

POWER

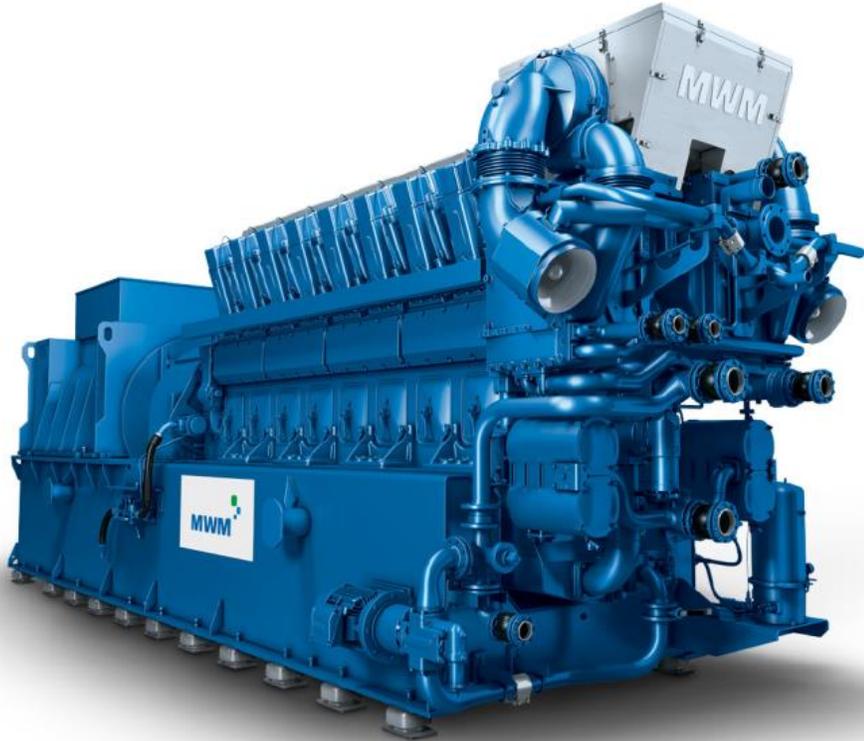
LARGE POWER SYSTEMS DIVISION

Möglichkeiten und Grenzen der Emissionsminderung bei BHKW im Erdgas-, Biogas- und Klärgasbetrieb

Heinrich Baas

Caterpillar Energy Solutions, Mannheim

8. Kolloquium BVT/Stand der Technik, 28.11.2018



An aerial photograph showing a dense industrial and residential area. The industrial zone is characterized by large, flat-roofed buildings, parking lots, and a prominent blue smokestack. The residential area consists of multi-story apartment buildings with red-tiled roofs. The text is overlaid in a large, white, sans-serif font.

Caterpillar Energy Solutions GmbH

Carl-Benz-Str. 1, 68167 Mannheim

Historie

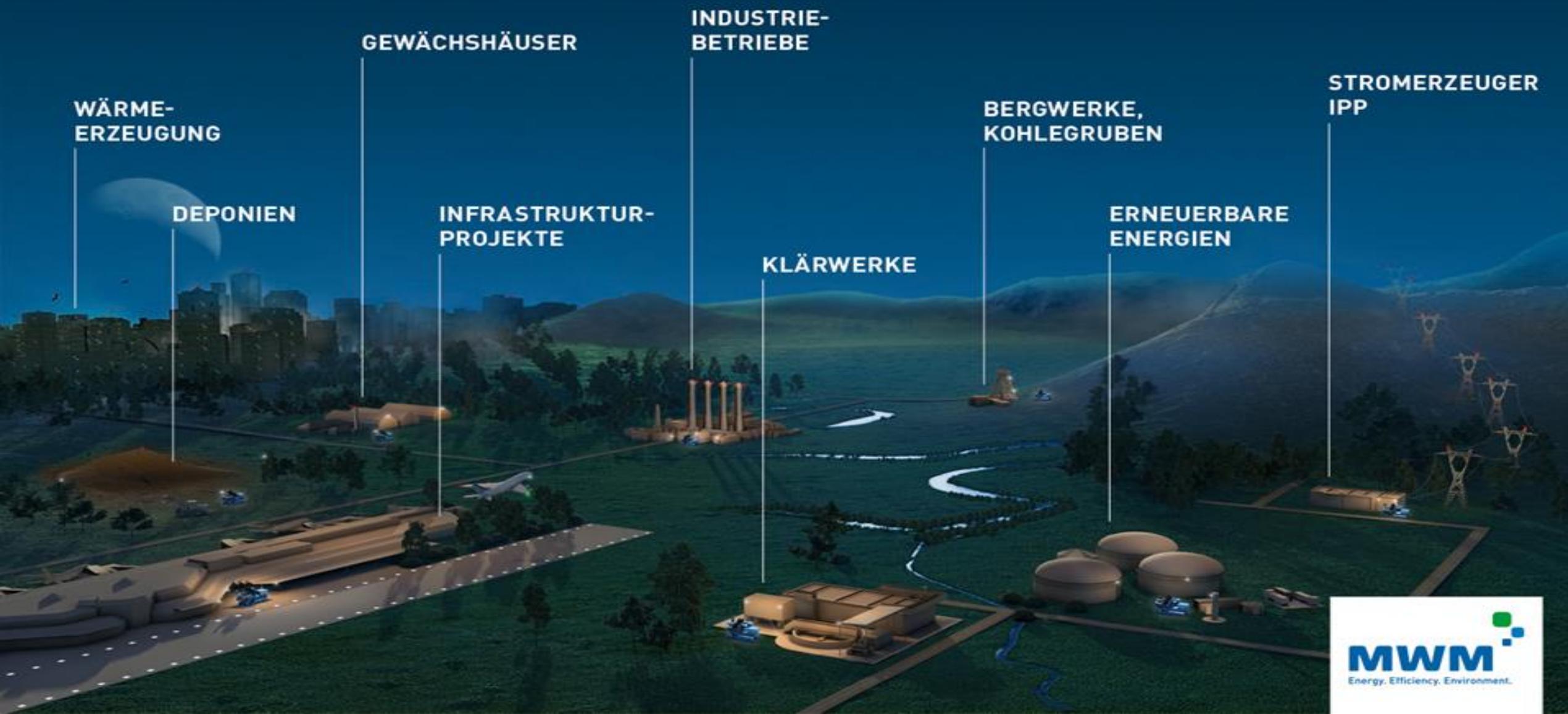
Die Marke MWM kann auf mehr als 140 Jahre Tradition zurückblicken, die stets von Innovationen begleitet wurden.



Carl Benz

- 1871 Auto-Erfinder Carl Benz legte mit der Gründung seiner „Mechanische Werkstätte“ in Mannheim den Grundstock.
- 1880 Produktion des ersten Gas-Motors.
- 1886 Patent-Nr. 37435 wird für den Patent-Motorwagen erteilt.
- 1910 Beginn der Fertigung von Dieselmotoren.
- 1922 Firmenteilung. Es entstanden die „Motorenwerke Mannheim AG, vorm. Benz, Abt. stationärer Motorenbau.“
- 1953 Erste Fertigung luftgekühlter Kleindieselmotoren mit dem patentierten MWM Gleichdruck-Vorkammer-Verfahren.
- 2005 Als Deutz AG gründete sie die eigenständige Tochter Deutz Power Systems
- 2007 Verkauf an den Finanz-Investor 3i.
- 2008 Re-Branding zur MWM GmbH.
- 2011 MWM GmbH wird Teil der Caterpillar Inc.
- 2013 Aus MWM GmbH wird Caterpillar Energy Solutions GmbH.

Marktsegmente



WÄRME-
ERZEUGUNG

DEPONIEREN

GEWÄCHSHÄUSER

INFRASTRUKTUR-
PROJEKTE

INDUSTRIE-
BETRIEBE

KLÄRWERKE

BERGWERKE,
KOHLEGRUBEN

ERNEUERBARE
ENERGIE

STROMERZEUGER
IPP

Maßgeschneiderte Lösungen



Aggregate



Container



Komplettlösungen



Service

Umfassende Serviceleistungen



Kundendienst

Das MWM Serviceportal gewährleistet rund um die Uhr direkten Support und rasche Diagnose.



