

**Zwischenbericht 1998**

Über die Arbeiten gemäss Auftrag: Projekt-Nr.: 19083
Vereinbarungs-Nr.: 58648

Titel des Projektes: Swiss Gas Motor, Teil ETH/LVV
Demonstration eines besonders umweltfreundlichen
Gasmotors für den stationären Einsatz
Zwischenbericht für den Zeitraum 01.07.97 bis 31.03.98

Zusammenfassung:

Innerhalb der Berichterstattungsperiode wurde der LIEBHERR Motor sowohl in der atmosphärischen Version, wie auch aufgeladen in Betrieb genommen und die erste Optimierungsphase abgeschlossen. Der nachfolgende Anhang gibt ausführlich Auskunft über die erzielten Ergebnisse unter Berücksichtigung der anvisierten ziele betreffend Motorleistung, - Wirkungsgrad und Schadstoffemissionen (insbesondere NO_x und CO). Hier fassen wir die wesentlichen Erkenntnisse zusammen.

Sowohl der Betrieb mit AGR und $\lambda = 1$, als auch derjenige mit AGR und $\lambda > 1$ erwiesen sich als vielversprechende Konzepte für die Motorgesamtoptimierung. Im Gegensatz zum reinen Magerbetrieb ist es mit beiden erwähnten Prozessführungen möglich den CO-Grenzwert von 650mg/m³ zu unterschreiten (AGR und $\lambda = 1$) bzw. knapp einzuhalten (AGR und $\lambda > 1$). Mit AGR und $\lambda = 1$ kann der NO_x-Grenzwert von 250mg/m³ ebenfalls unterschritten werden, allerdings bei einem weniger guten Wirkungsgrad (~ 33%), wohingegen mit der Kombination von AGR und $\lambda > 1$ der Wirkungsgrad steigt (~37%) und die NO_x-Werte gerade noch eingehalten werden. Beeindruckend ist, dass die Motorleistungsziele von 150kW (routinemässig) und 180 kW (im Probelauf) auf Anhieb erreicht werden konnten.

Anzumerken ist noch, dass diese Ergebnisse mit einer vorläufigen, noch bei weitem nicht optimierten Gesamtsystemkonfiguration erreicht wurden und sie somit als besonders ermutigend zu bezeichnen sind. Verbesserungspotential besteht noch im Zündsystem in der ATL-Auswahl. Im thermischen Management des Auslasssystems usw.. Schliesslich sind als weitere sinnvolle Schritte auch die ursprünglich anvisierte Veränderung der Nockenwelle, eine weitere Optimierung der Kolbenform – wenn möglich – die Verwendung von getakteten Gaseindüsungsventilen noch bis zum Projektende zu erwähnen.

Dauer des Projektes: 01.10.96 bis 31.03.98 (verlängert)

**Beitragsempfänger: Labor für Verbrennungsmotoren und Verbrennungstechnik
der ETH Zürich**

Berichterstatter: Dr. K. Boulouchos

Adresse: ETH Zentrum, 8092 Zürich

Telephon: 01/ 632 56 48

PROJEKT: LIEBHERR – GASMOTOR

Sitzung vom 30.03.98

ETH Zürich - IET / LVV

Ch. Nellen und K. Boulouchos

UEBERSICHT

⇒ Vergleichende Untersuchung der Betriebskonzepte

- Randbedingungen
- Erzielte Ergebnisse
 - atmosphärisch
 - aufgeladen
- Nächste Schritte/Planung
- Mittelfristige Optimierung

Allgemeine Bedingungen

- **Druck und Temperatur**
Luft vor Gasnischer atmosphärisch: Temp. $23.7 \pm 0.4 \text{ }^{\circ}\text{C}$; Druck $977 \pm 4 \text{ mbar}$
aufgeladen: Temp. $23.7 \pm 0.5 \text{ }^{\circ}\text{C}$; Druck $975 \pm 4 \text{ mbar}$
Kühlwassertemperatur Eintritt $81 \pm 1.9 \text{ }^{\circ}\text{C}$
Abgasgegendruck 70 mbar
- **Betriebszustand**
Last, Drehzahl 100 %, 1500 /Min

- Erdgas

- direkt vom Netz

- Relativdruck: 55 mbar

- Gaszusammensetzung in Vol% (Mittelwerte)

Komponente	Methan	Ethan	Propan	CO ₂	N ₂	Rest
atmosphärisch, Feb. 98:	90.6	3.4	0.9	0.9	2.6	1.3
aufgeladen, März 98:	91.3	3.1	0.9	0.9	2.2	1.2
Extremwert	93.6	3.1	0.9	1.4	0.7	0.3

Heizwerte H_u 46.37 und 46.77 MJ/kg

Motorkonfiguration

- 6 LVV/ETHZ-Kolben
- neue Zylinderbüchsen mit reduziertem Spaltvolumen
- neuer Abgaskühler
- Auspuffkollektor nicht isoliert, nicht gezielt gekühlt
- Zündkerzen: Bosch Typ F 5DC, 0.8mm Elektrodenabstand

Atmosphärisch

- Gemischtemperatur im Einlass-Receiver: 30 bis 40 °C (abhängig von der Rezirkulation)
- Temperatur des gekühlten Abgases: 62 resp. 112 °C (abhängig von der Rezirkulation)

Aufladung

- Abgasturbolader
 - Lieferant: Kühnle, Kopp & Kausch (KKK)
 - Typ: K27
 - Verdichter: 3266 MNB
 - Turbine: 11.12 (Halsquerschnitt des Turbinengehäuses 11 cm²)
- Ladeluftkühlung
 - Gemischtemperatur im Einlass-Receiver (ausser spezielle Versuche): 50 °C
- Abgaskühlung
 - Temperatur des gekühlten Abgas (dito): 120 °C

Randbedingungen und Messgrößen

- **Messgrößen (u.a.)**

Effektiver Mitteldruck p_{me} und Wirkungsgrad η_e

Emissionen THC, CO, NO_x : zylinderselektiv und total

Druckverlauf $p(\varphi)$ Zylinder 4 und 6

Druckverlauf $p_E(\varphi)$ im Einlass-Receiver

- **Parametervariation**

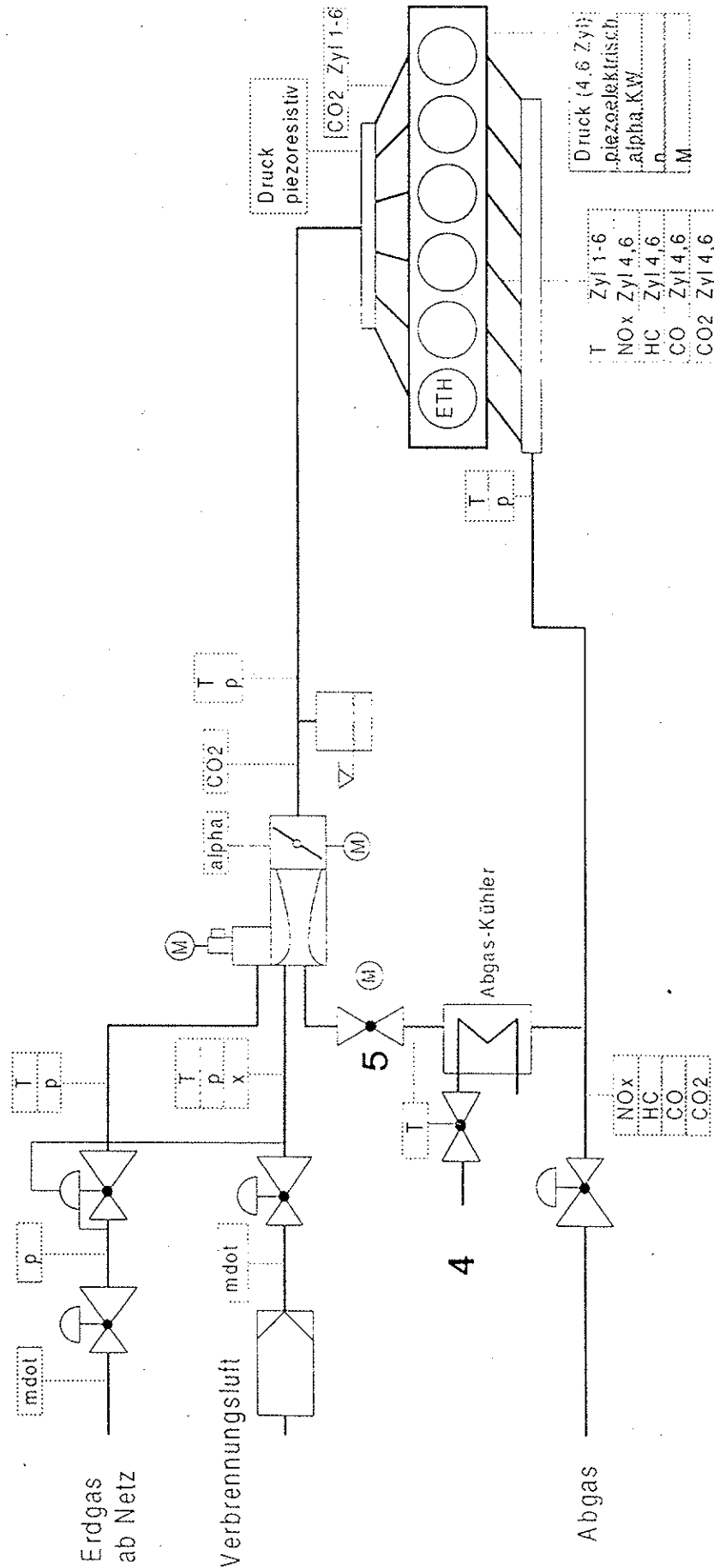
Luftverhältnis λ und Abgas-Rückführrate x_{AGR}

