

# Formaldehydbildung – Wirkmechanismen



Untersuchung der Wirkzusammenhänge zur innermotorischen Beeinflussung  
der Formaldehyd-Bildung und Darstellung der Einflussparameter

Bericht zum Forschungsvorhaben

Gemeinsame Forschung.  
Gemeinsamer Erfolg.



Das Urheberrecht an diesem Bericht mit sämtlichen Beilagen verbleibt der FVV.

Die FVV übernimmt keine Gewähr für die Richtigkeit, die Genauigkeit und Vollständigkeit der Angaben sowie die Beachtung privater Rechte Dritter. Ohne schriftliche Genehmigung der FVV darf der Bericht weder kopiert noch vervielfältigt werden.

**Formaldehyd - Wirkmechanismen**

---

Bericht zum Forschungsvorhaben

Thema:	Untersuchung der Wirkzusammenhänge zur innermotorischen Beeinflussung der Formaldehyd-Bildung und Darstellung der Einflussparameter
Forschungsinstitut::	Technische Universität München Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen Leitung: Prof. Dr.-Ing. G. Wachtmeister
Bearbeiter und Verfasser:	Dipl.-Ing. M. Bauer Prof. Dr.-Ing. G. Wachtmeister
Beginn der Arbeiten:	01.09.2006
Ende der Arbeiten:	30.09.2008
Obmann des Arbeitskreises:	Dipl.-Ing. H. Baas MWM, Mannheim

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b><i>Einleitung</i></b> .....	<b>3</b>
1.1	Ausgangssituation .....	3
1.2	Zielsetzung.....	4
<b>2</b>	<b><i>Stand der Technik</i></b> .....	<b>5</b>
<b>3</b>	<b><i>Vorgehensweise</i></b> .....	<b>7</b>
<b>4</b>	<b><i>Prüfstands Aufbau</i></b> .....	<b>8</b>
<b>5</b>	<b><i>Vergleichsmessungen der Analyseverfahren</i></b> .....	<b>10</b>
<b>6</b>	<b><i>Basismessungen</i></b> .....	<b>12</b>
6.1	Ergebnisse Basismessungen MTU 396.....	13
6.2	Ergebnisse Basismessungen AVL 520 LVK .....	15
<b>7</b>	<b><i>Brenngasvariation</i></b> .....	<b>17</b>
7.1	Ergebnisse Brenngasvariation MTU 396.....	18
7.2	Ergebnisse Brenngasvariation AVL 520 LVK .....	21
<b>8</b>	<b><i>Motorparameter</i></b> .....	<b>25</b>
8.1	Variation des Turbineneintrittsdruckes.....	26
8.2	Variation der Kühlwassertemperatur.....	30
8.3	Variation der Frischgastemperatur .....	32
8.4	Drallvariationen .....	33
8.5	Variation des Verdichtungsverhältnisses .....	36
8.6	Einfluss des Feuerstegs .....	41
8.7	Variation der Brennraumgeometrie .....	44
<b>9</b>	<b><i>Zusammenfassung</i></b> .....	<b>47</b>
<b>10</b>	<b><i>Literaturverzeichnis</i></b> .....	<b>51</b>

---

# 1 Einleitung

## 1.1 Ausgangssituation

Für die heutige Industriegesellschaft stellt eine ausreichende Energieversorgung unter anderem in Form von elektrischem Strom und Wärme eine essentielle Notwendigkeit dar, um den erreichten Lebensstandard zu erhalten. Hierbei ist ein stetig steigender Bedarf an Energie festzustellen. Neben der Nutzung fossiler Energieträger kommt dabei in den letzten Jahren den regenerativen Energien eine wachsende Bedeutung zu.

Bei allen fossilen Energieträgern sowie bei einigen regenerativen Energien muss eine Umwandlung chemisch gebundener Primärenergie in die benötigte Sekundärenergie erfolgen. Im Allgemeinen wird dies durch eine Verbrennung erreicht, wobei es im Regelfall zur Entstehung und zum Ausstoß von Stoffen kommt, die für Mensch und Umwelt schädlich sein können. Die Verpflichtung des Schutzes von Mensch und Umwelt und das gestiegene Umweltbewusstsein insgesamt haben weltweit die Gesetzgeber dazu veranlasst, die zulässigen Emissionsgrenzwerte für schädliche Komponenten im Abgas kontinuierlich zu vermindern. Die zulässigen Grenzwerte schädlicher Abgaskomponenten für stationäre Anlagen sind innerhalb der Bundesrepublik Deutschland in der Technischen Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft festgelegt.

Ein grundsätzlich sehr sauber verbrennender Energieträger ist das Gas Methan, welches in fossiler Form einen Hauptbestandteil von Erdgas und Grubengas darstellt. Als regenerativer Energieträger ist es vor allem in Bio-, Klär- und Deponiegas zu finden. Diese Gase werden zunehmend in Verbrennungsmotoren eingesetzt, vor allem um elektrische Energie und – bei einer zusätzlichen Abwärmenutzung – thermische Energie zu erzeugen. Die Motoren werden dabei in der Regel als Magergasmotoren ausgeführt. Diese besitzen zum Einen Wirkungsgradvorteile. Zum Anderen ist nur so auch mit katalysatorgifthaltigen Sondergasen (Bio-, Klär-, Deponiegas) eine Einhaltung der gesetzlichen Stickoxidgrenzwerte ohne Abgasnachbehandlung möglich. Bei der Verbrennung von Methan entsteht Formaldehyd als Zwischenprodukt. Bei Reaktion bis zum

---

Gleichgewicht ist Formaldehyd im Abgas nicht in signifikanter Menge anzutreffen. Erfolgt die Verbrennung unvollständig, so wird es als Bestandteil des Abgases mit ausgestoßen. Die motorische Verbrennung verläuft immer zu einem gewissen Grade unvollständig, so dass – vor allem im Abgas von Magergasmotoren – Formaldehyd zu finden ist. Für Gasmotorenanlagen ist in der TA Luft für die Einzelkomponente Formaldehyd ein Grenzwert von  $60\text{mg/m}_N^3$  festgelegt.

## **1.2 Zielsetzung**

Die Zielsetzung dieses Forschungsvorhabens ist eine detaillierte Untersuchung der Zusammenhänge und Einflussgrößen, die auf eine Entstehung von Formaldehyd als Abgasbestandteil einwirken. Anhand der so gewonnenen Erkenntnisse sollen Möglichkeiten gefunden werden, für bestehende Gasmotorenanlagen eine Einhaltung der Abgasgrenzwerte sicherzustellen sowie neue Anlagen im Hinblick auf geringstmögliche Formaldehydemissionen auslegen zu können. Ferner soll eine Basis für eine Beurteilung der Tauglichkeit von Online-Messverfahren für Abnahmeprüfungen geschaffen werden.

