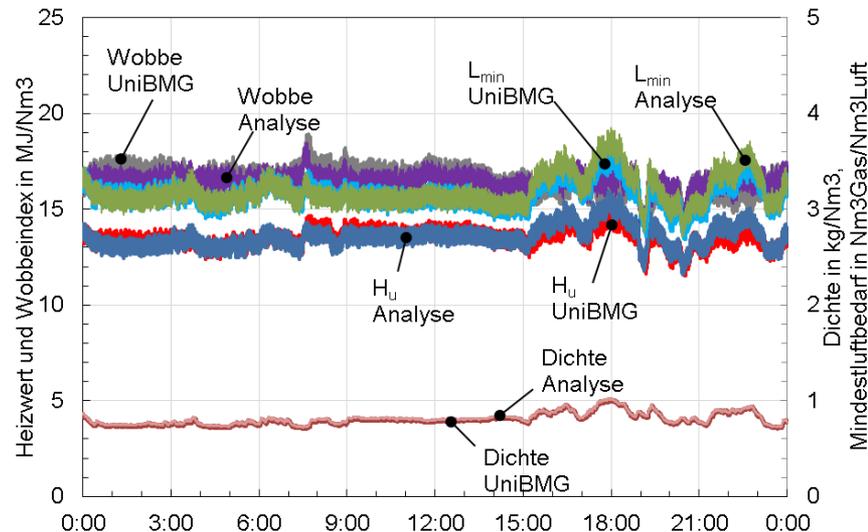
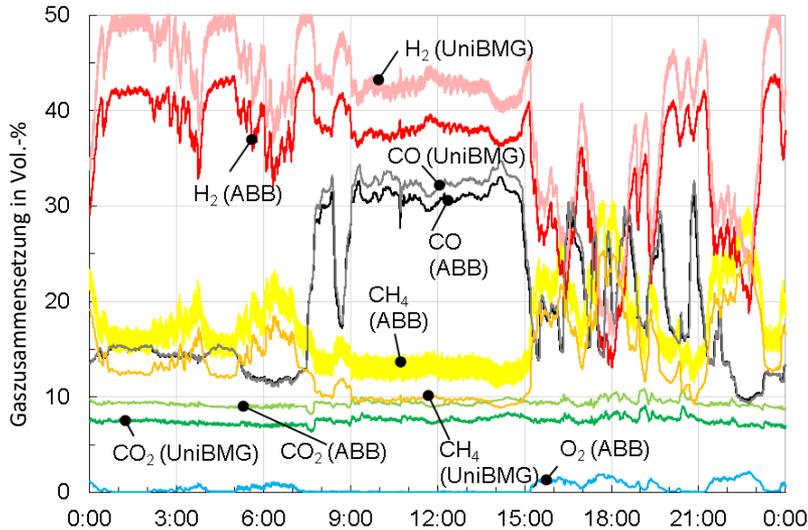
$$\lambda = 1 + \frac{v_{min,f}^*}{L_{min}^*} * \frac{X_{O_2}}{21 - X_{O_2}}$$

$$L_{min} = \frac{\dot{V}_{Luft}}{\dot{V}_{Gas} \cdot \lambda}$$

$$H_u = \frac{L_{min} - L_{min}^*}{K(\xi)} + H_u^*$$



# Ergebnisse aus betrieblichem Einsatz



- › Einsatz an einem Wiedererwärmungs-Ofen mit Mischgas (Koksofengas, Gichtgas Erdgas)
- › Rel. Messfehler der integrierten Gassensoren bis zu 20 % vom Messwert
- › Messfehler gehen linear in Zwischenergebnisse ein, heben sich teilweise genseitig auf
- › Relative Messfehler für Heizwert, Mindestluftbedarf, Wobbe-Index und relative Dichte < 1,5 % vom Messwert (im Vergleich zu kontinuierlicher Gasanalyse)