Zündzeitpunkt

Abgas-Kühlung bei AGR

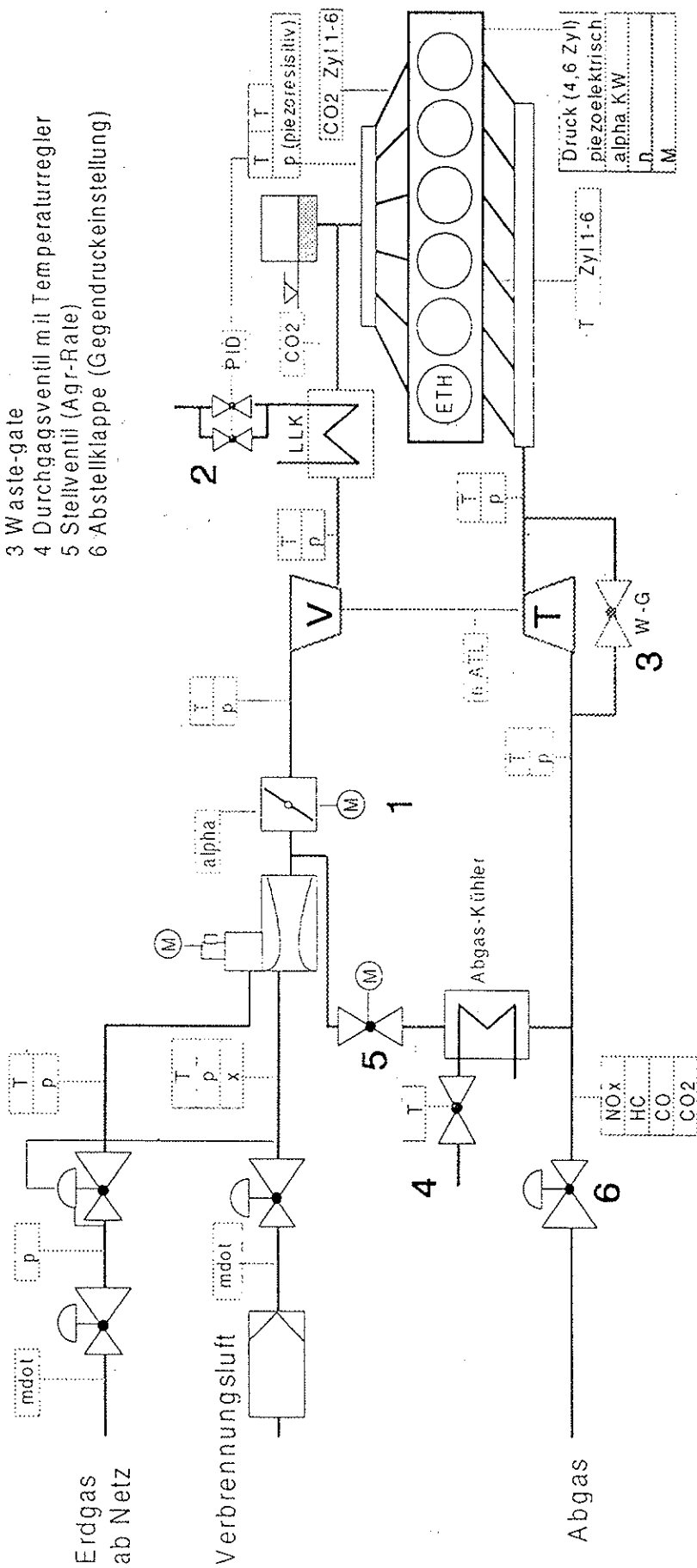
Prüfstandsaufbau und Messstellen

Atmosphärisch



Aufgeladen

- 1 Drosselklappe
- 2 Durchgangsventile mit Digital-temperaturregler
- 3 Waste-gate
- 4 Durchgangsventil mit Temperaturregler
- 5 Stellventil (Agr-Rate)
- 6 Abstellklappe (Gegendruckeinstellung)



Atmosphärisch

Abgasrückführung

Parametervariation und Einstellungen

Zündzeitpunkt	14.4 bis 40 °KW vor OT
AGR-Massenanteil	5 bis 23 %
Abgas-Kühlung	variabel (T Rez)
Messung Druckverlauf	Zylinder 4 und 6
Messung Emissionen	Zylinder 4, 6 und total

Resultate

- Ergebnisse im Magerbetrieb
- Ergebnisse vom AGR-Konzept
- Ergebnisse mit dem neuen Konzept (AGR und Mager)

Aufgeladen

Abgasrückführung

Parametervariation und Einstellungen

Zündzeitpunkt	14.4 bis 40 °KW vor OT
AGR-Massenanteil	15 bis 25.6 %
Abgas-Kühlung	120 °C (T Rez)
Messung Druckverlauf	Zylinder 6
Messung Emissionen	gesamt, 2.2m nach dem Zylinderkopfaustritt

Resultate

- Ergebnisse im Magerbetrieb
- Ergebnisse vom AGR-Konzept
- Ergebnisse mit dem neuen Konzept (AGR und Mager)

Atmosphärisch, Konzept 1

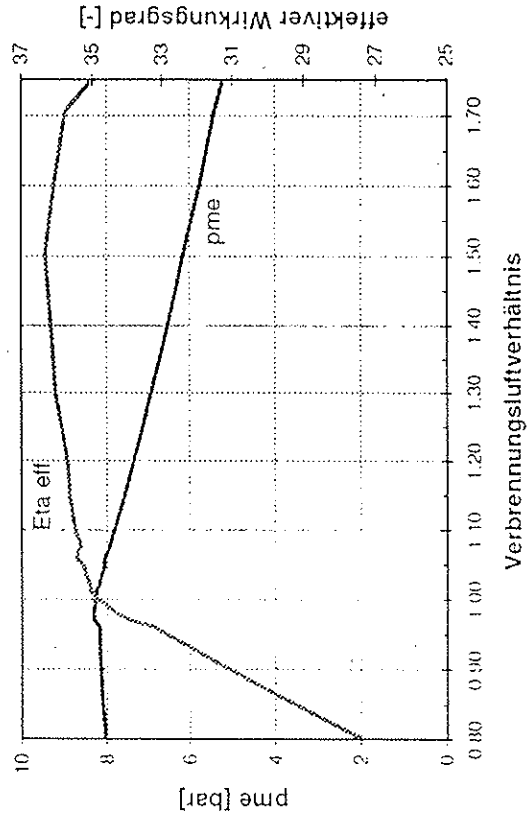
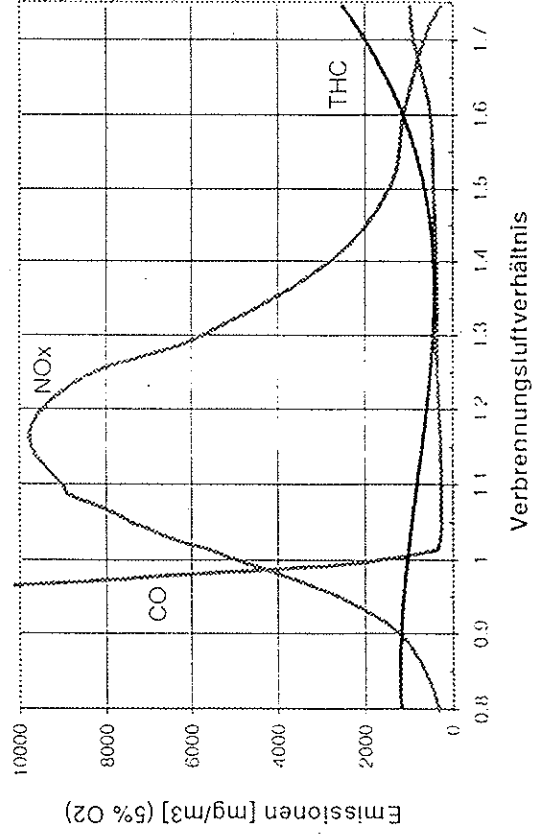
Abgasemissionen NO_x, CO, THC