---

## 2 Stand der Technik

Die Emissionen schädlicher Abgaskomponenten von Verbrennungsmotoranlagen sind in Deutschland gemäß Nummer 5.4.1.4 der TA Luft reglementiert. Von diesen Emissionen sind für Gasmotorenanlagen in der Regel nur die Komponenten Kohlenmonoxid, Stickstoffoxide und Formaldehyd relevant. Um die Stickoxidemissionen unterhalb der Grenzwerte zu halten, kann neben einem stöchiometrischen Betrieb des Motors mit nachgeschalteter Abgasnachbehandlung eine Betriebsweise des Motors mit Luftüberschuss praktiziert werden. Auf Grund der Anfälligkeit des Drei-Wege-Katalysators auf im Abgas enthaltene Katalysatorgifte, wie sie vor allem im Abgas von Bio-, Klär- und Deponiegas auftreten, hat sich eine magere Betriebsweise der Gasmotoren durchgesetzt. Hierbei werden die Brennraumtemperaturen durch den Betrieb mit Luftüberschuss so weit reduziert, dass die Stickoxidentstehung vermindert wird und deren Grenzwerte nach TA Luft eingehalten werden. Durch eine zunehmende Zündunwilligkeit und sinkende Flammenfrontgeschwindigkeiten auf Grund von Abmagerung können allerdings die Emissionen von Kohlenmonoxid und unverbrannten Kohlenwasserstoffen ansteigen. [ZACH2001], [TALUFT2002]

Bei der Verbrennung von aliphatischen Kohlenwasserstoffen wird im Lauf der Reaktion Formaldehyd als stabiles Zwischenprodukt gebildet. Es entsteht dabei in relativ kalten Bereichen der Flamme bis ca. 950K und wird bei Temperaturen von mehr als 1200K rasch umgesetzt. Dies führt dazu, dass in bis zum chemischen Gleichgewicht reagierten Methan-Luft Mischungen keine nennenswerten Formaldehydkonzentrationen mehr vorkommen, wie reaktionskinetische Betrachtungen ergeben haben. Eine motorische Entstehung von Formaldehyd ist folglich an eine unvollständige Reaktion gebunden, wie sie im Allgemeinen in verschiedenen Bereichen des Brennraums von Verbrennungsmotoren vorkommt. [BÄUERLE1999], [OLSEN2000], [GRAF2003]

Die Messung von Formaldehyd als Bestandteil von Verbrennungsmotorenabgas ist in der TA Luft geregelt (Messung aliphatischer Aldehyde). Der Nachweis erfolgt dabei ausnahmslos mittels nasschemischer Verfahren nach VDI-Richtlinie 3862, Blatt 1-4, bei denen Formaldehyd am Ort der Messung gelöst und / oder über eine

---

chemische Reaktion gebunden wird. Eine gravimetrische Bestimmung des Formaldehydgehaltes der Absorptionslösungen erfolgt später im Labor. Durch eine Messung des Probenvolumenstroms während der Entnahme kann die im Labor ermittelte Formaldehydmasse auf eine Abgaskonzentration umgerechnet werden. Für Online-Messungen, wie sie für den Prüfstandsbetrieb benötigt werden, ist diese Methode wegen der langen Zeiträume für die Probennahme einerseits und die Auswertung andererseits nicht geeignet. Für diesen Zweck existieren andere Verfahren, z.B. die Massenspektrometrie oder die Fouriertransformierte Infrarot-Spektroskopie (FT-IR). In der derzeit geltenden TA Luft 2002 sind nur nasschemische Verfahren bei der Zulassung berücksichtigt worden. Der aktuelle Kenntnisstand lässt die FT-IR-Technik aber als geeignete Alternative erscheinen, wie in einem FVV-Forschungsvorhaben gezeigt wurde. [TALUFT2002], [FVV560]

---

### 3 Vorgehensweise

Am Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen (LVK) steht neben konventionellen Abgasanalyseanlagen eine FT-IR Abgasanalyse, Typ AVL „SESAM IV“ zur Verfügung. Dieses FT-IR wurde für die Abgasanalyse hinsichtlich der Emissionen von Formaldehyd, Stickoxiden, Kohlendioxid und Wasser verwendet. Für die Analyse der Gesamtkohlenwasserstoffemissionen und der Restsauerstoffgehalte im Abgas wurden konventionelle Analysatoren eingesetzt. Trotz der in dem FVV-Vorhaben Nr. 560 nachgewiesenen grundsätzlichen Eignung des FT-IR-Verfahrens zur Analyse von Verbrennungsmotorabgas wurde zunächst ein Vergleich zwischen einer nasschemischen Analyse der Formaldehydemissionen und einer Online-Messung mittels FT-IR durchgeführt, um das Verfahren für die Analyse von Formaldehyd zu validieren.

Nach der Validierung des Messverfahrens erfolgten Basismessungen, um ein Verständnis für das allgemeine Verhalten der Emission von Formaldehyd im motorischen Betrieb zu entwickeln. Bei diesen Basismessungen wurde der Einfluss von Last, Verbrennungsluftverhältnis und Zündzeitpunkt auf die Formaldehydemissionen untersucht. Im Anschluss an die Basismessungen wurde eine umfangreiche Variation der Brenngaszusammensetzungen und Betriebsparameter durchgeführt. Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse über das Verhalten der Formaldehydemissionen in Abhängigkeit der Betriebsparameter erfolgten Untersuchungen über den Einfluss konstruktiver Größen und Motorparameter auf Höhe und Verlauf der Emissionen.

---

## 4 Prüfstandsaufbau

Für die Bearbeitung des Forschungsvorhabens „Formaldehyd – Wirkmechanismen“ stehen am LVK zwei Gasmotorenprüfstände zur Verfügung. Die vorhandenen Forschungsmotoren decken dabei den Bereich kleiner (AVL 520 LVK) bis mittlerer (MTU 396) Zylinderhubräume ab. Der Forschungsmotor MTU 396 findet primär Verwendung in dem FVV-Forschungsvorhaben „Magerkonzept-Gasmotoren Verbrennungsmodelle“, der Forschungsmotor AVL 520 LVK wurde für das Forschungsvorhaben „Formaldehyd – Wirkmechanismen“ aufgebaut. Die Technischen Daten der Motoren sind *Tabelle 1* zu entnehmen.

	MTU 396	AVL 520 LVK
Hub [mm]	185	140
Bohrung [mm]	165	125
Zylinderhubraum [cm <sup>3</sup> ]	3956	1718
Zylinderzahl	1	1
Verdichtungsverhältnis [1]	12,05	13
Anzahl der Ventile	4	2
Brennraumform	Omegamulde	Kegelstumpfmulde
Drallzahl n. Tippelmann	0,57	0,32

*Tabelle 1: Technische Daten der Forschungsmotoren*

Beide Motoren können mit einem Schraubenverdichter extern aufgeladen werden. Eine verstellbare Drossel im Abgastrakt ermöglicht es, den Abgasgedruck einzustellen und so einen Turbolader zu simulieren. Die Brenngaszufuhr erfolgt bei beiden Motoren über einen Gasmischer mit getakteten Gaseinblaseventilen. Bei dem Forschungsmotor MTU 396 erfolgt die Einstellung des Verbrennungsluftverhältnisses  $\lambda$  über eine Steuerung von Einblasedauer und Brenngasdruck, der Forschungsmotor AVL 520 LVK besitzt eine Motorsteuerung mit geschlossenem Regelkreis für konstantes  $\lambda$  unter Verwendung einer Breitbandlambdasonde.

---

Als Brenngas kann neben Erdgas ein Gemisch aus bis zu 6 Einzelkomponenten verwendet werden, welches von einer Gasmischanlage zur Verfügung gestellt wird. Das verwendete Erdgas wird von den Stadtwerken München (SWM) geliefert und besitzt einen überdurchschnittlich hohen Methananteil von 98% (Mittelwert für 2007, Analysenauszug der SWM vom Februar 2008).

## 5 Vergleichsmessungen der Analyseverfahren

Die Vergleichsmessungen wurden an dem Forschungsmotor MTU 396 durchgeführt. Es wurden drei Betriebspunkte ausgewählt, die eine niedrige, eine mittlere und eine hohe Formaldehydkonzentration im Abgas aufweisen. Die Betriebspunkte wurden ausgehend von dem Referenzbetriebspunkt des Forschungsvorhabens „Magerkonzept-Gasmotoren Verbrennungsmodelle“ durch Variation von Last, Zündzeitpunkt und Verbrennungsluftverhältnis eingestellt. Die Formaldehydemissionen wurden dabei online mittels FT-IR gemessen. Nach Einstellung wurden die Betriebspunkte für jeweils zwei Stunden stabil gehalten, so dass eine Probennahme nach VDI 3862 Blatt 2 (DNPH-Methode) durchgeführt werden konnte. Die Probennahme sowie die anschließende Analyse der Proben im Labor wurden durch das Institut für Wasserchemie und Chemische Balneologie (IWC) der TU München durchgeführt. Gleichzeitig mit der nasschemischen Probennahme erfolgte eine Abgasanalyse mittels FT-IR. Die Abgasentnahme erfolgte dabei an gleicher Stelle der Abgasanlage. Die mit dem FT-IR ermittelten Messwerte wurden über die gesamte Messdauer aufgezeichnet und gemittelt.