Xchange

Das Xchange-Teiletauschprogramm ist eine wirtschaftliche Alternative zur Instandhaltung vor Ort.



Instandhaltung und Wartung

MWM begleitet seine Kunden während des gesamten Lebenszyklus der Gasmotoren, Stromaggregate und KWK-Anlagen.

Umfassende Serviceleistungen



Logistik

Wir gewährleisten effiziente, sichere und leistungsstarke weltweite Ersatzteilversorgung durch das Logistik-Zentrum Lorsch in Deutschland.



Trainingscenter

Auf den Kunden zugeschnittene Trainingsmodule vermitteln umfassendes Wissen und praktische Anwendungskompetenz.



Finanzierung

Projektfinanzierungen maximieren die individuelle Flexibilität und den Nutzen für den Kunden.

Produktportfolio



Aggregate

Elektrische Leistung
400 – 4.500 kW_{el} pro Einheit



KWK-Anlagen

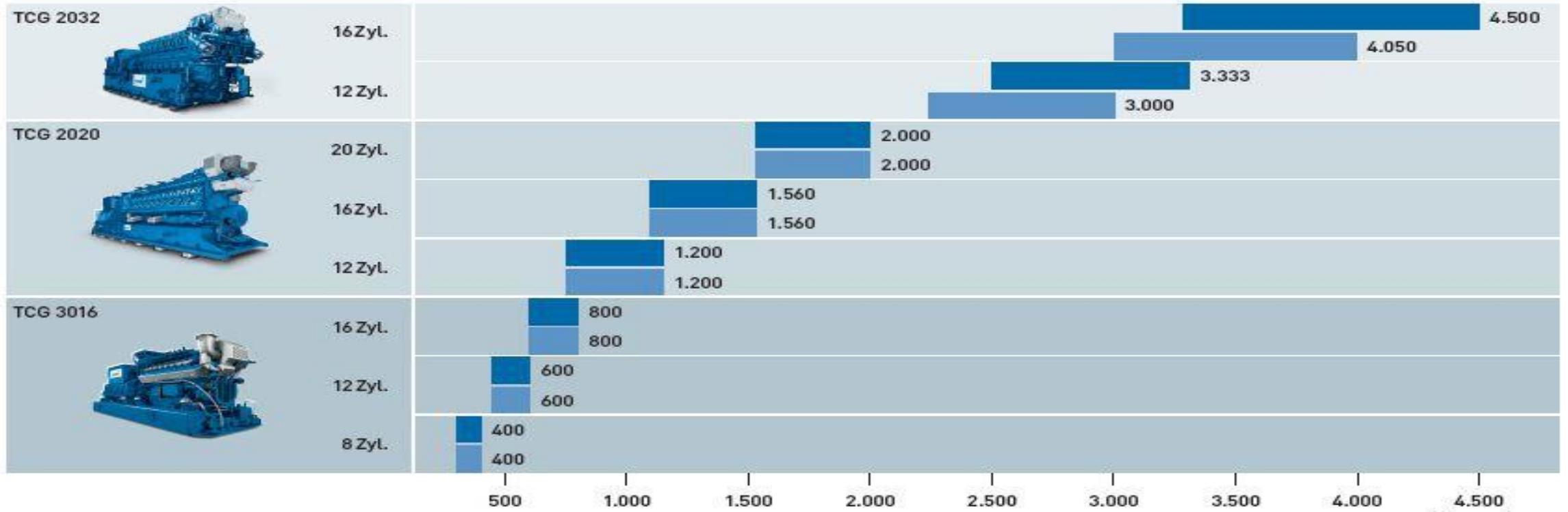
Projektspezifische Auslegung
von Komponenten
Modulare Konzepte



Turn-Key-Lösungen

Beratung, Engineering, Design
Kompletter Aufbau und Übergabe
der Anlage

Produktprogramm



Für die dezentrale Stromerzeugung decken wir mit unseren Aggregaten einen Leistungsbereich zwischen 400 kW_{el} und mehr als 100 MW_{el} ab.

Leistung der Aggregate in kW_e
 50Hz
 60Hz



Agenda

- Neue Schadstoffgrenzwerte für BHKW
- Brenngase zum Antrieb von gasmotorischen BHKW
- Reduzierung der Stickoxide durch SCR-System
- Formaldehyd- und CO-Reduktion mittels Oxidationskatalysator
- Reduktion der Gesamtkohlenstoffe
- Zusammenfassung & Ausblick



Entwurf 44. BImSchV, Stand: 30.08.18, Neuanlagen

Gasförmige Brennstoffe	CO [mg/Nm ³]	NOx [mg/Nm ³]		HCHO [mg/Nm ³]		HC, tot. C [mg/Nm ³]	NH ₃ ¹⁾ [mg/Nm ³]	SOx ²⁾ [mg/Nm ³]	Staub [mg/Nm ³]
Erdgas	250	250	100	30	20	1300	30	(10)	--
Biogas	500	500	100	30	20	1300	30	(100)	5
Klärgas	500	500	500	30	20	1300	30	(100)	5
Grubengas	500	500	500	30	20	1300	30	(35)	10
Deponiegas	650	500	500	60	40 01/25	--	30	(31)	5
Gültig ab	12/18	12/18	Erdgas 01/25 Biogas 01/23	12/18	01/20	01/25 Biogas 01/23	12/18	12/18	12/18

- Anwendbar für Magergasmotoren mit Fremdzündung
- Anwendbar für Motorkraftwerke zwischen 1 und 50 MW_{th}
- Bezugssauerstoff 5%, trockenes Abgas (bei Staub und SOx 3%)

¹⁾ Nur gültig mit SCR-Katalysator

²⁾ Abhängig vom Schwefelgehalt im Brenngas

Agenda

- Neue Schadstoffgrenzwerte für BHKW
- Brenngase zum Antrieb von gasmotorischen BHKW
- Reduzierung der Stickoxide durch SCR-System
- Formaldehyd- und CO-Reduktion mittels Oxidationskatalysator
- Reduktion der Gesamtkohlenstoffe
- Zusammenfassung & Ausblick



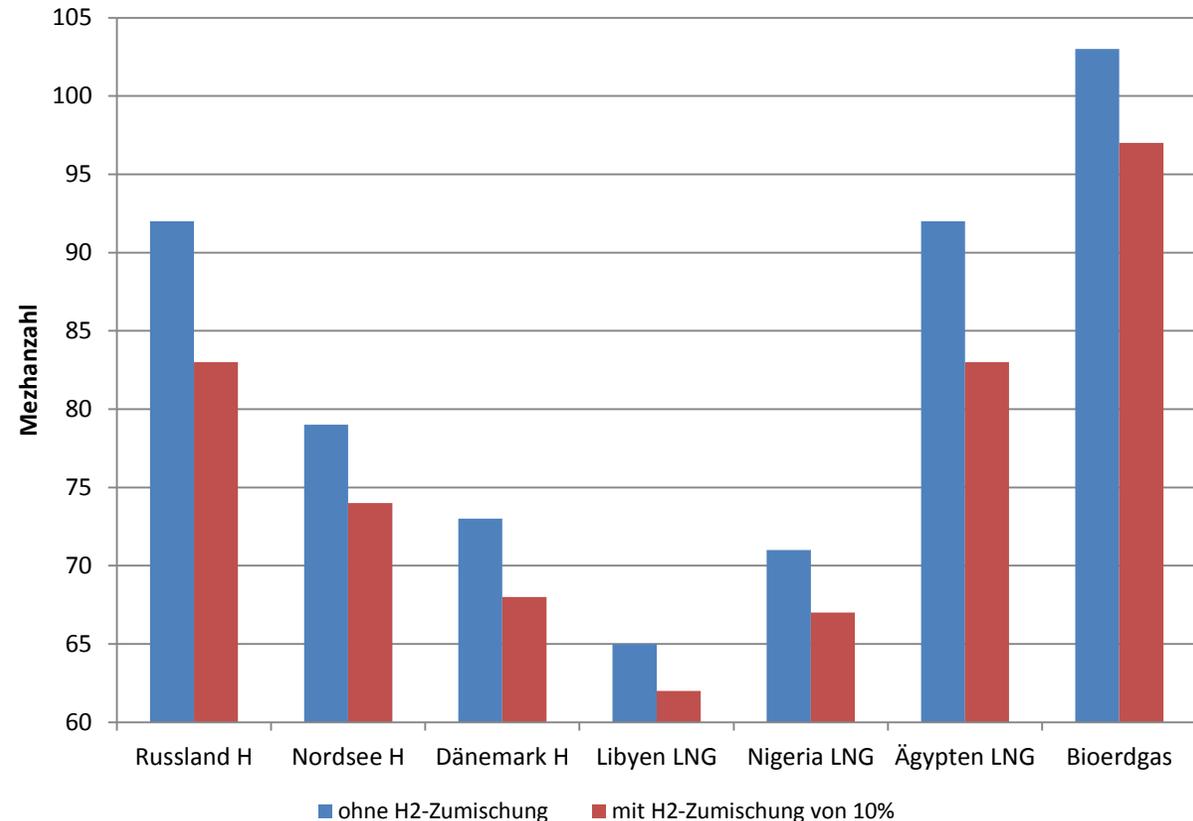
Beschaffenheit verschiedener Erdgase im europäischen Gasnetz