p_{me} und effektiver Wirkungsgrad

Ohne AGR

Variation vom Lambda

Sammelrohr 2.2m



Atmosphärisch, Konzept 2

Abgasemissionen NOx, CO, THC

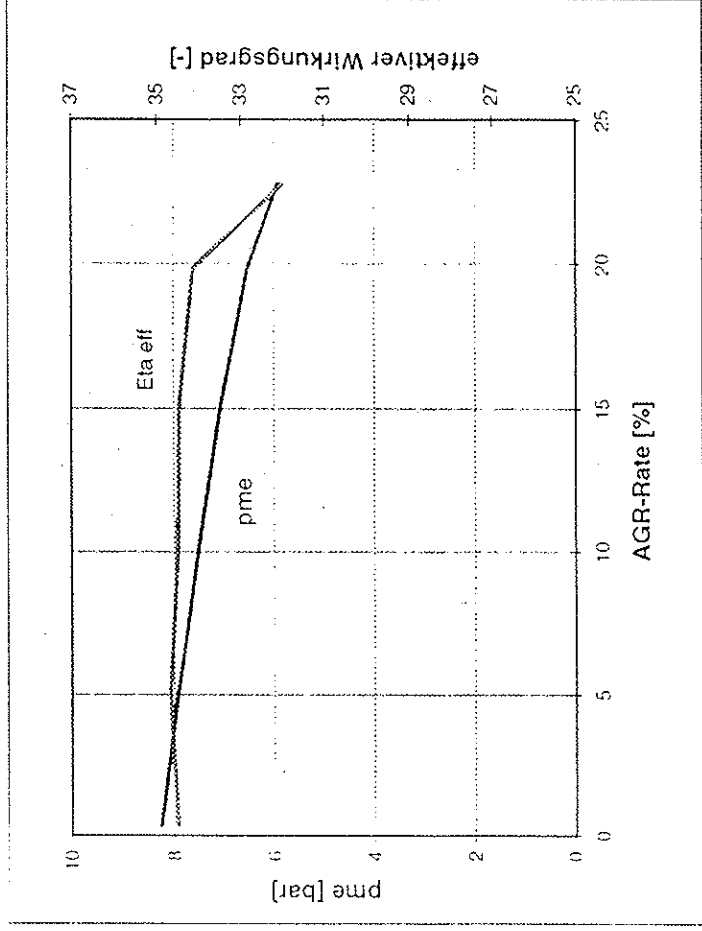
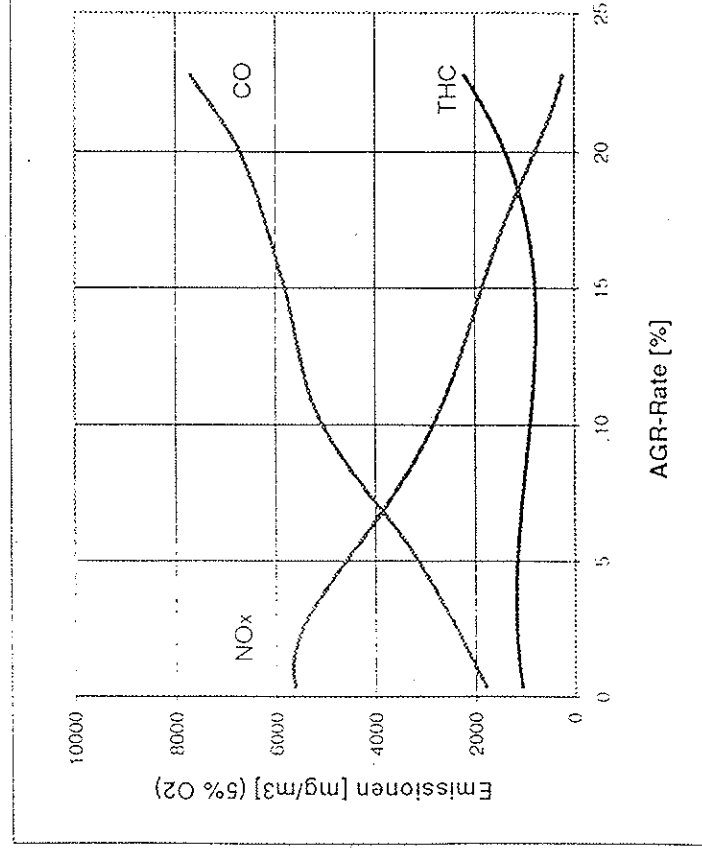
pme und effektiver Wirkungsgrad

Mit AGR

Variation von AGR

Lambda = 1

Sammelrohr 6.2m



Atmosphärisch, Konzept 3

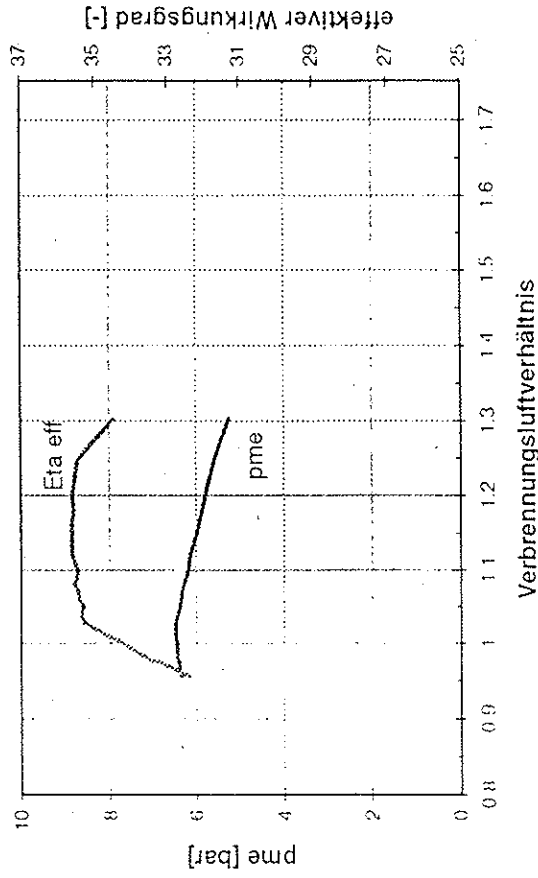
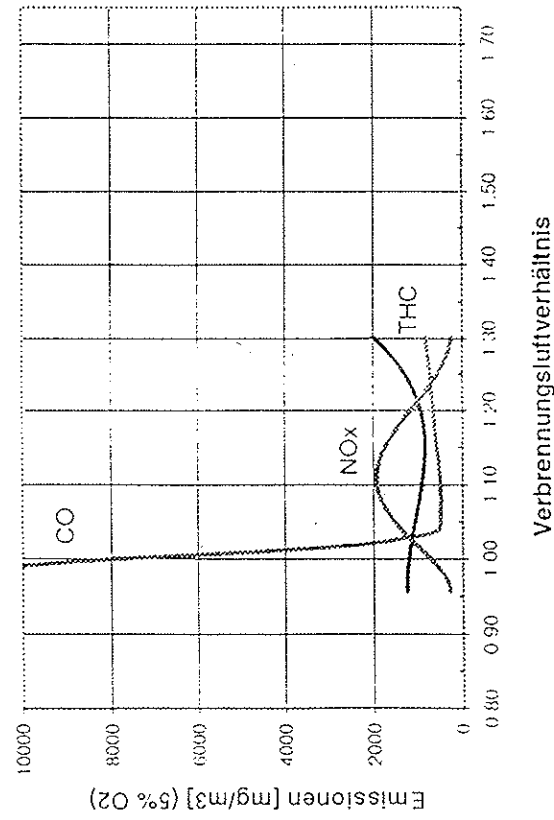
Abgasemissionen NOx, CO, THC

AGR = 20%

Variation von Lambda

Sammelrohr 2.2m

pme und effektiver Wirkungsgrad



Magerbetrieb

Vergleich der Abgasemissionen ETHZ - EPFL

	pme [bar]	Lambda [-]	Zündzeitpunkt [°KW v OT]	NOx [mg/m ³ , 5% O ₂]	CO	THC	η_e [%]
ETHZ	9.9	1.70	36.8	769	841	1222	39.3
	9.9	1.70	33.6	600	850	1297	39.2
EPFL	9.9	1.73	30.0	550	850	1250	38.9