Die mittels FT-IR ermittelten Formaldehydhalte liegen durchweg über den nasschemisch bestimmten Konzentrationen. Die Abweichungen betragen absolut zwischen 1,5 ppmv und 3,9 ppmv, wobei die größte Abweichung bei der geringsten Formaldehydkonzentration zu verzeichnen ist (siehe *Abbildung 1*).

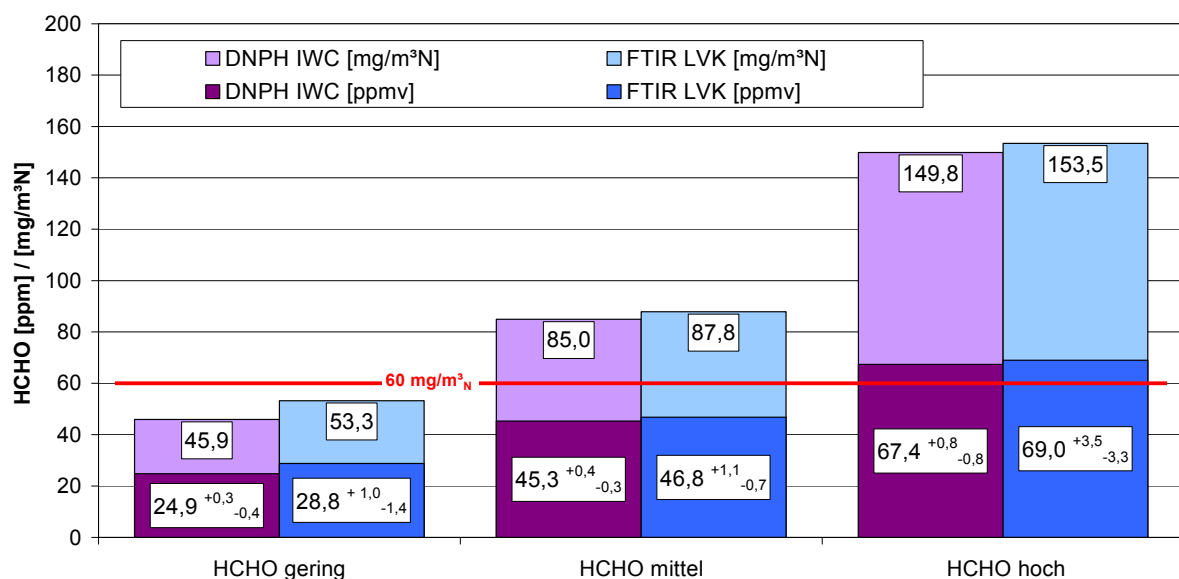


Abbildung 1: Ergebnisse der Vergleichsmessung DNP / FT-IR

Daraus resultieren der größte Fehler bei geringen Formaldehydgehalten und der geringste Fehler bei hohen Formaldehydgehalten. Trotz des hohen Fehlers von 15,7% werden die Tendenzen sehr gut wiedergegeben, so dass die Abgasanalyse mittels FT-IR als geeignet angesehen werden kann, bei laufendem Prüfstandsbetrieb die Auswirkung von geänderten Betriebs- und Motorparametern auf die Formaldehydemissionen zu dokumentieren. Die Abweichung der FT-IR-Messwerte könnte in dem recht großen Messbereich von Formaldehyd bis 1000ppm begründet liegen. Bei einer Kalibrierung auf einen kleineren Messbereich sind hier Verbesserungen denkbar. In *Tabelle 2* sind die Messwerte der Vergleichsmessung aufgeführt.

		HCHO gering	HCHO mittel	HCHO hoch
Mittelwert DNPH	[ppmv]	24,9	45,3	67,4
Mittelwert FT-IR	[ppmv]	28,8	46,8	69,0
Fehler abs. FT-IR	[ppmv]	+3,9	+1,5	+1,6
Fehler rel. FT-IR	[%]	+15,7	+3,3	+2,4
Schwankungsbreite DNPH	[ppmv]	0,7	0,7	1,6
Schwankungsbreite FT-IR	[ppmv]	2,4	1,8	6,8

*Tabelle 2: Vergleich DNPH / FT-IR; Zahlenwerte*

Der Umrechnung von [ppmv] auf [ $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ] liegen für beide Messmethoden dieselben Messwerte der Abgaszusammensetzung zu Grunde, somit ergibt sich für die relativen Abweichungen der Messungen in [ $\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ ] kein Unterschied zu den Konzentrationen in [ppm].

Die gemessenen Formaldehydkonzentrationen reichen von einer sicheren Einhaltung der TA-Luft bis hin zu Formaldehydgehalten, die in der Größenordnung der maximalen in [BIOMON2003] und [KRISTEN2007] ermittelten Werte liegen, und decken somit einen ausreichenden Bereich an Emissionen ab.

## 6 Basismessungen

Die Basismessungen wurden an beiden Forschungsmotoren durchgeführt. Ausgehend von einem Referenzbetriebspunkt wurden hierbei Zündzeitpunktvariationen bei drei Ladedrücken, kombiniert mit jeweils drei Verbrennungsluftverhältnissen, durchgeführt.

	MTU 396			AVL 520 LVK		
	$p_{SR}$ [bar abs.]			$p_{SR}$ [bar abs.]		
$\lambda = 1,40$	XXX	XXX	XXX	1,14	1,61	1,93
$\lambda = 1,50$	1,23	1,63	2,03	1,14	1,61	1,93
$\lambda = 1,60$	1,23	1,63	2,03	XXX	1,61	1,92
$\lambda = 1,65$	1,23	1,63	2,03	XXX	XXX	XXX

*Tabelle 3: Betriebsparameter Basismessungen*

Die Unterschiede in den Saugrohrdrücken der beiden Motoren untereinander rühren von einer differierenden Auswahl der Betriebspunkte her. Während beim MTU 396 Ladedrücke untersucht wurden, die bereits für das Forschungsvorhaben „Magerkonzept-Gasmotoren Verbrennungsmodelle“ verwendet worden waren, mussten für den AVL 520 LVK Ladedrücke erst definiert werden. Neben einem relativen Ladedruck von  $p_L = 0,70$  bar rel., analog zum Referenzpunkt des MTU 396, wurde ein Ladedruck von  $p_L = 0,20$  bar rel. definiert. Dieser ergab sich aus bei laufendem Schraubenverdichter und voll geöffneter Drosselklappe minimal einstellbarem Ladedruck. Der obere Ladedruck wurde zu 1,00 bar rel. gewählt. Gemessen wurde der Ladedruck in einem Beruhigungsvolumen vor der Drosselklappe. Zusätzlich erfolgte eine Messung des Relativdrucks in dem Puffervolumen vor Eintritt in das Saugrohr. Zusammen mit dem jeweils herrschenden Umgebungsdruck ergeben sich damit die in *Tabelle 3* aufgeführten Absolutdrücke. Bei dem Forschungsmotor AVL 520 LVK wurden etwas fettere Betriebspunkte gewählt, da dessen Magerlaufgrenze deutlich niedriger lag als die des MTU 396. So traten bei einem Verbrennungsluftverhältnis von  $\lambda = 1,65$  bereits deutliche Zündaussetzer auf. Bei einem Saugrohrdruck von 1,14 bar kam es bereits bei  $\lambda = 1,60$  gehäuft zu Zündaussetzern, so dass dieser Betriebspunkt nicht untersucht werden konnte.