Gaszusammensetzung	Symbol	Einheit	Russland H	Nordsee H	Dänemark H	Libyen LNG (schwer)	Nigeria LNG (mittel)	Agypten LNG (leicht)	Bio-/Erdgas
Methan	CH ₄	Mol%	96,96	88,71	90,07	81,57	91,28	97,7	96,15
Stickstoff	N ₂	Mol%	0,86	0,82	0,28	0,69	0,08	0,08	0,75
Kohlenstoffdioxid	CO ₂	Mol%	0,18	1,94	0,6				2,9
Ethan	C ₂ H ₆	Mol%	1,37	6,93	5,68	13,38	4,62	1,8	
Propan	C ₃ H ₈	Mol%	0,45	1,25	2,19	3,67	2,62	0,22	
n-Butan	n-C ₄ H ₁₀	Mol%	0,15	0,028	0,9	0,69	1,4	0,2	
n-Pentan	n-C ₅ H ₁₂	Mol%	0,02	0,05	0,22				
n-Hexan	n-C ₆ H ₁₄	Mol%	0,01	0,02	0,06				
Wasserstoff	H ₂	Mol%							
Sauerstoff	O ₂	Mol%							0,2
Summe		Mol%	100	100	100	100	100	100	100
Brennwert	Hw	MU/m ³	40,3	41,9	43,7	46,4	44	40,7	38,3
Brennwert	Hw	kWh/m ³	11,2	11,6	12,1	12,9	12,2	11,3	10,6
relative Dichte	d	----	0,574	0,629	0,63	0,669	0,624	0,569	0,587
Wobbe Index	Ws	MU/m ³	53,1	52,9	55	56,7	55,7	53,9	50
Wobbe Index	Ws	kWh/m ³	14,8	14,7	15,3	15,8	15,5	15	13,9
Methanzahl		----	92	79	73	65	71	92	103

Quelle: gaswärme international 2-2012

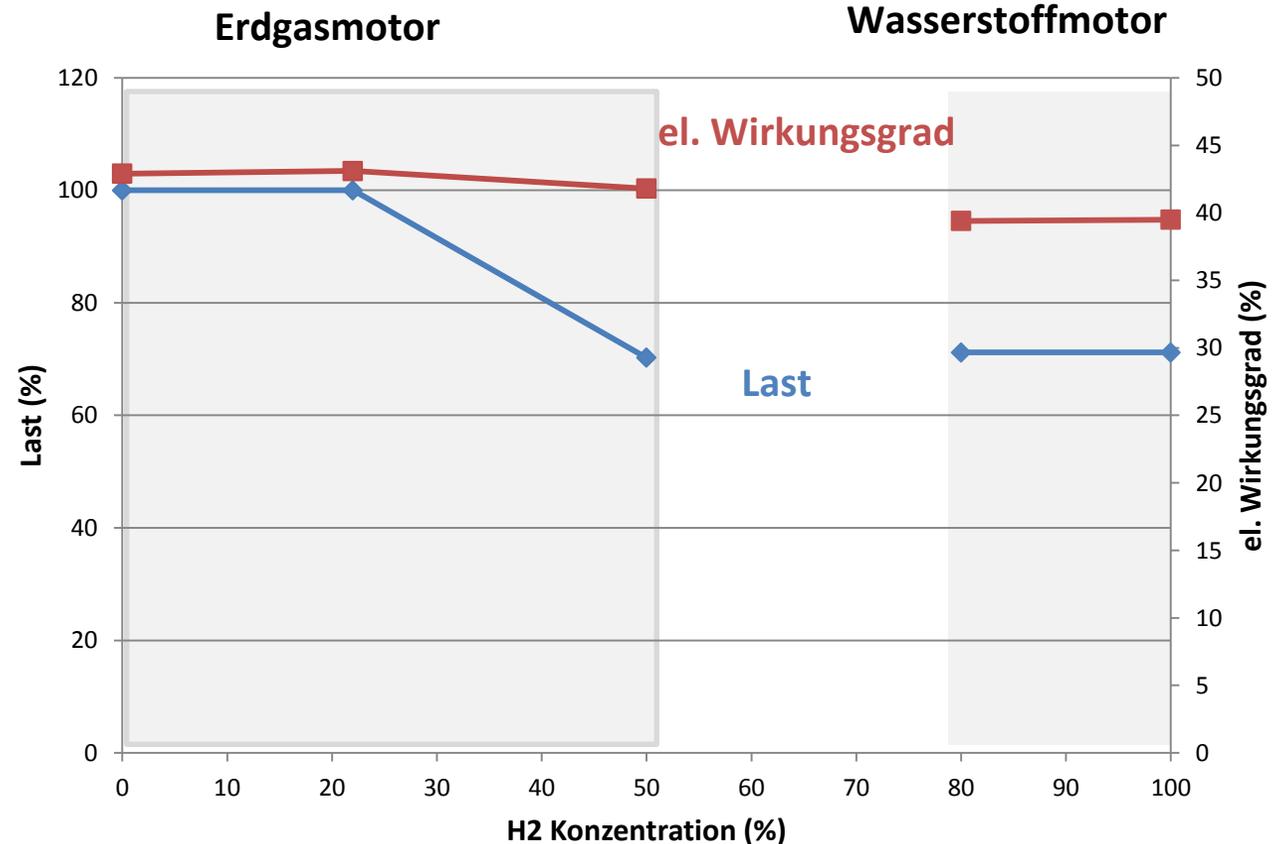
Erdgasqualitäten, Methanzahl verschiedener Erdgase

- Methanzahl ist eine Kennzahl für die Klopfestigkeit des Brenngases
- Mit sinkender Methanzahl verringert sich die Leistung des Motors und der Wirkungsgrad
- Zukünftig sind schwankende Erdgasqualitäten im Netz zu erwarten
- Moderne Gasmotoren besitzen eine Klopfregelung und schützen sich durch Zündzeitpunktverstellung und ggf. durch Leistungsreduzierung vor Schäden



Wasserstoffbeimischung zu Erdgas, Einfluss auf Leistung und Wirkungsgrad

- Versuche mit Wasserstoffbeimischung am Motorprüfstand zeigen, dass der getestete Erdgasmotor bis ca. 20% Wasserstoffanteil die volle Leistung und bei 50% noch 70% Leistung erreicht. Der Wirkungsgrad bleibt annähernd konstant.
- Wird der Motor für den Wasserstoffbetrieb modifiziert, leistet er noch 70% der Erdgasleistung bei etwas abgesenktem Wirkungsgrad