Halsquerschnitt des Turbinengehäuses: 11 cm²

Auslasskollektor

ETHZ: nicht isoliert, nicht gezielt gekühlt

EPFL: isoliert

Aufgeladen, Konzept 1

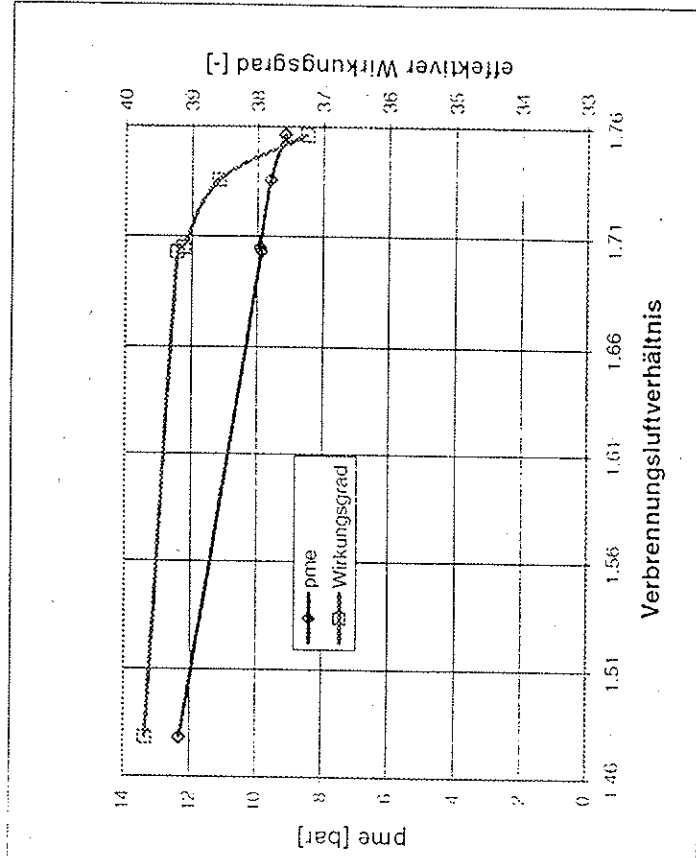
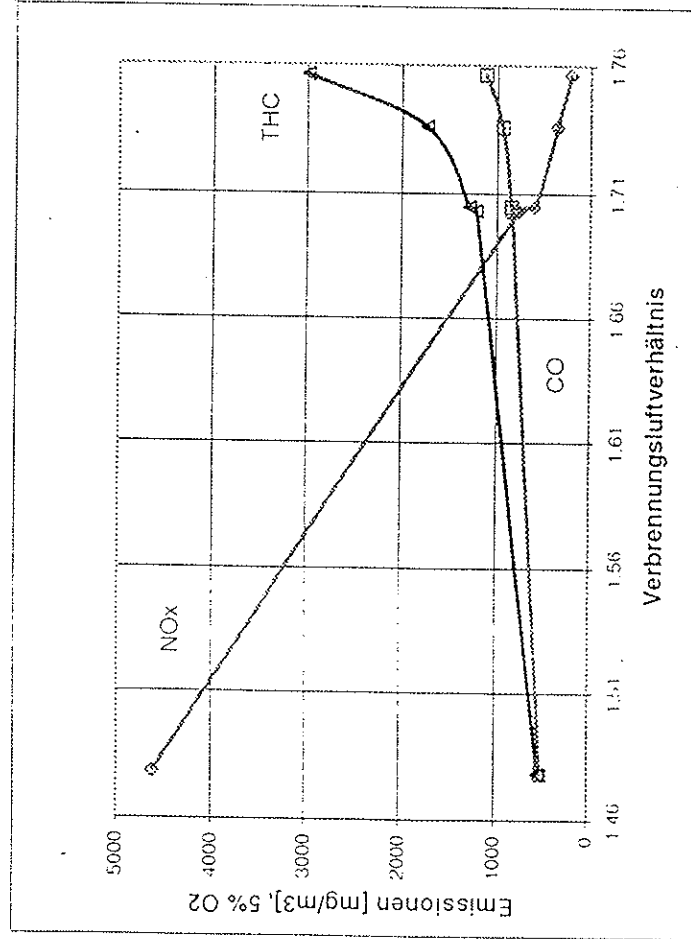
Abgasemissionen NOx, CO, THC

Ohne AGR

Variation vom Lambda

Sammelrohr 2.2m

pme und effektiver Wirkungsgrad



Aufgeladen, Konzept 2

Abgasemissionen NOx, CO, THC

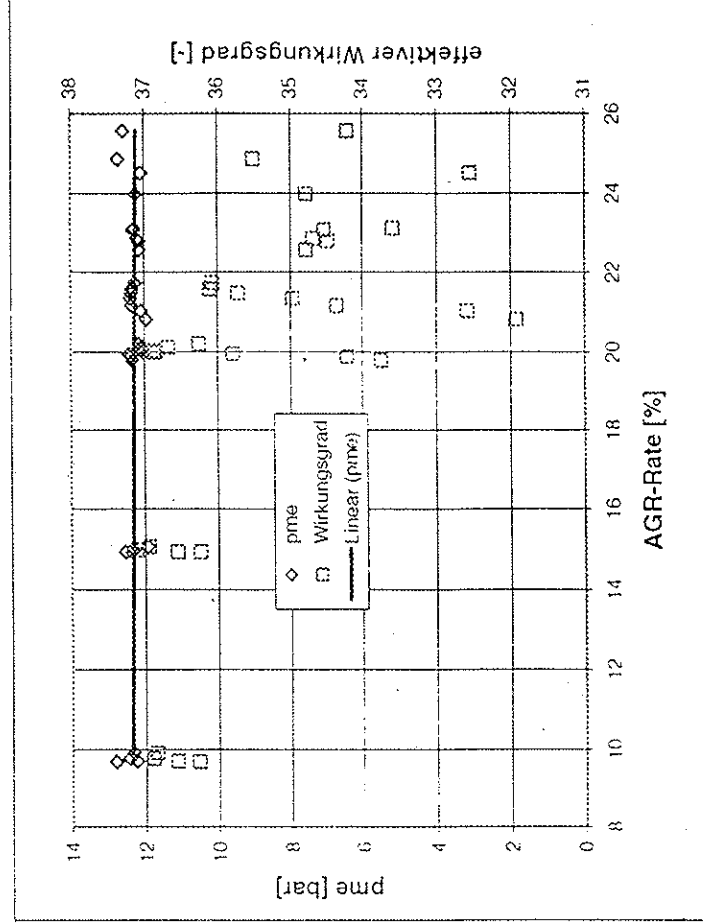
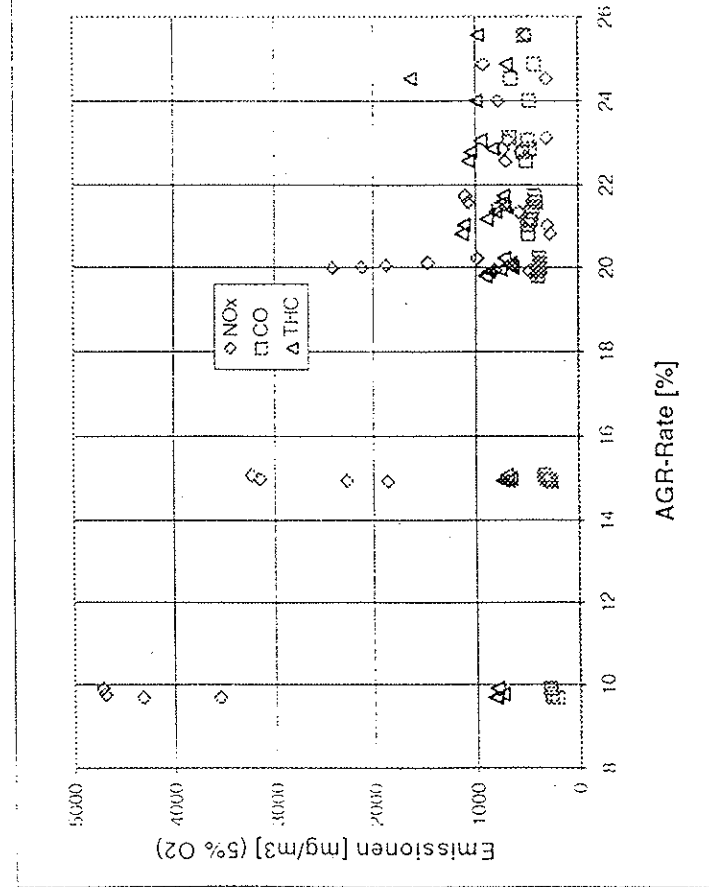
pme und effektiver Wirkungsgrad

Mit AGR

Lambda = 1

Sammelrohr 2.2m

Variation von AGR, T Gemisch, T Rez und Zündzeitpunkt



Aufgeladen, Konzept 2

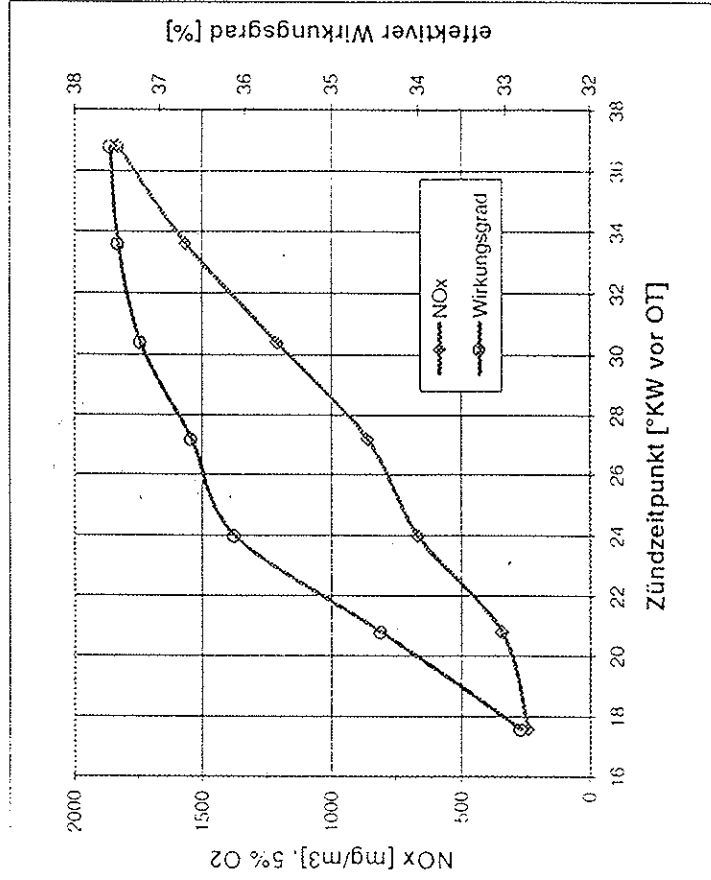
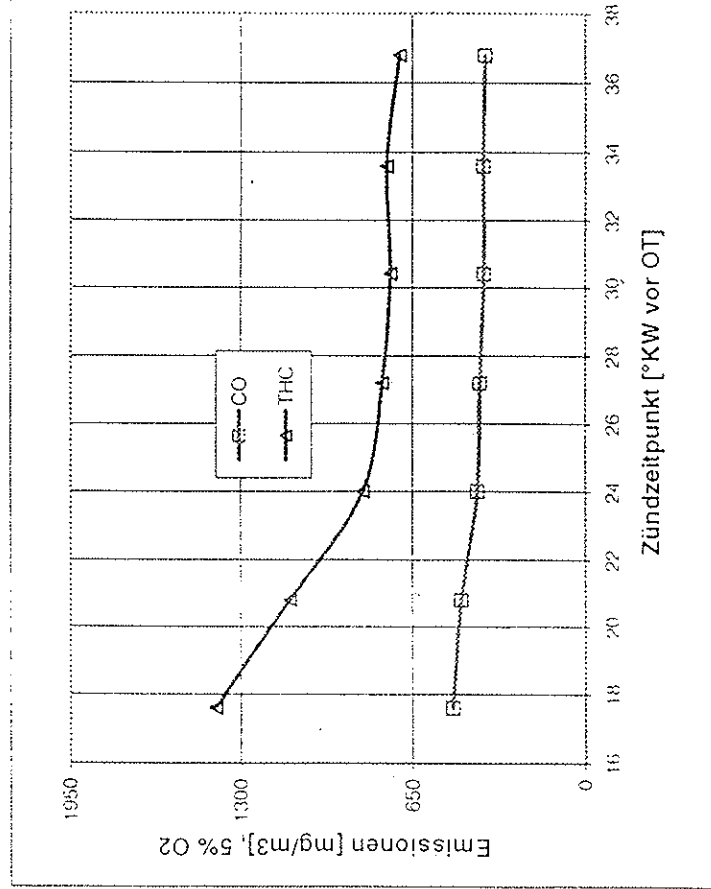
Abgasemissionen NOx, CO, THC und effektiver Wirkungsgrad