---

## 6.1 Ergebnisse Basismessungen MTU 396

Der Großteil der gemessenen Formaldehydemissionen liegt deutlich über dem nach TA Luft vorgeschriebenen Grenzwert von  $60 \text{ mg/m}^3_{\text{N}}$ . Bei jeweils konstantem Saugrohrdruck entstehen demnach um so höhere Formaldehydemissionen, je magerer das Gemisch ist. Diese Tendenz ist bei hohen Saugrohrdrücken stärker ausgeprägt als bei niedrigen. Betrachtet man die gemessene Formaldehydmenge bei jeweils konstantem Verbrennungsluftverhältnis, so fällt auf, dass bei fetterem Gemisch die Emissionen mit steigendem Saugrohrdruck stetig abnehmen. Im Gegensatz dazu ist bei magereren Gemischen eine solch eindeutige Tendenz nicht festzustellen. Eine Verschiebung des Zündzeitpunktes in Richtung spät bewirkt bei den fetteren Gemischen zunächst einen Anstieg der Formaldehydemissionen, die nach Erreichen eines Spitzenwertes zu sehr späten Zündzeitpunkten wieder abfallen. Bei  $\lambda = 1,65$  und  $\lambda = 1,60$  mit geringstem Saugrohrdruck ist diese Tendenz nicht festzustellen. Nach Durchlaufen eines relativ konstanten Plateaus steigen hier die Emissionen zu späten Zündzeitpunkten deutlich an (siehe *Abbildung 2*). Die Zündung erfolgt hier so spät, dass ein Durchbrennen der Ladung wegen schlechter Brennbedingungen (mageres Gemisch, fortgeschrittene Expansion) nicht mehr gewährleistet ist. Die Flamme verlöscht, bevor sie alle Bereiche des Brennraumes erreicht hat, was sich auch an den sprunghaft ansteigenden Gesamtkohlenwasserstoffemissionen zeigt. Im Bereich der verlöschenden Flamme kommt es zu Vorreaktionen, bei denen in großem Maße Formaldehyd gebildet wird.

Der mit steigendem Zündwinkel an- und später wieder absteigende Verlauf ist bei den Gesamtkohlenwasserstoffemissionen weit weniger stark ausgeprägt als bei den Formaldehydemissionen. Zudem sinken die Gesamtkohlenwasserstoffemissionen bei jedem Verbrennungsluftverhältnis mit steigendem Ladedruck ab. Dies lässt auf unterschiedliche Quellen und / oder Bildungsmechanismen der Formaldehyd- und Gesamtkohlenwasserstoffemissionen schließen.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen darüber hinaus, dass geringe Formaldehydemissionen entweder hohe Stickoxidemissionen bedingen (fettes Gemisch, hohe Ladedrücke) oder ein gravierendes Absinken des Wirkungsgrades zur Folge haben (später Zündzeitpunkt), wie in *Abbildung 2 c*) und *d*) zu sehen ist.

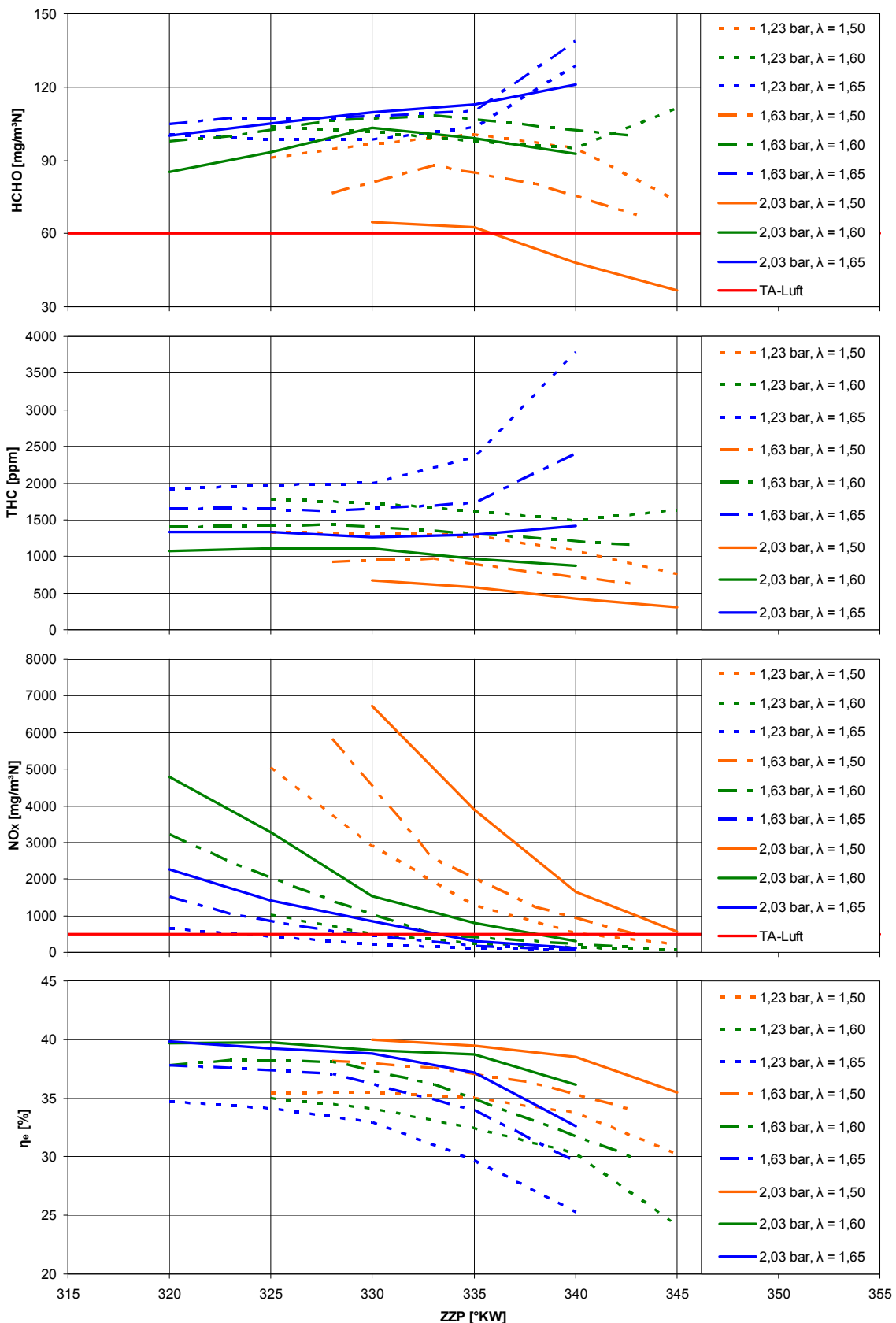


Abbildung 2: Basismessungen MTU 396; von o. nach u.: a) Formaldehyd-, b) Gesamtkohlenwasserstoff-, c) Stickoxidemissionen, d) effektiver Wirkungsgrad; jeweils in Abhängigkeit von Zündzeitpunkt, Saugrohrdruck (abs.) und Verbrennungsluftverhältnis

---

## 6.2 Ergebnisse Basismessungen AVL 520 LVK

Die Ergebnisse am Forschungsmotor AVL 520 LVK bestätigen im Großen und Ganzen die am MTU 396 gewonnenen Erkenntnisse. Bei konstanten Ladedrücken steigen die Formaldehydemissionen mit zunehmend magerem Gemisch und damit verringerter Motorleistung an. Auch hier ist diese Tendenz bei hohen Ladedrücken stärker ausgeprägt als bei niedrigen Ladedrücken. Bereits bei  $\lambda = 1,50$  ist im Gegensatz zum MTU 396 kein eindeutiger Zusammenhang mehr zwischen Ladedruck und Formaldehydemissionen gegeben. Auch ist bereits bei diesem Verbrennungsluftverhältnis und einem Saugrohrdruck von 1,93bar abs. ein Anstieg der Formaldehydemissionen zu späten Zündzeitpunkten zu verzeichnen. Bei dem mageren Gemisch ( $\lambda = 1,60$ ) ist ein Anstieg der Formaldehydemissionen mit späterem Zündzeitpunkt zu sehen, ebenso verhalten sich die Gesamtkohlenwasserstoffemissionen. Ein deutliches Absinken der Formaldehyd- sowie der Gesamtkohlenwasserstoffemissionen tritt nur bei  $\lambda = 1,40$  auf. Die Formaldehydemissionen des Versuchsmotors AVL 520 LVK folgen damit tendenziell denen des MTU 396, jedoch bei einem fetteren Verbrennungsluftverhältnis. Die Ursache hierfür ist in dem am AVL 520 LVK fehlenden Abgasbehälter zu suchen, wodurch sich höhere dynamische Abgasgedrücke und damit höhere Restgasgehalte ergeben, die die Brennbedingungen verschlechtern. Siehe *Abbildung 3 a)* und *b)*.