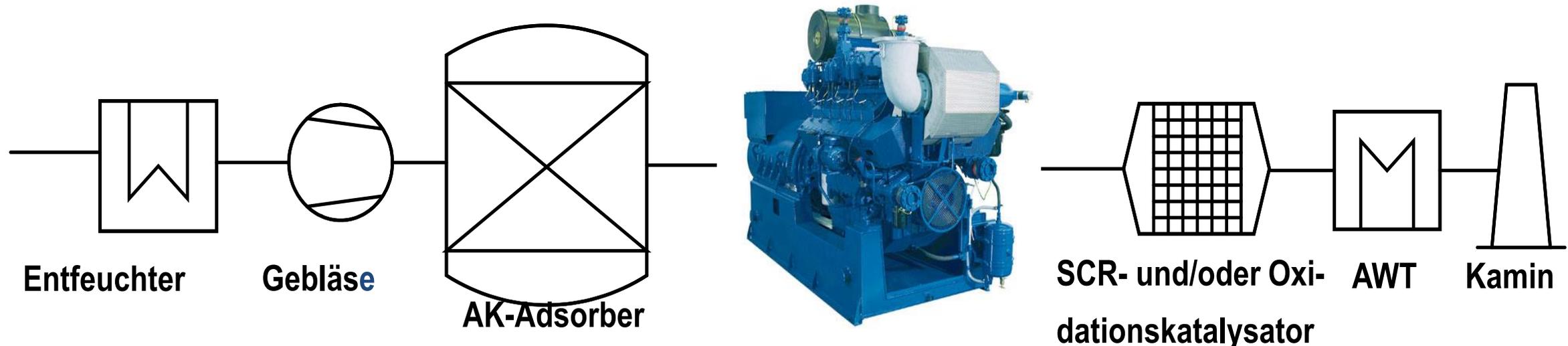
Gaseigenschaften unterschiedlicher Brenngase

	Biogas	Klär gas	Deponie gas	Erd gas
CH₄	50-75 %	65 %	50 %	88 %
CO₂	50-25 %	35 %	27 %	-
N₂	0-5 %	-	23 %	5 %
Dichte	1,2	1,158	1,274	0,798
Hu	5,0 – 7,5	6,5	4,8	10,1
MZ	124-150	134	136	79

Dichte in kg/m³_N; Hu in kWh/m³_N

Brenngasaufbereitung und Abgasnachbehandlung bei Bio- und Klärgasen

- In den verschiedenen Brenngasen sind unterschiedliche Schadstoffe enthalten, die auf ein Minimum reduziert werden müssen um Schäden zu vermeiden und den Einsatz von Abgasnachbehandlungssystemen zu ermöglichen.
- Im Wesentlichen sind dies Schwefelverbindungen und Siloxane
- Die Einhaltung der Emissionsgrenzwerte erfolgt durch Abgasreinigung mit SCR- und/oder **Oxidationskatalysator**; hohe Umsetzraten für Formaldehyd und Kohlenmonoxid werden erzielt.
- -Brenngasaufbereitung mit **Aktivkohle-Entschwefelung**. Nötig bei Einsatz eines Katalysators.
- **Gasentfeuchter**, da Aktivkohle durch Feuchtigkeit an der Oberfläche blockiert wird.
- **Gasgebläse**



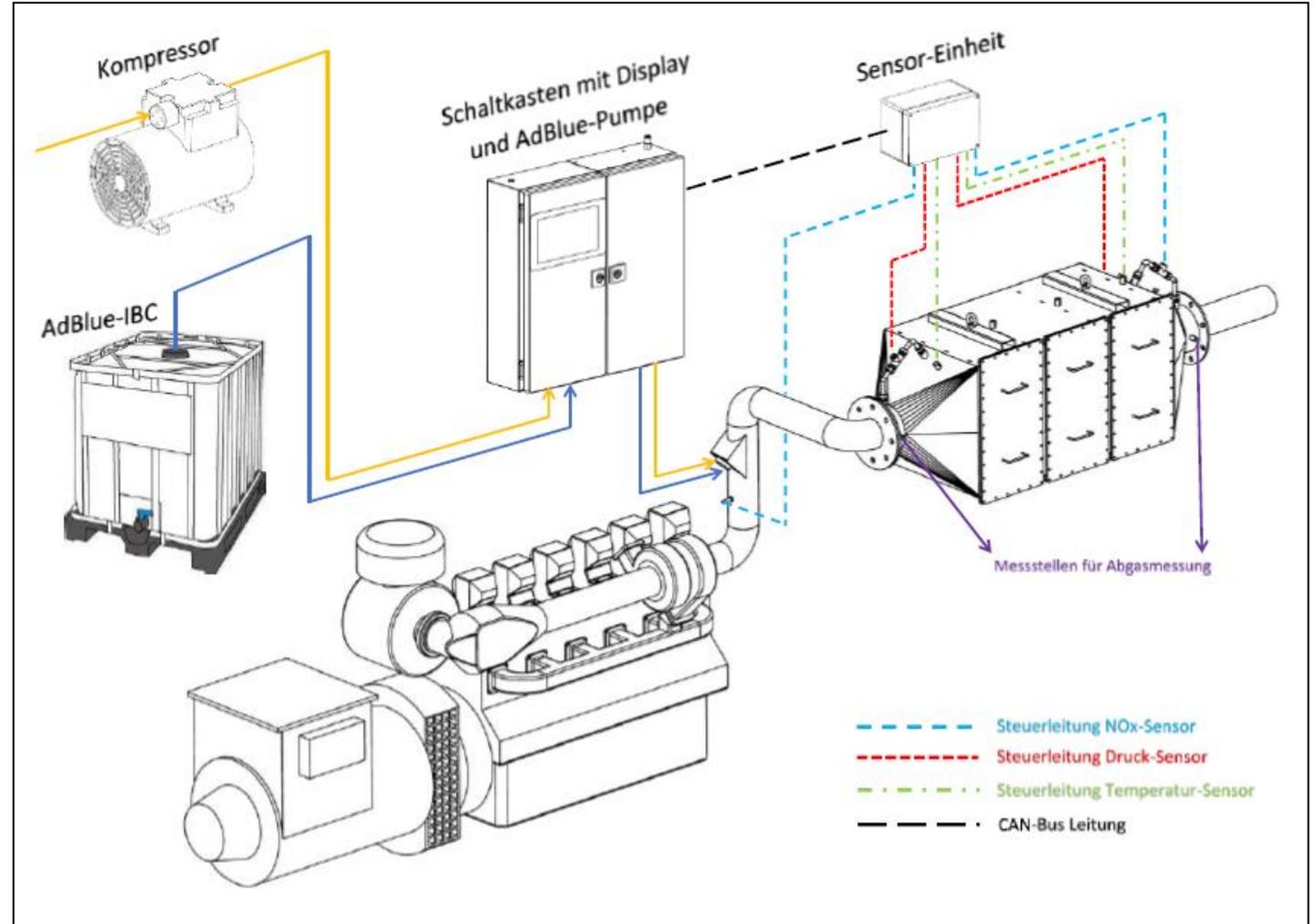
Agenda

- Neue Schadstoffgrenzwerte für BHKW
- Brenngase zum Antrieb von gasmotorischen BHKW
- Reduzierung der Stickoxide durch SCR-System
- Formaldehyd- und CO-Reduktion mittels Oxidationskatalysator
- Reduktion der Gesamtkohlenstoffe
- Zusammenfassung & Ausblick