## › Herausforderung:

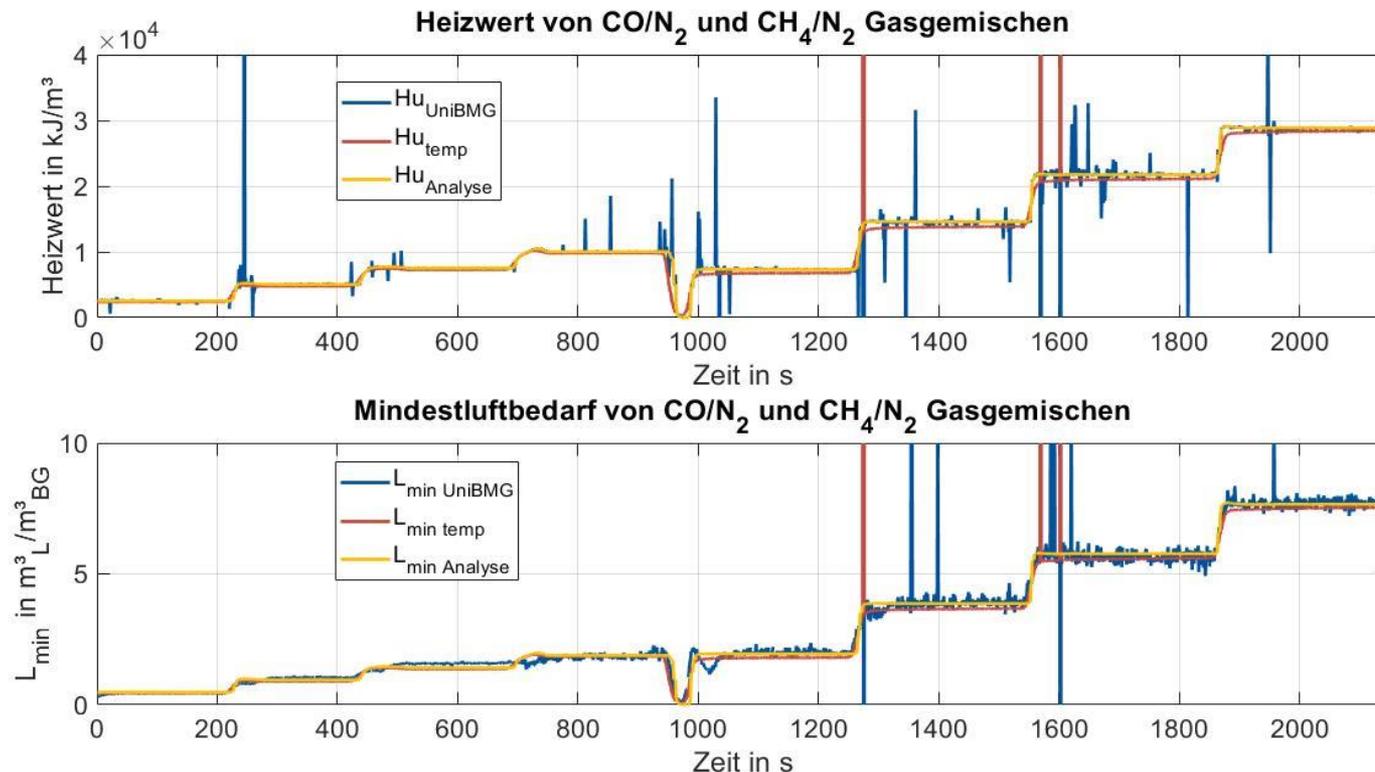
- › Große Bandbreite im Heizwert (2,5 bis 40 MJ/m<sup>3</sup>) und Mindestluftbedarf (1 bis 10 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>) ohne Neukalibrierung
- › Differenzierung zwischen H<sub>2</sub>-Anteil und Querempfindlichkeit zu CH<sub>4</sub>
- › Vermeidung thermischer Überlastung
- › Stabilität der Verbrennung in der Referenzbrennkammer

## › Lösung:

- › Einsatz maschinellen Lernens zur Klassifizierung und Regressionsanalyse
- › Dynamische Anpassung der Messgeräteparameter (Volumenströme, Luftverhältnis)
- › Abschätzung der adiabaten Flammentemperatur und Temperaturüberwachung
- › Training des Systems (maschinelles Lernen) mit synthetischen Gasgemischen und Kalibriergasen

# Ergebnisse für binäre Gemische

- › Mittlere relative Messabweichung für binäre synthetische Gasgemische ca. 0,5 %
- › Mittlere relative Messabweichung für den gesamten Bereich der betrachteten Gase < 2 %



- › Für zukünftige Herausforderungen werden spezialisierte Messsysteme benötigt. Herkömmliche Systeme verlieren an Genauigkeit z. B. bei Wasserstoffbeimischungen oder verursachen erhebliche Kosten
- › Aktuell wird das UniBMG weiterentwickelt zur möglichst genauen Bestimmung von Wasserstoff in Erdgas (Szenario 20 %) neben der Bestimmung der verbrennungstechnischen Eigenschaften
  - › Anwendung von machine-learning unterstützter Regressionsanalyse
  - › Neuartiges Verfahren ohne Gassensoren zur Senkung der Kosten und des Kalibrieraufwands

<b>Brenngaseigenschaften</b>	<b>Wasserstoff</b>	<b>Methan</b>	<b>Erdgas H</b>	<b>Erdgas L</b>
Dichte in kg/m <sup>3</sup>	0,09	0,72	0,78	0,83
Heizwert in MJ/m <sup>3</sup>	10,78	35,84	37,21	31,75
Wobbe-Index in MJ/m <sup>3</sup>	40,89	48,18	47,83	39,66
Zündtemperatur in° C	530	645	640	640
untere Zündgrenze in Vol.-%	4,0	4,4	4,3	5,0
obere Zündgrenze in Vol.-%	77,0	16,5	16,3	16,4
Laminare Flammengeschwindigkeit in cm/s	346	43	43	41

# Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit

**Kontakt: Dipl.-Ing. Sebastian Bialek**

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Stahl-Zentrum · Sohnstraße 65 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 211 6707- 897 · Fax +49 211 6707-202  
E-Mail [sebastian.bialek@bfi.de](mailto:sebastian.bialek@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [sebastian.bialek@bfi.de](mailto:sebastian.bialek@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)  
Telefon +49 211 6707- 897 · Fax +49 211 6707-202  
Stahl-Zentrum · Sohnstraße 65 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Kontakt: Dipl.-Ing. Sebastian Bialek

**Kontakt: Dr.-Ing. Bernhart Stranzinger**

VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Stahl-Zentrum · Sohnstraße 65 · 40237 Düsseldorf  
Telefon +49 211 6707-366 · Fax +49 211 6707-202  
E-Mail [bernhart.stranzinger@bfi.de](mailto:bernhart.stranzinger@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)

E-Mail [bernhart.stranzinger@bfi.de](mailto:bernhart.stranzinger@bfi.de) · [www.bfi.de](http://www.bfi.de)  
Telefon +49 211 6707-366 · Fax +49 211 6707-202  
Stahl-Zentrum · Sohnstraße 65 · 40237 Düsseldorf  
VDEh-Betriebsforschungsinstitut GmbH  
Kontakt: Dr.-Ing. Bernhart Stranzinger