Die Messergebnisse bestätigen die am MTU 396 gefundenen Tendenzen, dass fetteres Gemisch und größere Last die Formaldehydemissionen positiv beeinflussen. Für späte Zündzeitpunkte gilt dies eingeschränkt, da ein Ansteigen der Formaldehydemissionen zu späten Zündzeitpunkten bereits bei fetteren Verbrennungsluftverhältnissen als am MTU 396 beobachtet wird. Ursächlich hierfür sind die verschlechterten Brennbedingungen auf Grund des erhöhten Restgasgehaltes am AVL 520 LVK. Bei verbesserten Brennbedingungen (fetteres Gemisch) sinken die Formaldehydemissionen mit späterer Zündung. Auch hier führt eine Verringerung der Formaldehydemissionen tendenziell zu einem Anstieg der Stickoxidemissionen und / oder einem nicht unerheblichen Wirkungsgradverlust (*Abbildung 3 c), d)*).

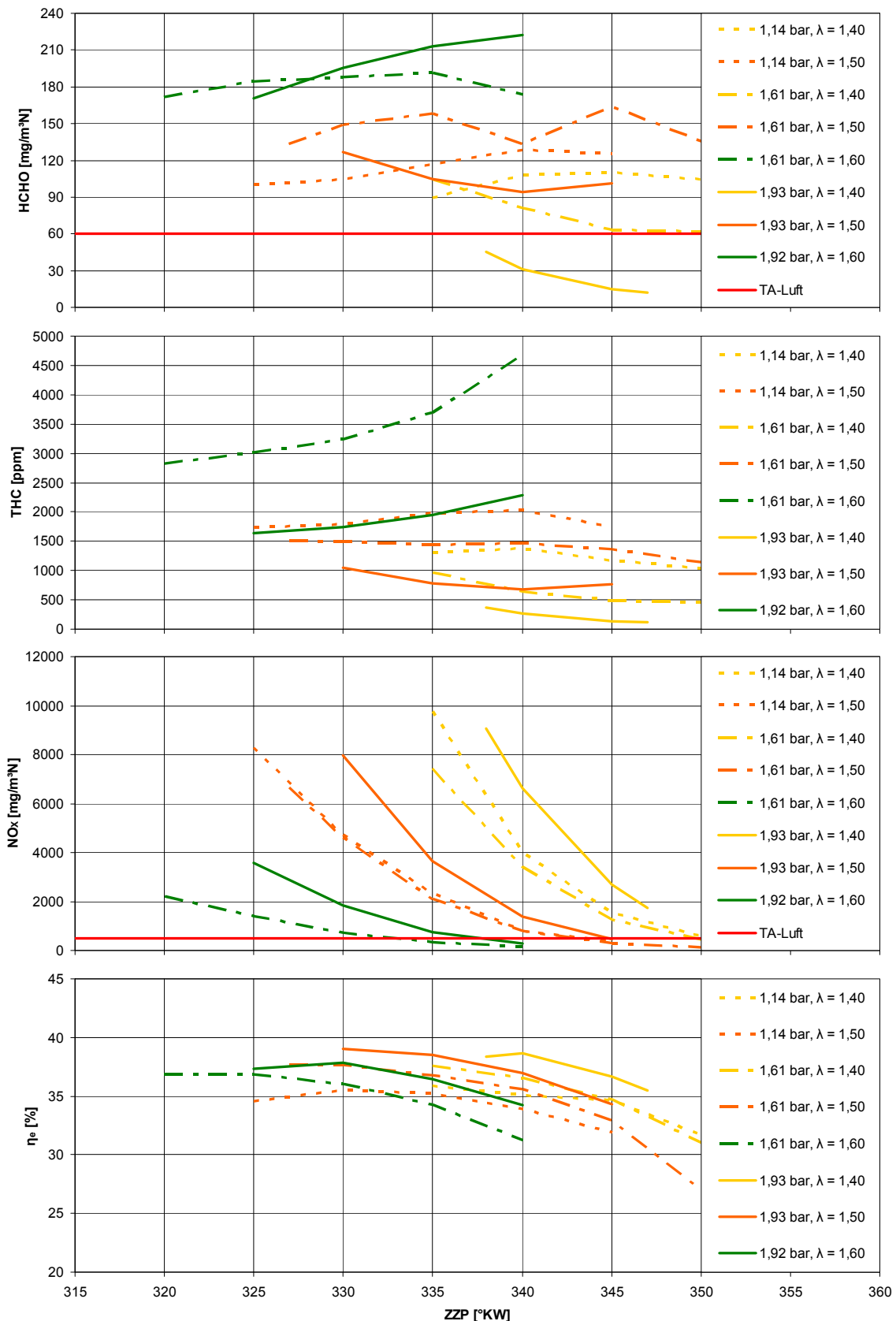


Abbildung 3: Basismessungen AVL 520 LVK; von o. nach u.: a) Formaldehyd-, b) Gesamtkohlenwasserstoff-, c) Stickoxidemissionen, d) effektiver Wirkungsgrad in Abhängigkeit von Zündzeitpunkt, Saugrohrdruck (abs.) und Verbrennungsluftverhältnis

---

## 7 Brenngasvariation

Da Gasmotoren nicht nur mit Erdgas, sondern auch mit Schwachgasen als Brennstoff betrieben werden, war es notwendig, auch deren Einfluss auf die Formaldehydemissionen zu untersuchen. Exemplarisch für die Schwachgase wurde hierfür Biogas gewählt. Um eine gleich bleibende Brenngasqualität gewährleisten zu können, wurde hierbei nicht auf reales, sondern auf simuliertes Biogas zurückgegriffen. Neben Methan und Kohlendioxid besteht Biogas im Allgemeinen aus geringen Prozentanteilen Stickstoff und Sauerstoff sowie Spurengasen wie u.a. Schwefelwasserstoff. Für die durchgeführten Untersuchungen wurde das Biogas durch eine Mischung aus Erdgas und Kohlendioxid simuliert. Durch den sehr hohen Methananteil im Erdgas ist eine unzulässige Beeinträchtigung durch andere Inhaltsgase hierbei nicht zu erwarten. Auf eine Beimischung von Stickstoff und Sauerstoff, die ja Bestandteile der Verbrennungsluft darstellen, wurde verzichtet, ebenso auf eine Beimischung von Spurengasen. Für den Motorversuch wurden zwei verschiedene Brenngasmischungen gemäß *Tabelle 4* definiert:

	Erdgas [Vol.-%]	CO <sub>2</sub> [Vol.-%]
„Biogas1“	70	30
„Biogas2“	50	50

*Tabelle 4: Brenngasmischungen, Anteil der Einzelkomponenten*

Die Brenngasvariationen wurden an beiden Forschungsmotoren durchgeführt und fanden am MTU 396 im Rahmen der Basismessungen statt. Am AVL 520 LVK wurden nach den Basismessungen auf Grund der gewonnenen Erkenntnisse sowohl am Motoraufbau als auch an der Vorgehensweise bei den Messungen Anpassungen durchgeführt. So wurde ein durchströmter Pufferbehälter in die Abgasanlage integriert und von einer Betriebsweise mit vorgegebenen Ladedrücken und Verbrennungsluftverhältnissen auf eine Betriebsweise mit gegebenen Mitteldrücken und Stickoxidemissionen gewechselt. Die Brenngasvariationen am AVL 520 LVK fanden nach diesen Änderungen, die in *Tabelle 5* aufgeführt sind, statt.