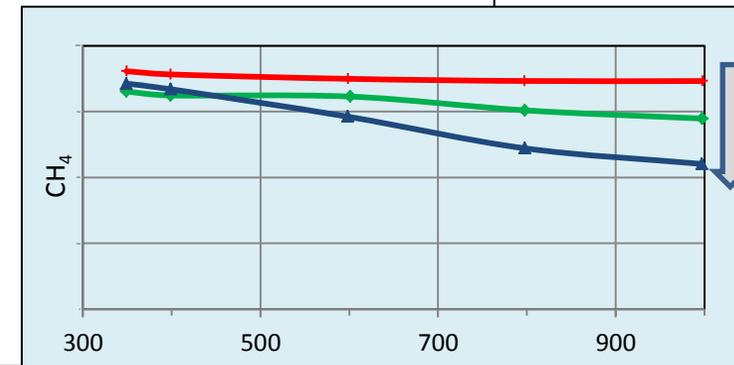
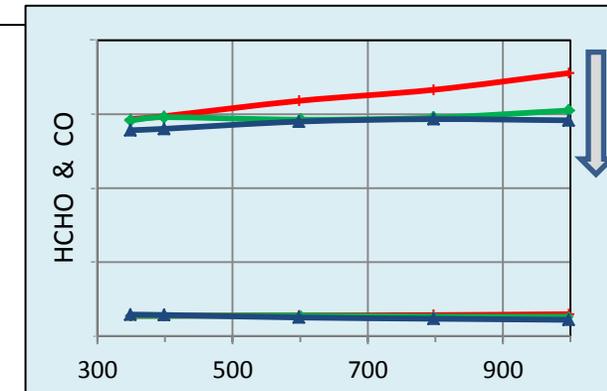
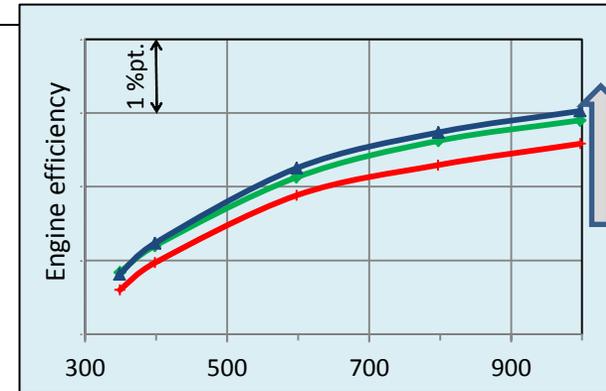
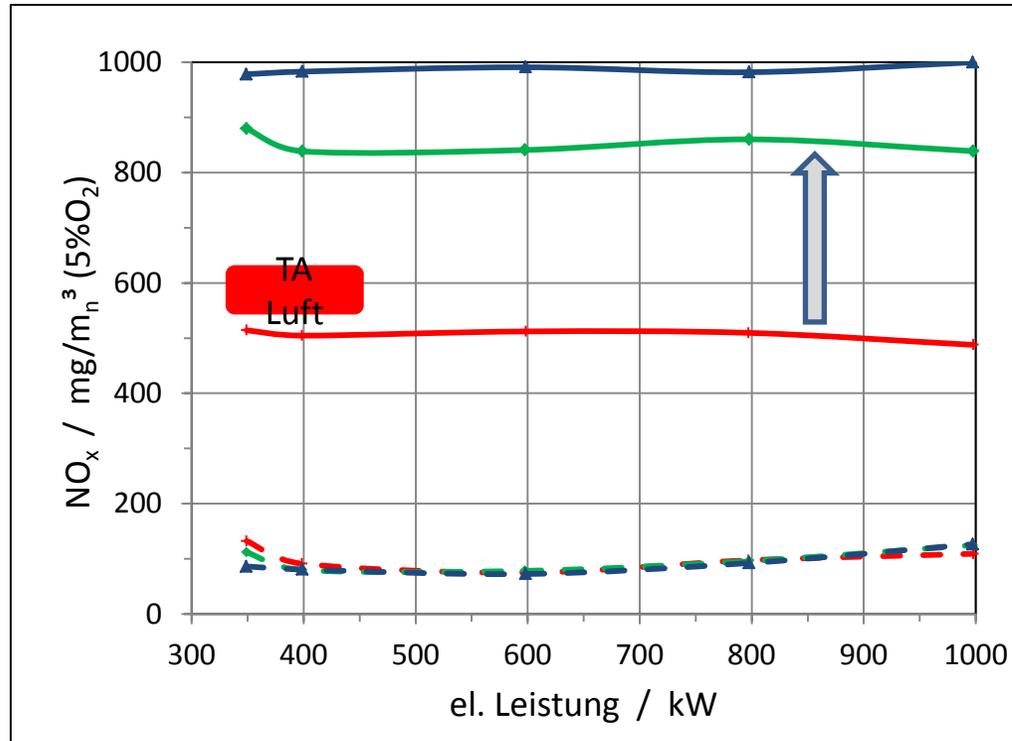
Aufbau eines SCR-Systems

- Katalysator-Gehäuse mit SCR & Oxidationkatalysator-Elemente
- Sensor Einheit (T, p, NO_x)
- AdBlue Dosiersystem (Sauglanze im Tank, Pumpe, Leitungen, Einspritzdüse)
- Schaltkasten mit Steuerung und Anzeige
- Luftkompressor für Dauerbetrieb
- AdBlue Vorratstank
- SCR-Systeme sind einsetzbar bei Erdgas-, Biogas-, Klärgas- und Grubengasbetrieb



Quelle: Emission Partner

Stickoxid-Konvertierung unterschiedlicher NO_x Level im Motorausgang



- Unterschiedliche NO_x- Emissionen im Motorausgang aber konstante Abgas-Emissionen nach Katalysator
- 100 mg/m_n³ NO_x nach Katalysator durch variieren der AdBlue Menge
- Betriebspunkte mit innermotorischen NO_x Emissionen über TA Luft wurden gewählt, zum Ermitteln der Einflüsse auf
→ Wirkungsgrad und CO-, CH₄- & HCHO-Reduktion

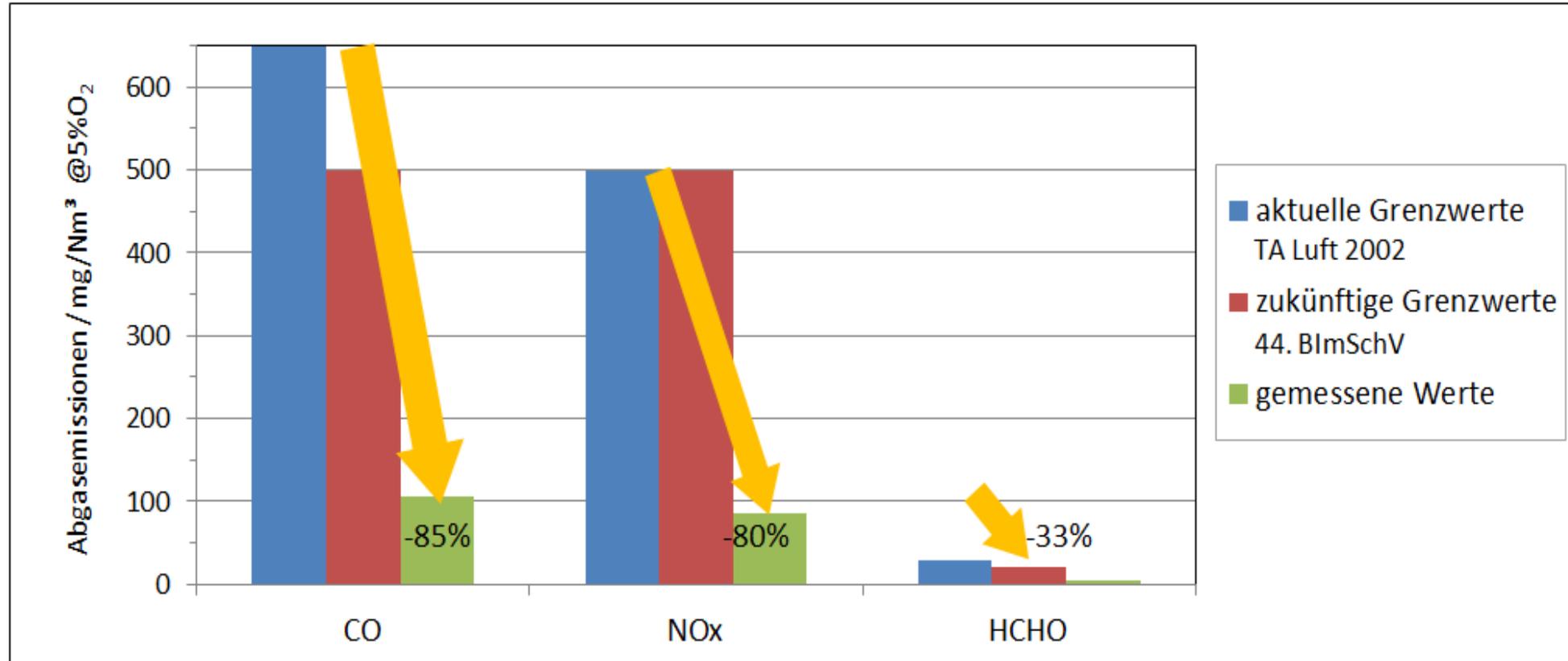
SCR-Versuchsanlage im Klärwerk



SCR-Versuchsanlage im Klärwerk



Grenzwerte und Emissionen einer Klärgasanlage mit SCR-Katalysator



- Gegenüberstellung aktueller und zukünftiger Abgasgrenzwerte mit Messwerten an einer Klärgasanlage
- SCR-Systeme mit Oxidationskatalysator können Schadstoffe zu mehr als 90% konvertieren
- Formaldehyd wird im SCR-Katalysator fast vollständig umgesetzt

Schallemissionen

- Vor dem Aufbau des SCR-Reaktors wurden die Schallemissionen am Kaminaustritt (1m Abstand) und an der Grundstücksgrenze (5m Abstand) in 4m Höhe gemessen (in KW 4)
- Nach dem Umbau wurde die Schallmessung an den gleichen Orten wiederholt (4. April).
- Mit dem SCR-System liegt der Schalldruckpegel innerhalb der Streubreite der ursprünglichen Schallemissionen, die Grundlage der Genehmigung des BHKWs waren.
- Der SCR-Reaktor übt bauartbedingt eine schalldämpfende Wirkung aus und unterstützt den Reflexionsschalldämpfer.