AGR = 20%

Lambda = 1

pme = 12 bar

Variation des Zündzeitpunktes



Aufgeladen, Konzept 2 (AGR = 19.8 bis 25.6%)

Abgasemissionen NOx, CO, THC

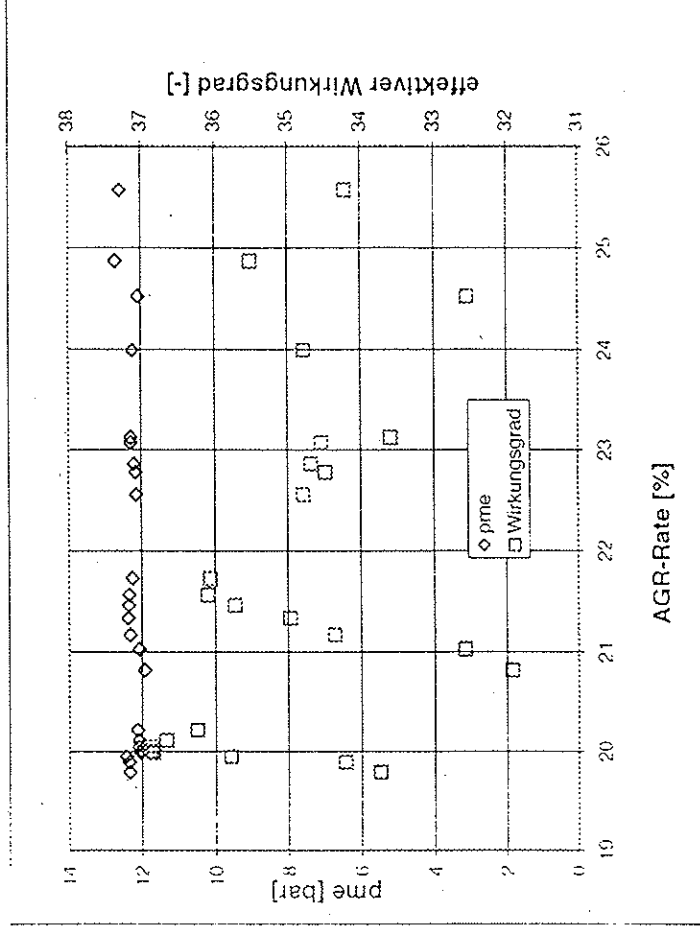
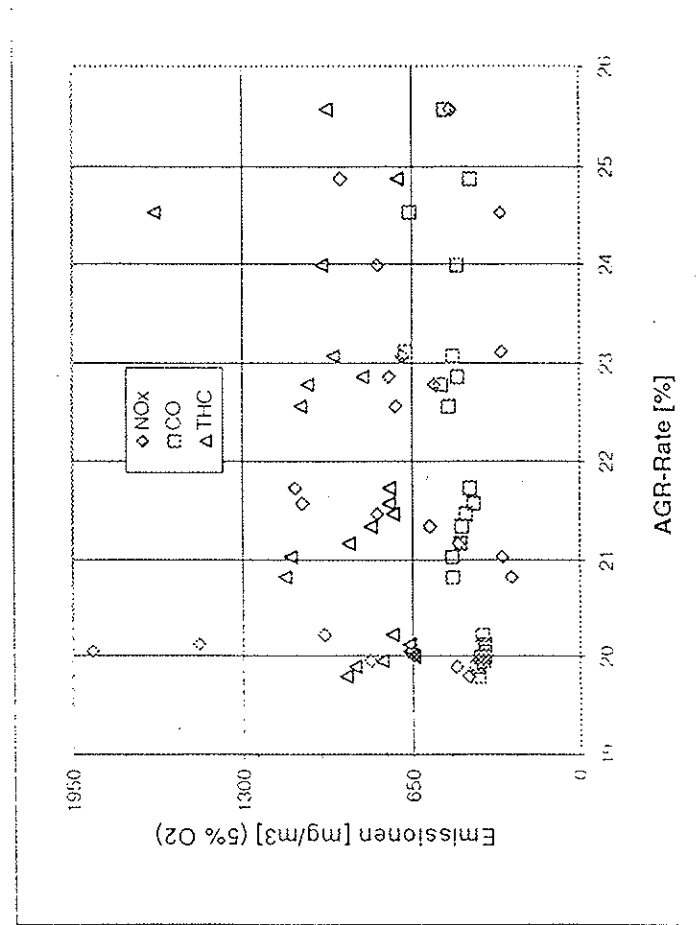
pme und effektiver Wirkungsgrad

Mit AGR

Variation von AGR, T Gemisch, T Rez und Zündzeitpunkt

Lambda = 1

Sammelrohr 2.2m



Aufgeladen, Konzept 3

Abgasemissionen NOx, CO, THC

pme und effektiver Wirkungsgrad

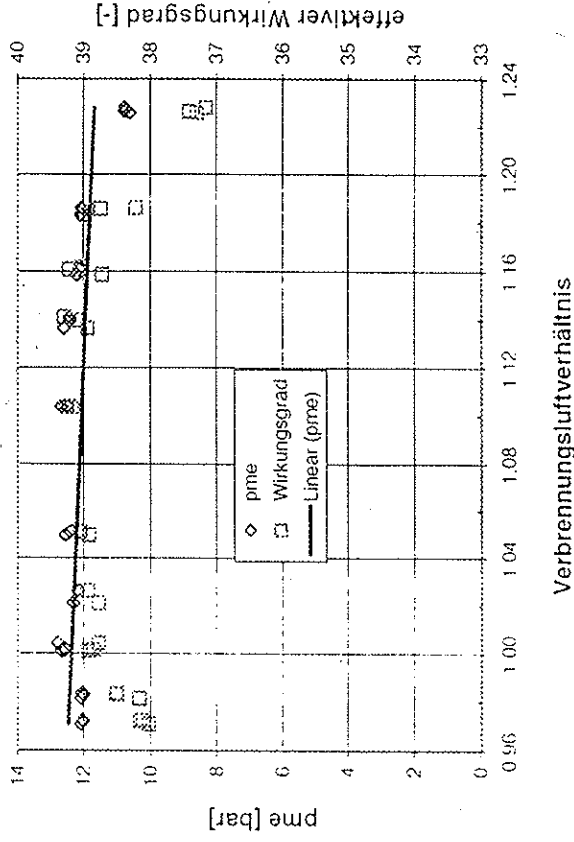
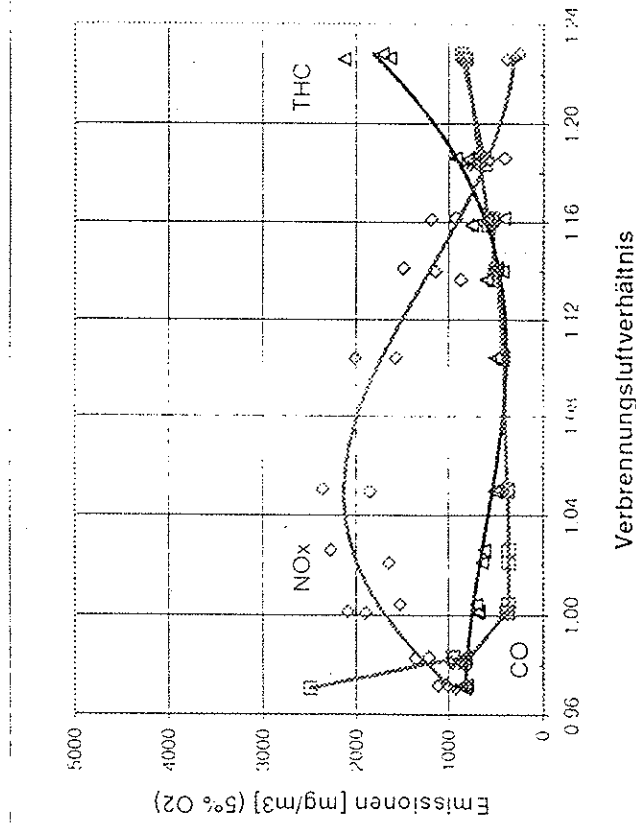
AGR = 20%