	Basismessungen	Variationen
Abgasbehälter	ohne	mit
Ladedruck $p_L$ :	= const.	= f ( $p_{mi}$ , $NO_x$ )
Verbrennungsluftverhältnis $\lambda$ :	= const.	= f ( $p_{mi}$ , $NO_x$ )
(ind.) Mitteldruck $p_{mi}$ :	= f ( $p_L$ , $\lambda$ )	$\approx$ const.
Stickoxidemissionen $NO_x$ :	= f ( $p_L$ , $\lambda$ )	$\approx$ const.

*Tabelle 5: Änderungen in Motoraufbau und Betriebsweise AVL 520 LVK*

## 7.1 Ergebnisse Brenngasvariation MTU 396

Die Brenngasvariationen wurden mit den gleichen Ladedrücken durchgeführt, wie sie auch bei den Basismessungen verwendet wurden. Die Verbrennungsluftverhältnisse wurden dabei dahingehend verändert, dass sich für die Biogasversuche in etwa der gleiche Gemischheizwert des Frischgases einstellte wie bei den Basismessungen. Die sich dabei ergebenden Verbrennungsluftverhältnisse sind in *Tabelle 6* dargestellt.

Erdgas	Biogas1
$\lambda = 1,50$	$\lambda = 1,43$
$\lambda = 1,60$	$\lambda = 1,53$
$\lambda = 1,65$	$\lambda = 1,58$

*Tabelle 6: Verbrennungsluftverhältnisse Erdgas / Biogas1 für gleichen Gemischheizwert*

Es wurden Saugrohrdrücke von 1,23bar abs. und 1,63bar abs. untersucht. Bei der Variation der Ladedrücke konnten nicht alle Verbrennungsluftverhältnisse untersucht werden (siehe *Tabelle 7*). Die Kombination des geringeren Ladedrucks mit dem magersten Gemisch konnte nicht untersucht werden, da ein aussetzerfreier Motorlauf nicht zu erreichen war. Ein Betrieb des Motors mit dem höheren Ladedruck und fettestem Gemisch war deshalb nicht möglich, weil mit der vorhandenen Gaseinblasung nicht die erforderliche Brenngasmenge zugemischt werden konnte. Aus diesem Grund konnten auch keine Versuche mit Biogas2 durchgeführt werden,

da dessen durch den im Vergleich mit Biogas1 höherer Kohlendioxidgehalt einen nochmals höheren Brenngasdurchsatz bedingt.

	$p_{SR} = 1,23\text{bar abs.}$	$p_{SR} = 1,63\text{bar abs.}$
$\lambda = 1,43$	Biogas1	XXX
$\lambda = 1,53$	Biogas1	Biogas1
$\lambda = 1,58$	XXX	Biogas1

Tabelle 7: Kombination von Saugrohrdrücken und Verbrennungsluftverhältnissen mit den jeweiligen Brenngasen

Ein Vergleich der Formaldehydemissionen über dem Zündzeitpunkt liefert bei einem Saugrohrdruck von  $p_{SR} = 1,23\text{bar abs.}$  qualitativ gleiche Verläufe für Erdgas und „Biogas1“. Bei fetterem Gemisch zeigt sich auch bei „Biogas1“ der charakteristische auf- und absteigende Verlauf bei zunehmender Spätverstellung des Zündzeitpunktes. Bei magerem Gemisch ist ein leichter Abfall, gefolgt von einem signifikanten Anstieg zu späten Zündzeitpunkten zu erkennen (Abbildung 4).

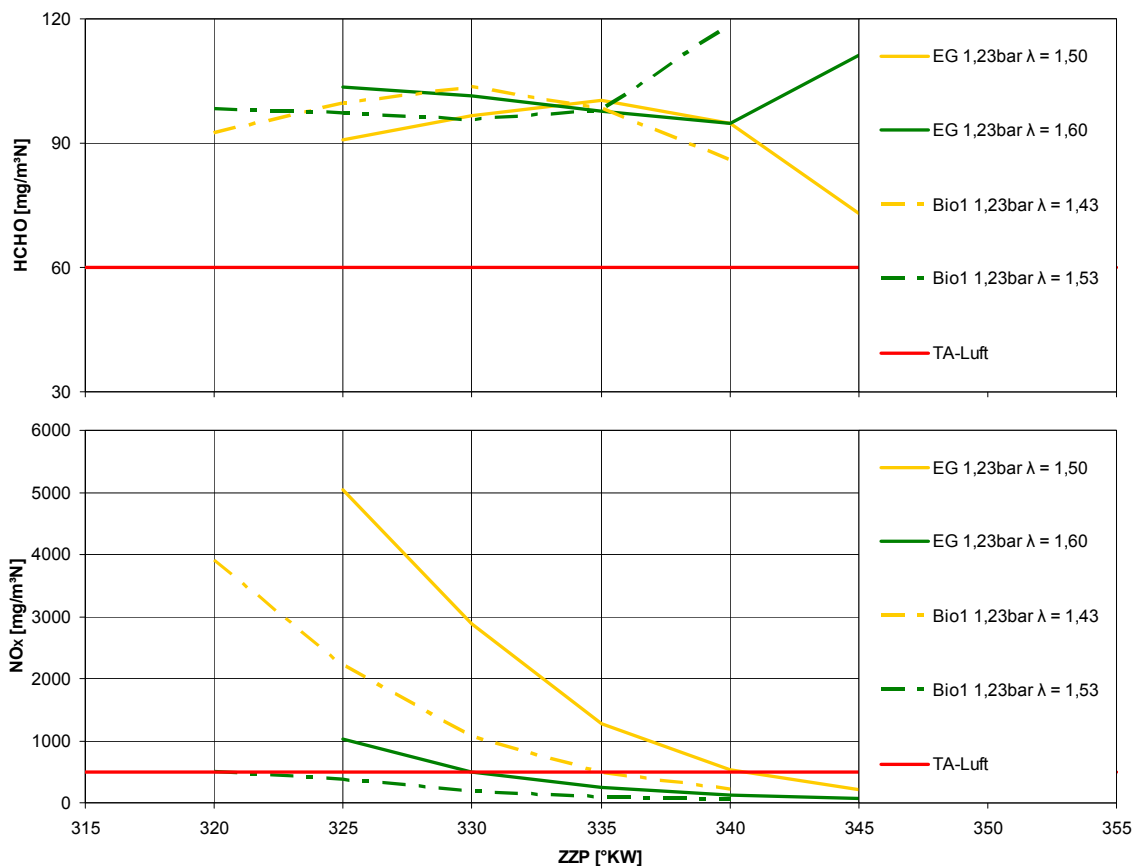
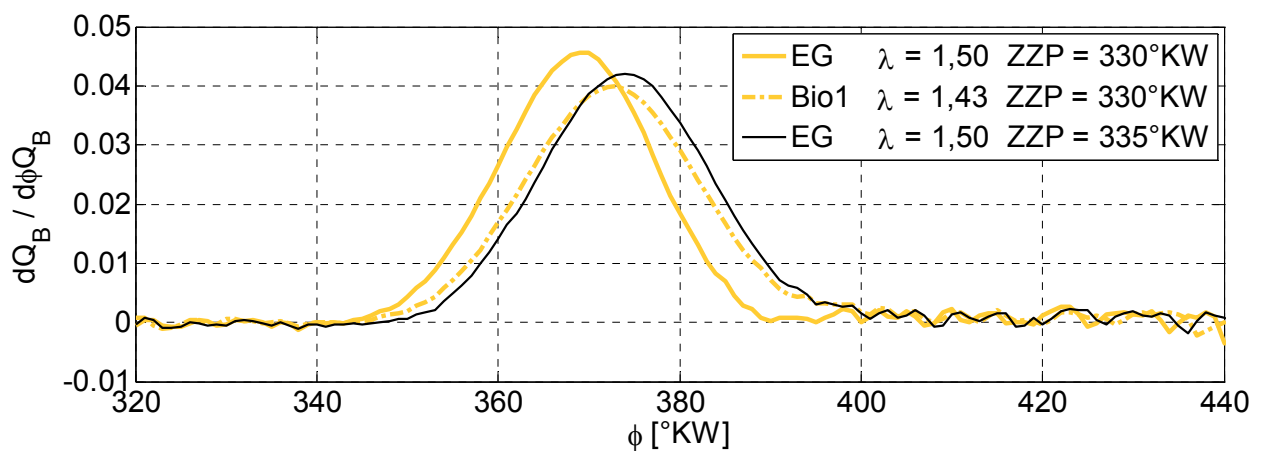