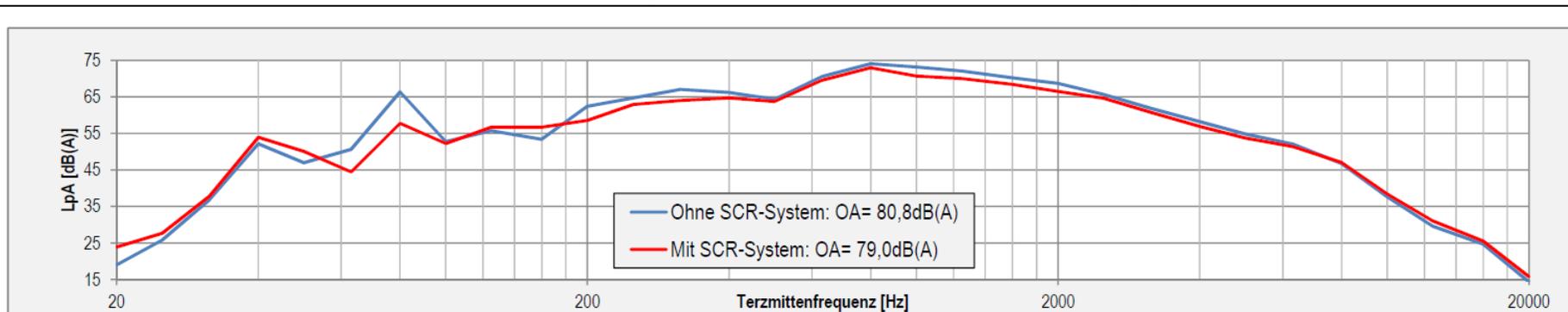


Abb.6: MP1: Schalldruckpegelspektrum und OA bei Nennleistung in 1m Abstand (45°) zur Kaminmündung

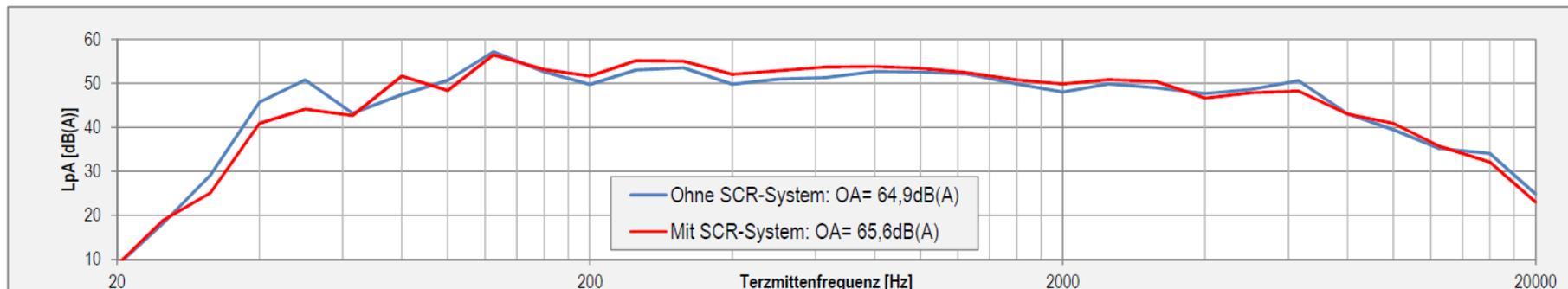


Abb.7: MP2: Schalldruckpegelspektrum und OA bei Nennleistung in 5m Abstand zum Container, in 4m Höhe

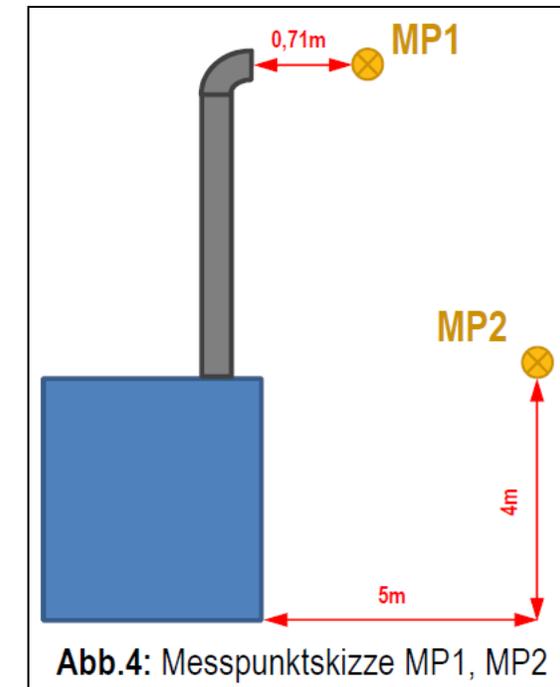


Abb.4: Messpunktskizze MP1, MP2

Vergleich der Betriebskosten aus Brenngas- und AdBlue-Verbrauch zum Erreichen des neuen Stickoxid-Grenzwertes von 250 mg/Nm³:

TCG3016 V16 - 800 kWe			TCG2020 V20 – 2.000 kWe		TCG2032 V16 - 4.500 kWe	
NOx-Rohemissionen / mg/Nm ³	250	800	250	800	250	800
NOx-Reinissionen / mg/Nm ³	250	250 mit SCR	250	250 mit SCR	250	250 mit SCR
AdBlue-Kosten / € p.a.	0	4.013	0	10.032	0	22.572
Brenngaskosten / € p.a.	452.830	438.356	1.126.761	1.088.435	2.471.396	2.416.107
Einsparung Betriebskosten / € p.a.	10.461		28.239		32.716	

Randbedingungen für den Vergleich

- 8000 Betriebsstunden p. a.
- Gaspreis 0,03 €/kWh, AdBlue-Preis 0,19 €/l
- Erwartete Wirkungsgradsteigerung TCG 3016V16 ca. 1,4%pt.; TCG 2020V20 ca. 1,5%pt.; TCG 3032V16 ca. 0,9%pt. bei Erdgas MZ80 gemäß Motor-Datenblatt