Variation von Lambda und Zündzeitpunkt

T Rez = 120°C

T Gemisch = 50°C

Sammelrohr 2.2m



Aufgeladen, Konzept 3

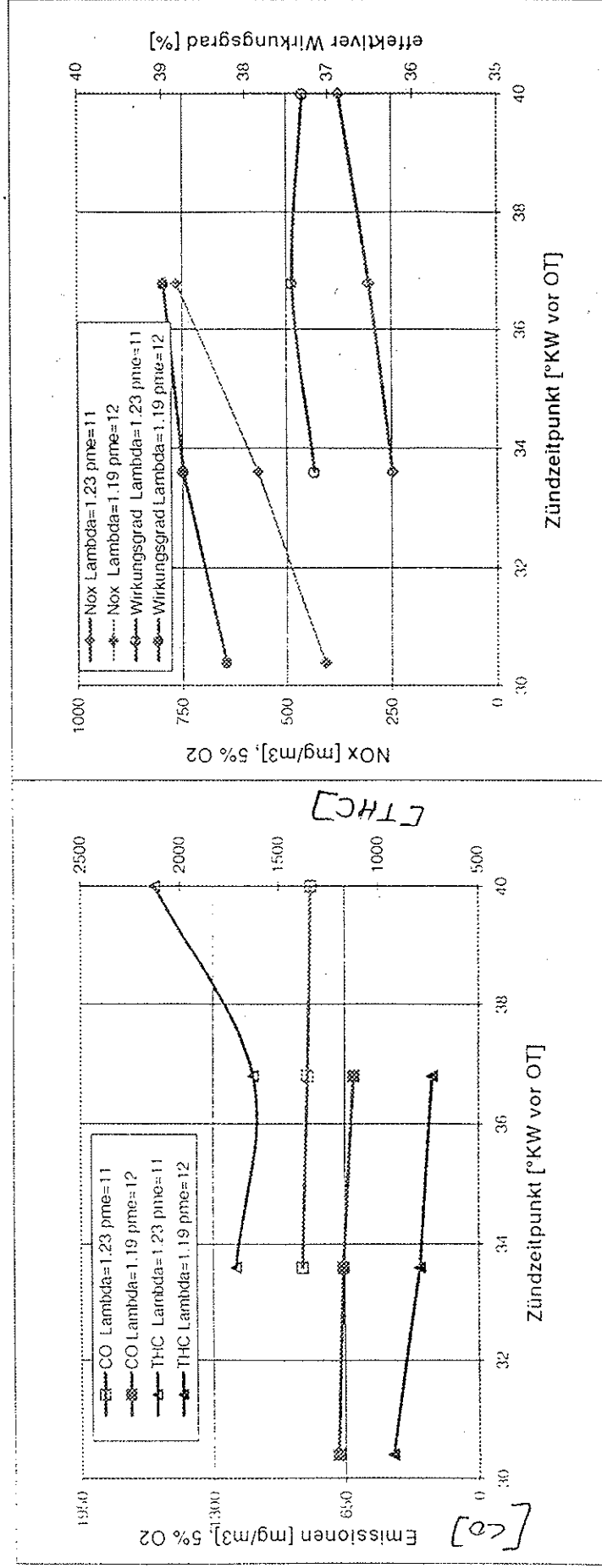
Abgasemissionen NOx, CO, THC und effektiver Wirkungsgrad

AGR = 20%

Lambda = 1.19 und 1.23

pme = 11 und 12 bar

Variation des Zündzeitpunktes

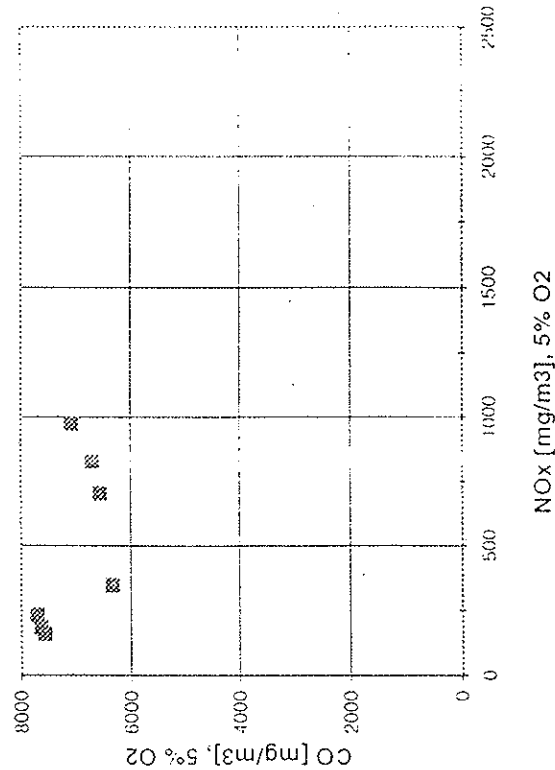


AGR (Konzept 2): CO in Funktion von NOx

Atmosphärisch, Variation: AGR und Zündzeitpunkt

AGR = 19.9-22.8%
 Lambda = 1
 Sammelrohr 6.2m

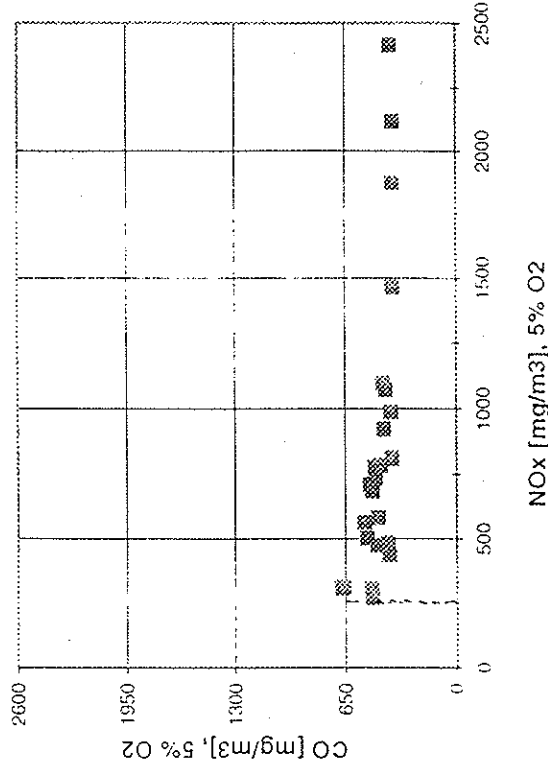
pme = 5.8-6.5
 T Rez = 108°C
 T Gemisch = 40°C