Abbildung 4: Brenngasvariation MTU 396;  $p_{SR} = 1,23\text{ bar abs.}$ : Formaldehyd- (oben) und Stickoxidemissionen

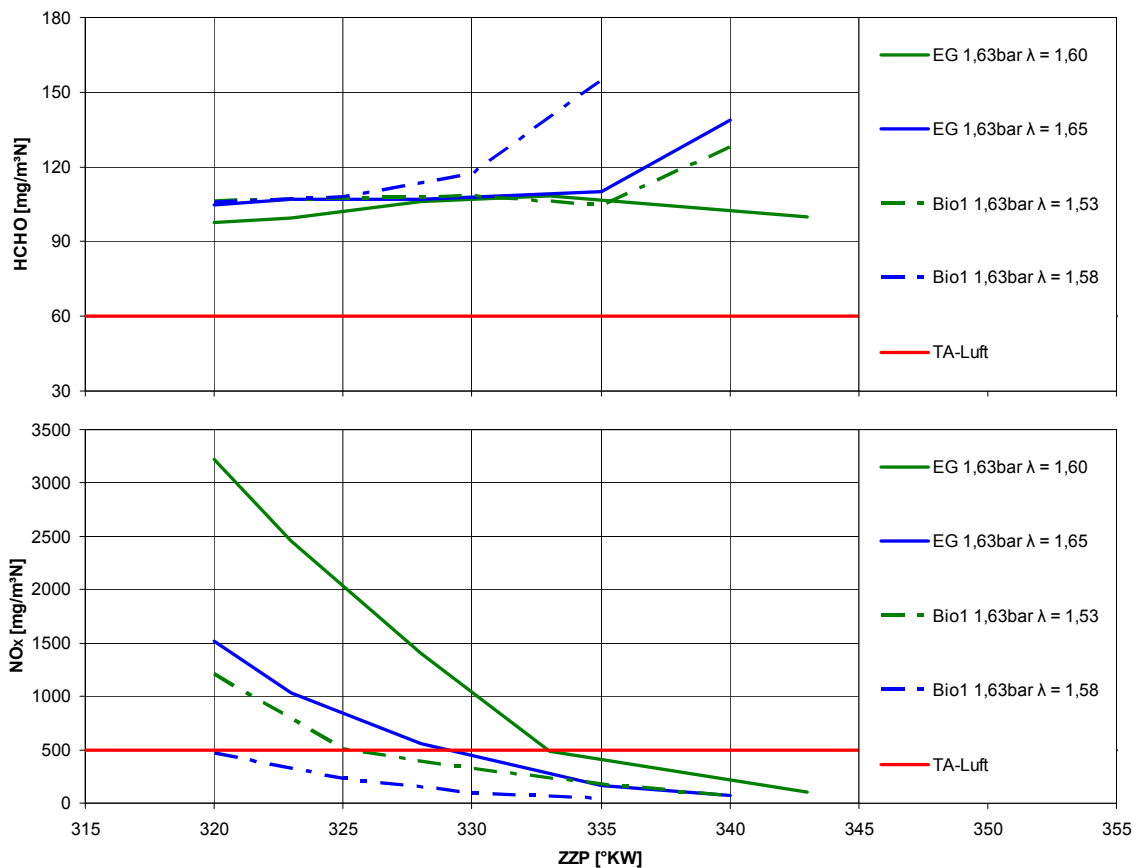
Die absolute Höhe der Emissionen ist für Erdgas und „Biogas1“ in etwa gleich, jedoch ist der Verlauf bei der Erdgas-Kohlendioxid-Mischung um ca. 5°KW in Richtung früherer Zündzeitpunkte verschoben. Auch für die Stickoxidemissionen ist eine Verschiebung in Richtung früherer Zündzeitpunkte festzustellen. Dies kann nicht auf die geänderte Brenngaszusammensetzung zurückgeführt werden, da zum Einen der Gemischheizwert konstant gehalten wurde und somit für beide Brenngase das gleiche Temperaturniveau im Brennraum zu erwarten ist. Zum Anderen ist die dadurch erfolgte Anfettung nicht so gravierend, dass sich für die Stickoxidentstehung relevante Änderungen der Sauerstoff- oder Stickstoffkonzentration ergeben. Die Ursache für das unterschiedliche Verhalten der Stickoxidemissionen ist folglich in den Brennverläufen zu suchen.

Für eine genauere Betrachtung der Brennverläufe wurde ein Zündzeitpunkt von ZZP = 330°KW gewählt; bei diesem Zündzeitpunkt treten für  $\lambda = 1,43$  im Biogasbetrieb die höchsten Formaldehydemissionen auf. In *Abbildung 5* ist zu sehen, dass die Biogasmischung einen deutlich höheren Zündverzug und demzufolge auch einen deutlich späteren Verbrennungsschwerpunkt aufweist als reines Erdgas. Der zusätzlich dargestellte Brennverlauf für Erdgas bei einem um 5°KW späteren Zündzeitpunkt hingegen deckt sich weitestgehend mit dem Brennverlauf der Biogasmischung. Die Verschiebung der Emissionsverläufe zu früheren Zündzeitpunkten hin ist folglich auf die geänderten Brennbedingungen durch den hohen Kohlendioxidanteil zurückzuführen. Ein signifikanter Einfluss auf die absolute Höhe der Formaldehydemissionen ist nicht zu erkennen.



*Abbildung 5: Brenngasvariation MTU 396;  $p_{SR} = 1,23$  bar: Brennverläufe*

Für einen Ladedruck von  $p_{SR} = 1,63\text{bar}$  gilt das bereits Gesagte. Für die Emissionsverläufe sei hier darum weiters unkommentiert auf *Abbildung 6* verwiesen.



*Abbildung 6: Brenngasvariation MTU 396;  $p_{SR} = 1,63\text{ bar}$  abs.: Formaldehyd- (oben) und Stickoxidemissionen*