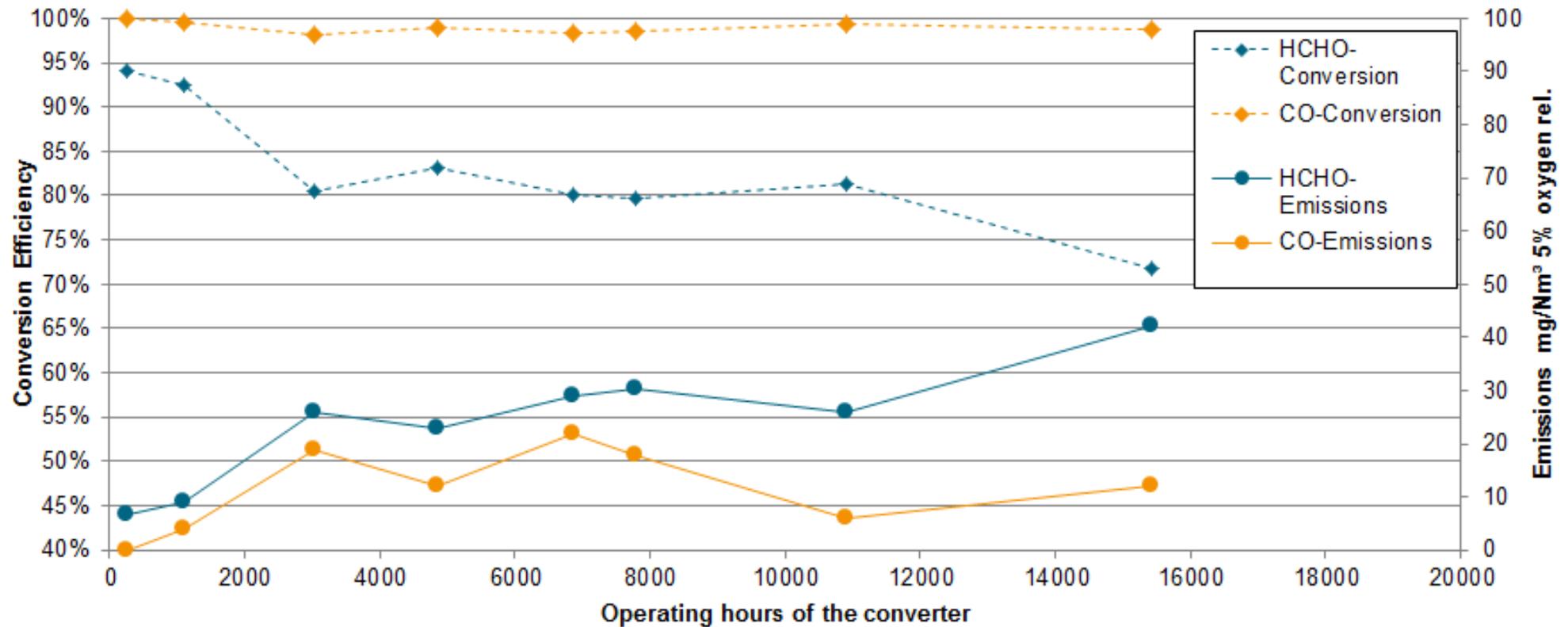
Agenda

- Neue Schadstoffgrenzwerte für BHKW
- Brenngase zum Antrieb von gasmotorischen BHKW
- Reduzierung der Stickoxide durch SCR-System
- Formaldehyd- und CO-Reduktion mittels Oxidationskatalysator
- Reduktion der Gesamtkohlenstoffe
- Zusammenfassung & Ausblick



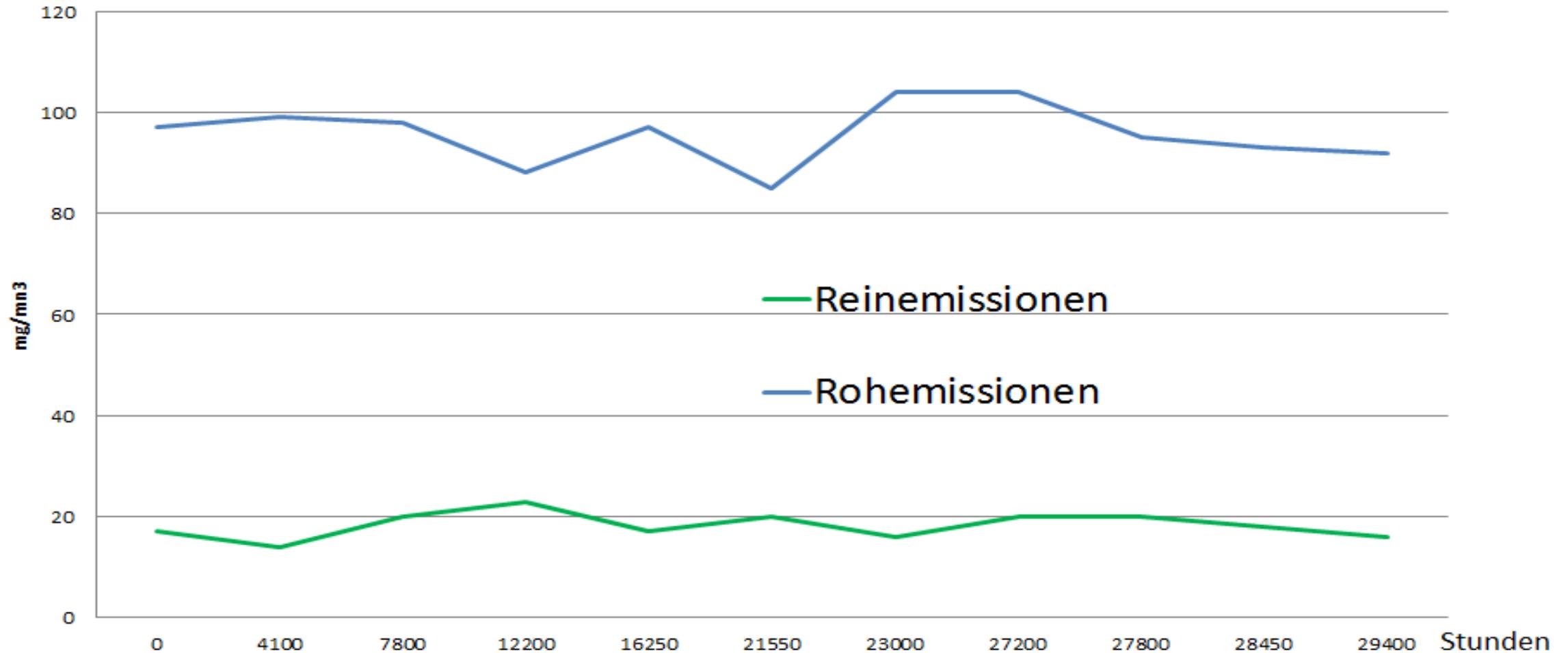
Oxidationskatalysator, CO und HCOH Reduktion

BGA Kitzingen
TCG 2016 V16



Oxidationskatalysator

Formaldehyd, Langzeiterprobung

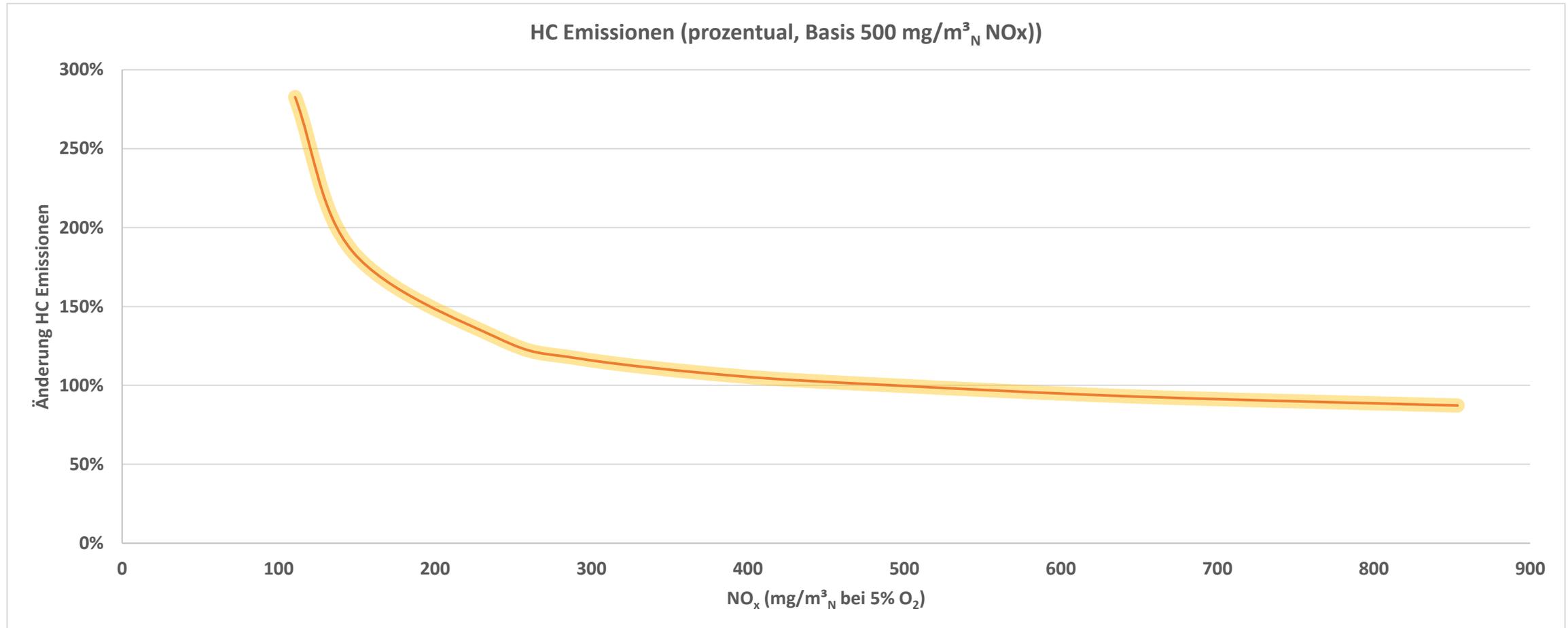


Agenda

- Neue Schadstoffgrenzwerte für BHKW
- Brenngase zum Antrieb von gasmotorischen BHKW
- Reduzierung der Stickoxide durch SCR-System
- Formaldehyd- und CO-Reduktion mittels Oxidationskatalysator
- Reduktion der Gesamtkohlenstoffe
- Zusammenfassung & Ausblick