Aufgeladen, Variation: AGR, Zündzeitpkt, T Gem, T Rez

AGR = 20 bis 25%
 Lambda = 1
 Sammelrohr 2.2m

pme = 12bar

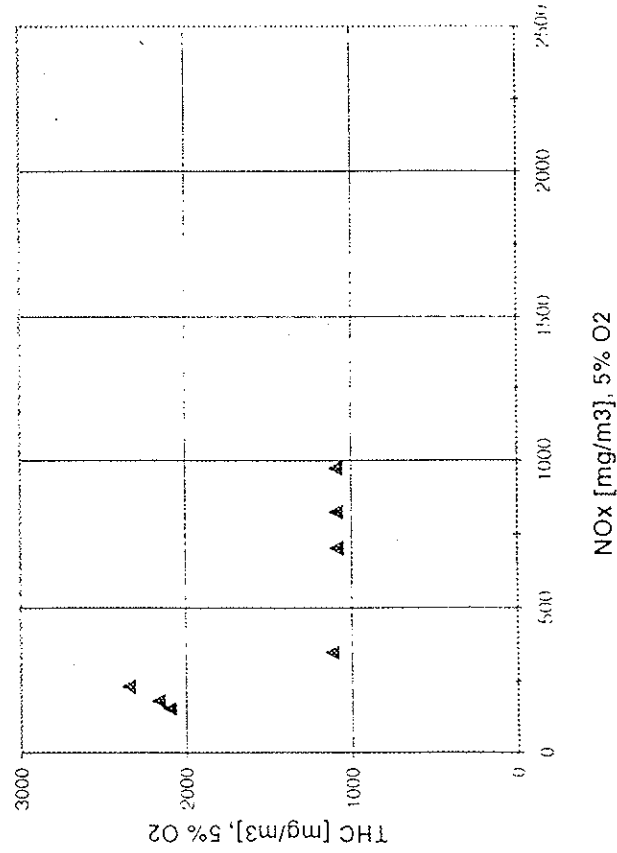


AGR (Konzept 2): THC in Funktion von NOx

Atmosphärisch, Variation: AGR und Zündzeitpunkt

AGR = 19.9-22.8%
 Lambda = 1
 Sammelrohr 6.2m

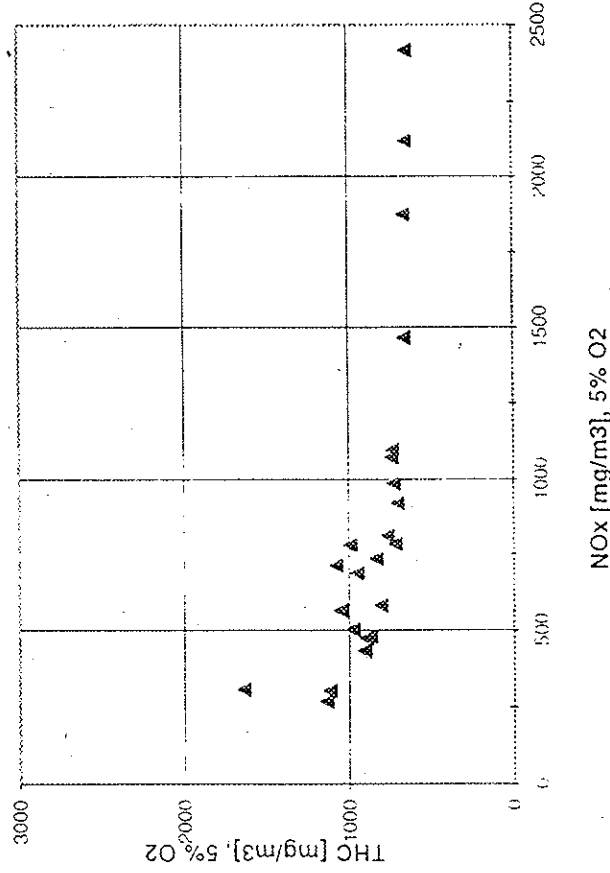
pme = 5.8-6.5
 T Rez = 108°C
 T Gemisch = 40°C



Aufgeladen, Variation: AGR, Zündzeitpunkt, T Gem, T Rez

AGR = 20 bis 25%
 Lambda = 1
 Sammelrohr 2.2m

pme = 12bar



AGR (Konzept 2): pme und effektiver Wirkungsgrad in Funktion von NOx

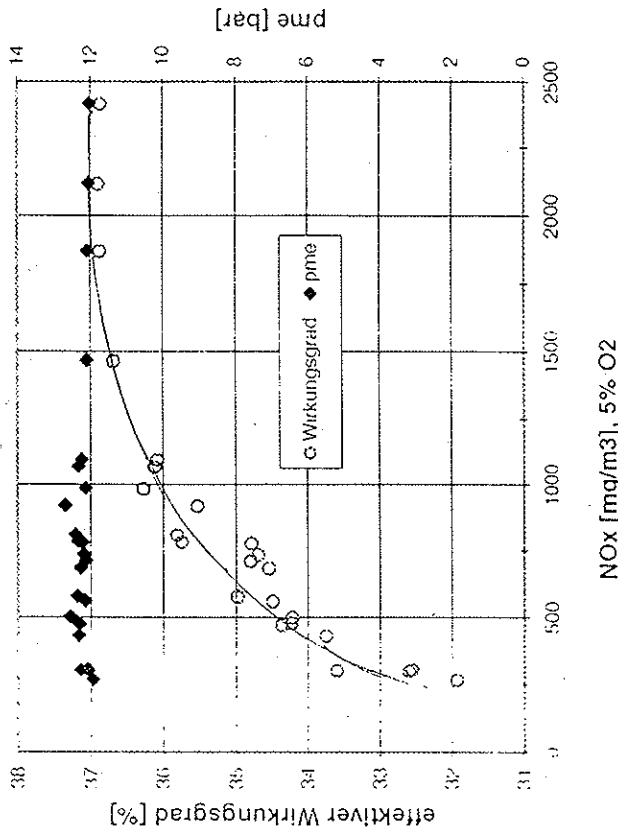
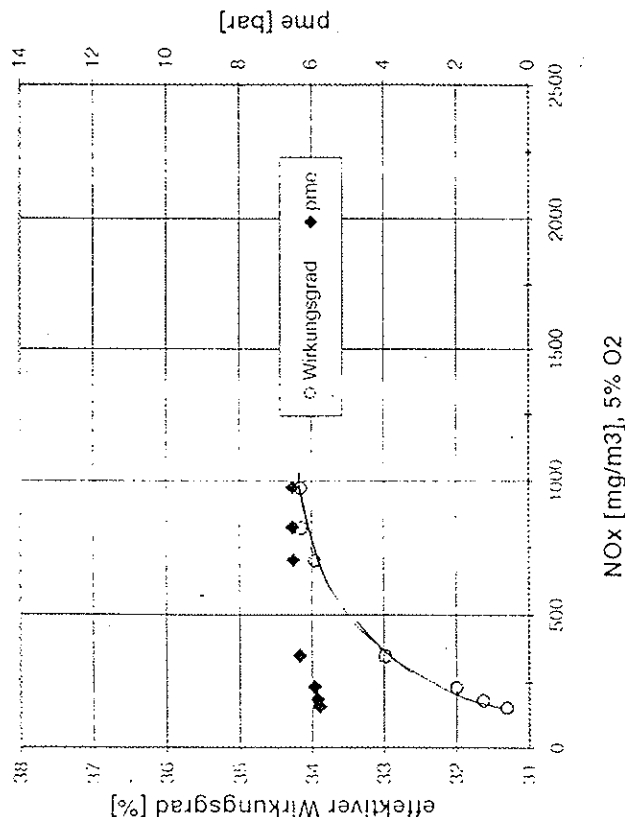
Atmosphärisch, Variation: AGR und Zündzeitpunkt

AGR = 19.9-22.8%
 Lambda = 1
 Sammelrohr 6.2m

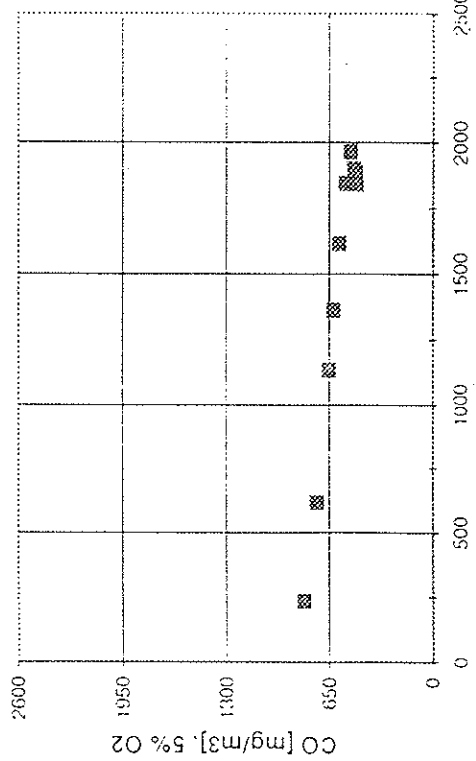
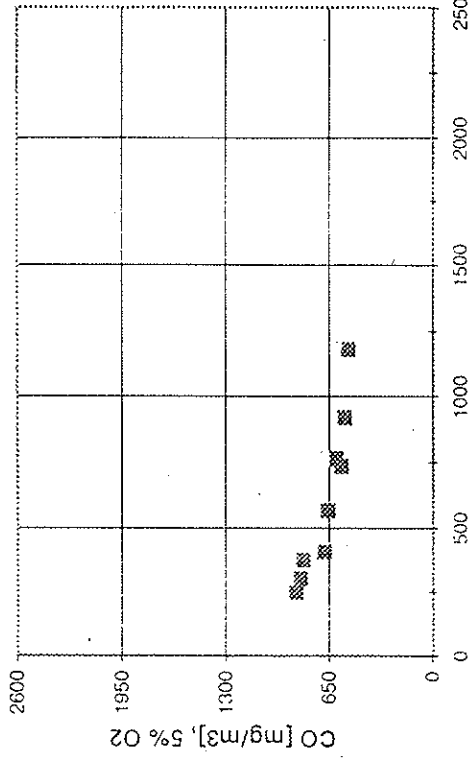
pme = 5.8-6.5
 T Rez = 108°C
 T Gemisch = 40°C

Aufgeladen, Variation: AGR, Zündzeitpunkt, T Gem, T Rez

AGR = 20 bis 25%
 Lambda = 1
 Sammelrohr 2.2m
 pme = 12bar



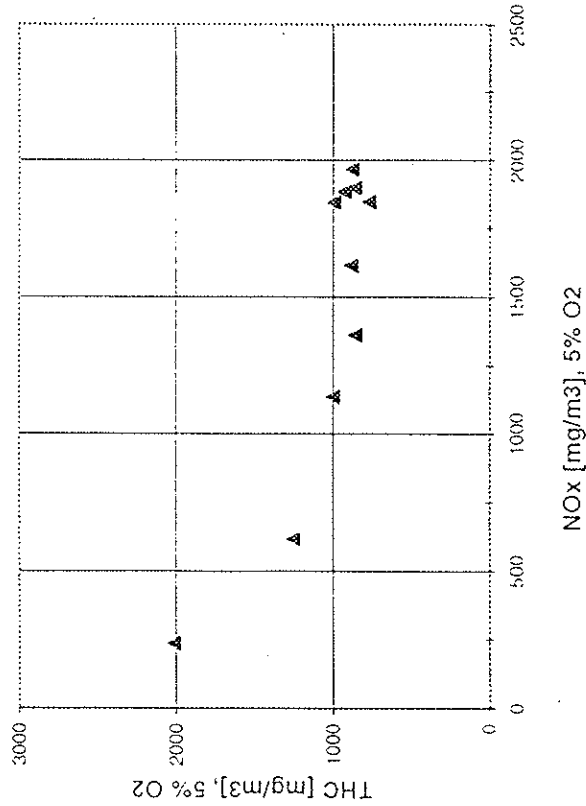
AGR (Konzept 3): CO in Funktion von NOx

Atmosphärisch, Variation: Lambda und Zündzeitpunkt AGR = 20% Lambda = 1.07 bis 1.31 Sammelrohr 2.2m pme = 5.25-6.5 T Gemisch = 40°C T Rez = 108°C	Aufgeladen, Variation: Lambda und Zündzeitpunkt AGR = 20% Lambda = 1.16 bis 1.23 Sammelrohr 2.2m pme = 12bar T Rez = 120°C T Gemisch = 50°C
	