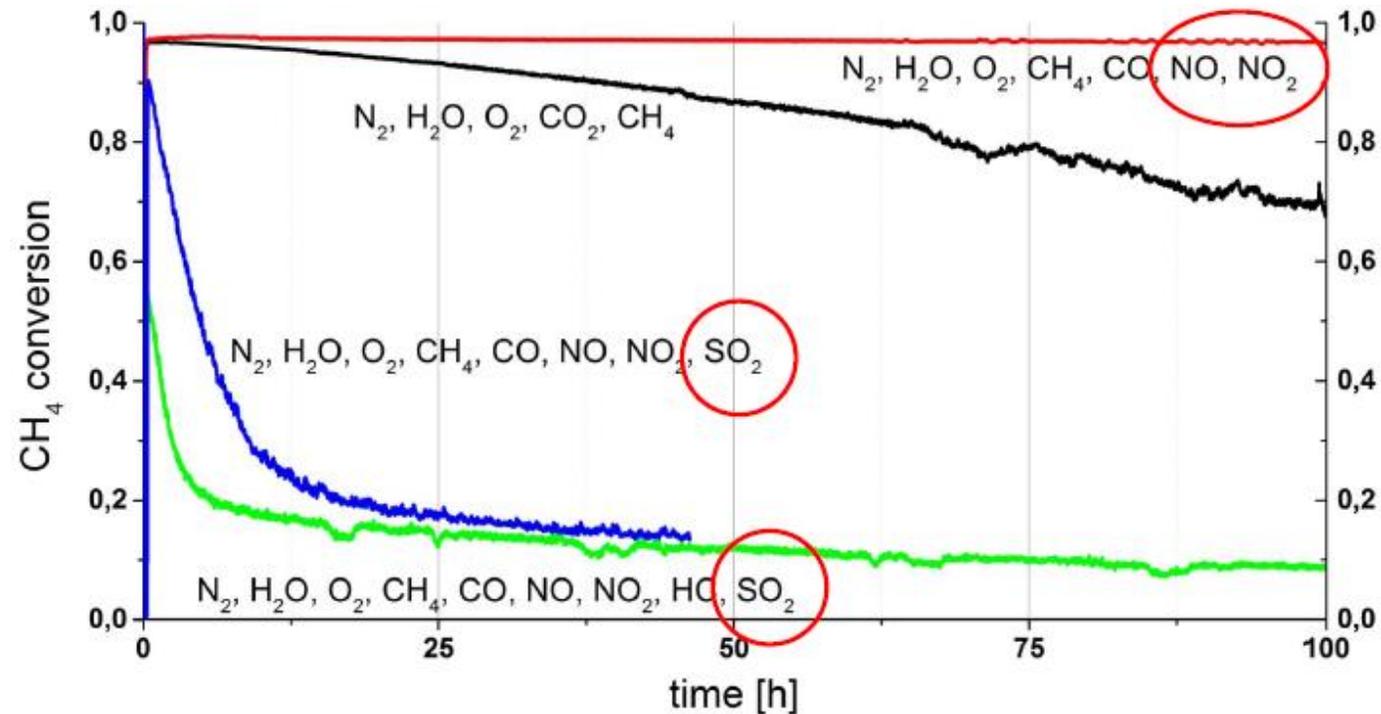


HC Emissionen über NOx



Umsatzraten am Methankatalysator

Activity loss during aging: Summary



- Beneficial effect of **CO/NO/NO₂**
- Strong deactivation in presence of **SO₂**

Quelle: FVV Forschungsvorhaben:

Agenda

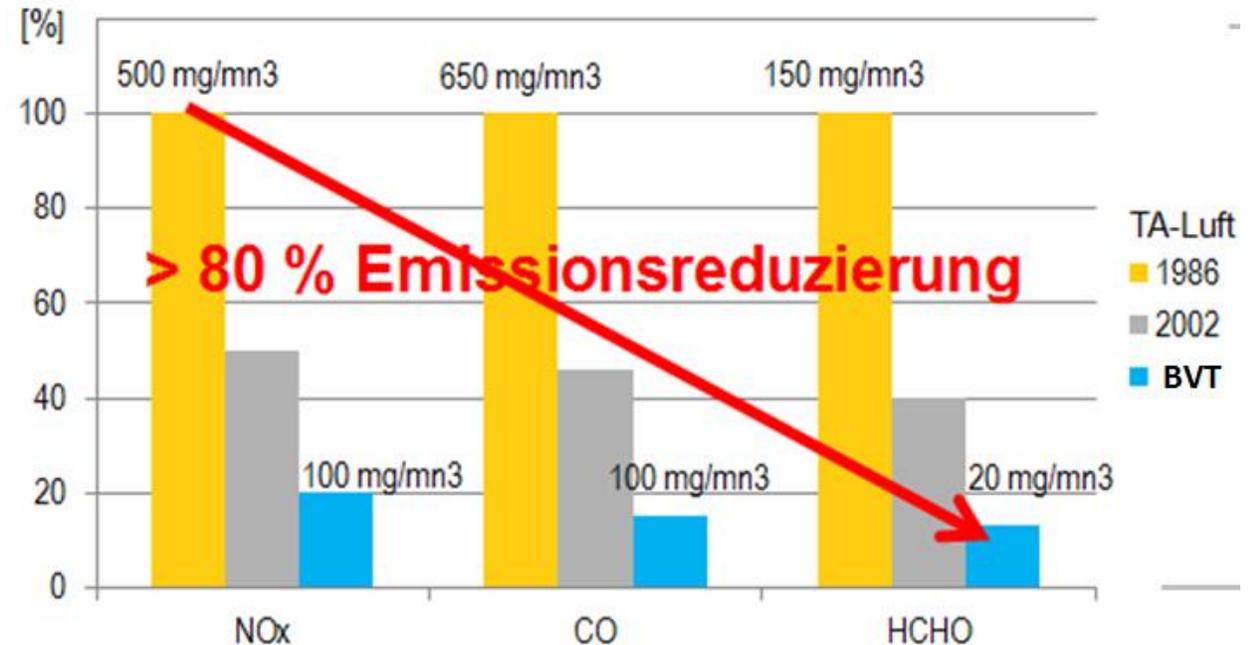
- Neue Schadstoffgrenzwerte für BHKW
- Brenngase zum Antrieb von gasmotorischen BHKW
- Reduzierung der Stickoxide durch SCR-System
- Formaldehyd- und CO-Reduktion durch Oxidationskatalysator
- Reduktion der Gesamtkohlenstoffe
- Zusammenfassung & Ausblick



Zusammenfassung & Ausblick

- BHKW mit Gasmotor-Antrieb sind die effizienteste und umweltverträglichste Art, Strom und Wärme zu erzeugen.
- Die in der 44. BImSchV vorgesehenen verschärften Grenzwerte können eingehalten werden und es besteht durch die laufenden Entwicklungs- und Forschungsarbeiten noch Potential, die Emissionen weiter zu reduzieren.

Entwicklung der Emissions - reduktion von Gasmotoren von 1986 bis heute.



- Caterpillar Energy Solutions GmbH ist gut gewappnet und kann für die Verschärfung der Emissions-Grenzwerte ihre Gasmotoren mit Hilfe von innermotorischen Maßnahmen und mit entsprechenden Abgasnachbehandlungssystemen ausrüsten.

POWER

LARGE POWER SYSTEMS DIVISION

**Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit**

**Heinrich Baas
Caterpillar Energy Solutions
Carl-Benz-Str.1
68167 Mannheim**

**Tel.: 0621 384 8660
Mobil: 0171 7667514**