AGR (Konzept 3): THC in Funktion von NOx

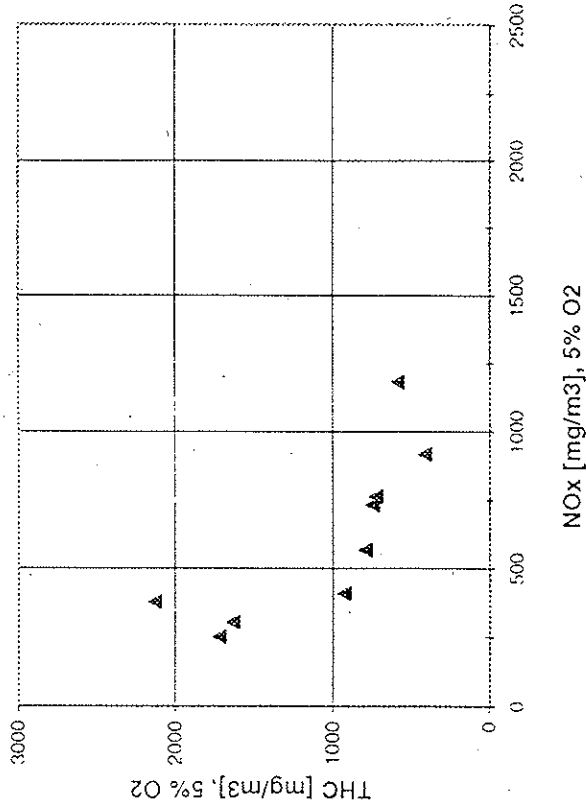
Atmosphärisch, Variation: Lambda und Zündzeitpunkt

AGR = 20%
 Lambda = 1.07 bis 1.31
 Sammelrohr 2.2m
 pme = 5.25-6.5
 T Gemisch = 40°C
 T Rez = 108°C

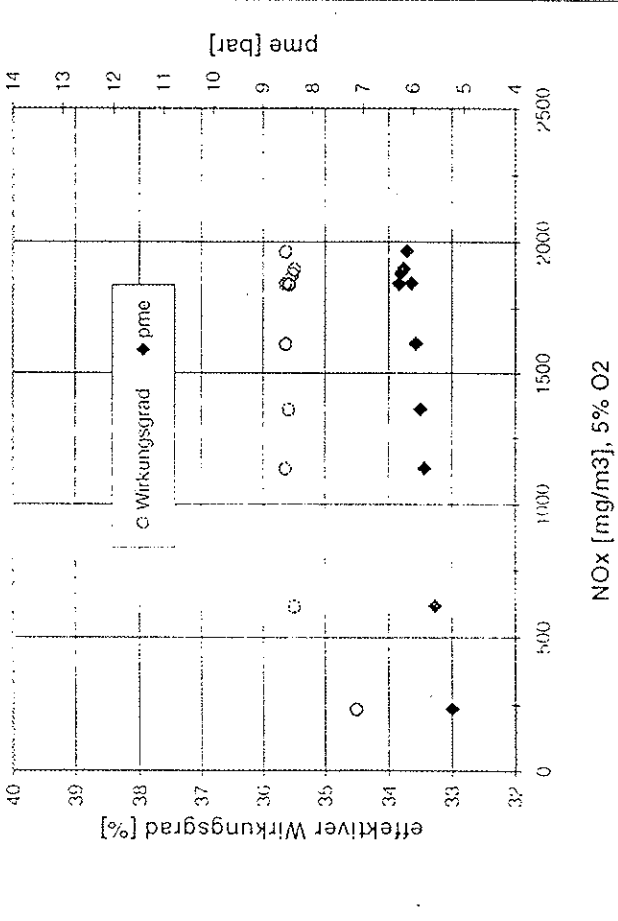
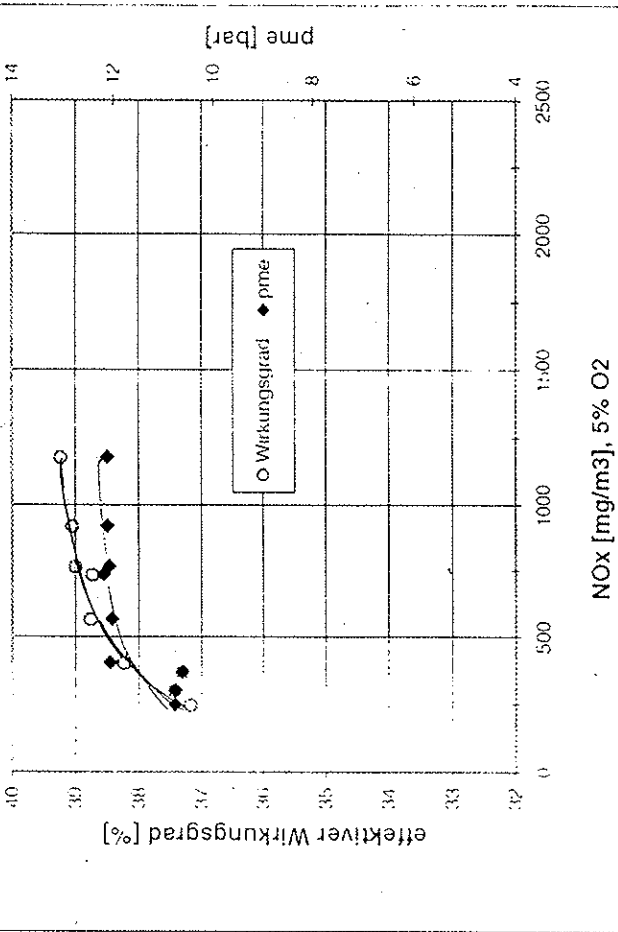


Aufgeladen, Variation: Lambda und Zündzeitpunkt

AGR = 20%
 Lambda = 1.16 bis 1.23
 Sammelrohr 2.2m
 pme = 12bar
 T Rez = 120°C
 T Gemisch = 50°C



AGR (Konzept 3): pme und effektiver Wirkungsgrad in Funktion von NOx

Atmosphärisch, Variation: Lambda und Zündzeitpunkt	Aufgeladen, Variation: Lambda und Zündzeitpunkt
AGR = 20% Lambda = 1.07 bis 1.31 Sammelrohr 2.2m	AGR = 20% Lambda = 1.16 bis 1.23 Sammelrohr 2.2m
pme = 5.25-6.5 T Gemisch = 40°C T Rez = 108°C	pme = 12bar T Rez = 120°C T Gemisch = 50°C
	

Sitzung vom 30.03.98

SCHLUSSFOLGERUNGEN

- Eine Leistung von 150 kW ($p_{me} = 12$ bar) wurde im aufgeladenen Betrieb mit **AGR** und jeweils $\lambda = 1$ bzw. $\lambda = 1.20$ erfolgreich dargestellt.
- Die schon jetzt erreichten Betriebswerte für die relevanten Zielgrößen betragen: (Schadstoffe in mg/m^3 bei 5 % O_2)

	NO_x	CO	THC	η_e (%)
→ $p_{me} = 12$ bar:				
20% AGR / $\lambda = 1$	250	< 600	1450	33.5
20% AGR / $\lambda = 1.19$	400	~ 650	1000	38.0
(noch spätere ZZP möglich)				
→ $p_{me} = 11$ bar:				
20% AGR / $\lambda = 1.23$	250	850	1750	36.2

- Die nächste Arbeitsphase betrifft die Optimierung des ATL und der thermischen Parameter von AGR und LKK, sowie anschliessend den Miller-Prozess.

Sitzung vom 30.03.98

AUSBLICK

<u>Nächste Schritte</u>	<u>Mittelfristig</u> (z.T. Fortsetzung, ca. 1 ½ -2 Jahre)
Einfluss aller T's des Systems!	Gemischtaufbereitung optimieren (getaktete Eindüsungsventile)
Optimierung ATL für 2 Betriebskonzepte und pme = 150 bzw. 180 kW	Neue Zündquellen untersuchen
λ-Einstellung und Nachbehandlung	Adaptive Anpassung an Erdgaszusammensetzung (Betriebsparameter, Sensorik, Optimierung)
Miller-Nockenwelle; neue ATL-Optimierung, evtl. VTG - ATL	Darstellung eines gesamthaft optimierten „Swiss Gas Engine 2'000“ mit z.B. 200 kW!