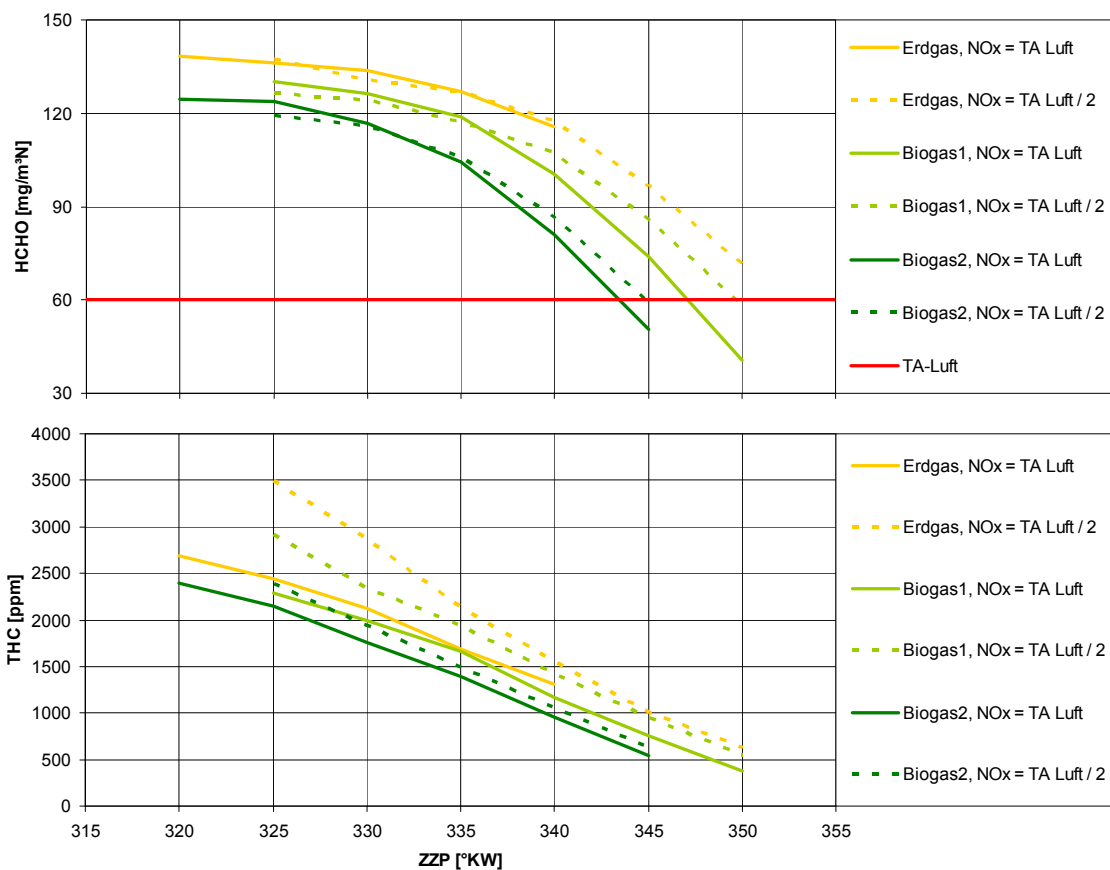
## 7.2 Ergebnisse Brenngasvariation AVL 520 LVK

Im Gegensatz zu den Versuchen am MTU 396 wurden die Brenngasvariationen am LVK 520 AVL nicht bei konstanten Ladedrücken und Verbrennungsluftverhältnissen durchgeführt, sondern bei konstanten Mitteldrücken und Stickoxidemissionen. Vorteil dieser Art der Betriebspunkteinstellung ist die dadurch mögliche Abschätzung der bei real gegebenen Randbedingungen – Motorlast einerseits und Einhaltung der gesetzlich vorgeschriebenen Stickoxidgrenzwerte andererseits – erreichbaren Formaldehydemissionen.

Die Untersuchungen wurden für indizierte Mitteldrücke von  $p_{mi} = 10\text{bar}$  und  $p_{mi} = 15\text{bar}$  durchgeführt. Die Stickoxidgrenzwerte wurden gemäß TA Luft für Gasmotorenanlagen mit einer Feuerungswärmeleistung von mehr als 3MW gewählt. Hieraus resultiert eine maximale Stickoxidemission von  $500\text{mg/m}^3\text{N}$ . Diese Grenze ist

insofern sinnvoll, da bereits Gasmotorenanlagen mit zwei Zwölfzylindermotoren von je 2l Zylinderhubvolumen an diese Grenze reichen. Zusätzlich wurden Betriebspunkte mit auf die Hälfte der TA Luft-Grenzwerte verringerten Stickoxidemissionen untersucht.

Bei beiden Mitteldrücken sind sowohl für Erdgas als auch für die beiden Biogasmischungen die gleichen Tendenzen festzustellen. In allen Fällen bilden die Formaldehydemissionen bei frühen Zündzeitpunkten ein Plateau, um zu späten Zündzeitpunkten hin zu sinken. Im Gegensatz zu den Versuchen mit konstantem Ladedruck und Verbrennungsluftverhältnis ist weder ein signifikantes Absinken der Formaldehydemissionen zu sehr frühen, noch ein deutlicher Anstieg zu sehr späten Zündzeitpunkten festzustellen (*Abbildung 7*).



*Abbildung 7: Brenngasvariation AVL 520 LVK;  $p_{mi} = 10\text{bar}$ : Formaldehyd- (oben) und Gesamtkohlenwasserstoffemissionen*

Bei den Basismessungen hatten sehr frühe Zündzeitpunkte bei konstantem Verbrennungsluftverhältnis zu niedrigen Formaldehyd- und hohen Stickoxidemissionen geführt. Ebenso wurde ein Anstieg der Formaldehydemissionen bei Abmagern des Gemisches und konstantem Ladedruck eindeutig nachgewiesen. Bei

den Brenngasvariationen wurde das Gemisch mit Frühverstellung des Zündzeitpunktes abgemagert, um die Stickoxidemissionen konstant zu halten. Dieses Abmagern führt dazu, dass die Formaldehydemissionen zu sehr frühen Zündzeitpunkten hin nicht absinken, sondern ein ausgeprägtes Plateau bilden.

Im Gegensatz dazu kann bei sehr späten Zündzeitpunkten das Gemisch angefettet werden, ohne dass die Stickoxidgrenzwerte überschritten werden. Die dadurch verbesserten Brennbedingungen wirken einem vorzeitigen Verlöschen der Flamme entgegen. Damit steigen die Formaldehydemissionen bei sehr späten Zündzeitpunkten, anders als bei den Versuchen mit konstantem Verbrennungsluftverhältnis und konstantem Ladedruck, nicht an.

Die Gesamtkohlenwasserstoffemissionen fallen mit Spätverstellung des Zündzeitpunktes stetig. Ein über dem Zündzeitpunkt konstanter Verlauf, wie bei den Basismessungen bei frühen Zündzeitpunkten zu sehen, tritt nicht auf. Ursächlich hierfür ist das Abmagern des Gemisches bei Frühzündung. Die verschlechterten Brennbedingungen führen zu höheren Kohlenwasserstoffemissionen.

Die Anwesenheit von Kohlendioxid im Brenngas führt zwar, wie in *Abbildung 5* zu sehen, zu einer Verschlechterung der Brennbedingungen. Allerdings ermöglicht Kohlendioxid in seiner Eigenschaft als Temperatur senkendes Ballastgas auch eine Anfettung des Gemisches, ohne dass die Stickoxidemissionen steigen. Dadurch werden die Brennbedingungen verbessert und die Brennverläufe der drei Brenngase liegen fast deckungsgleich aufeinander, s. .

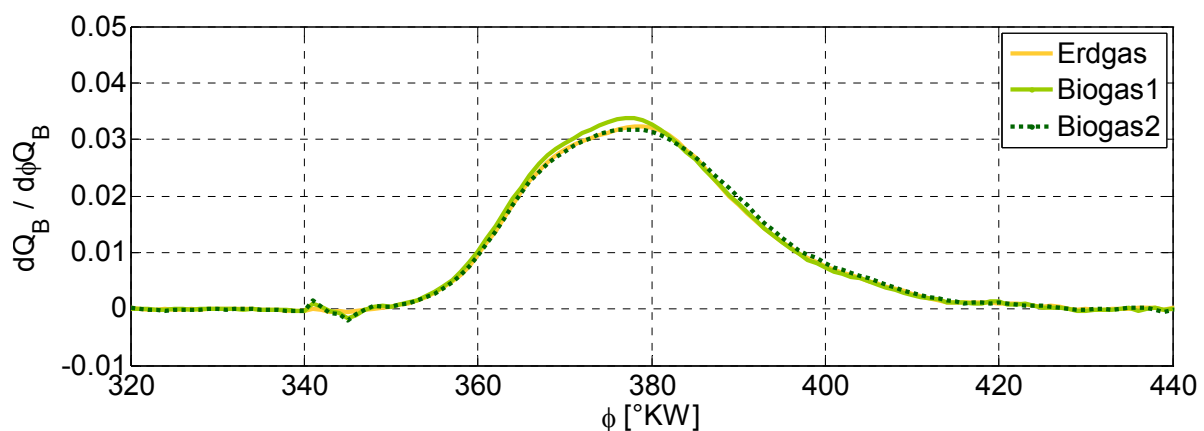
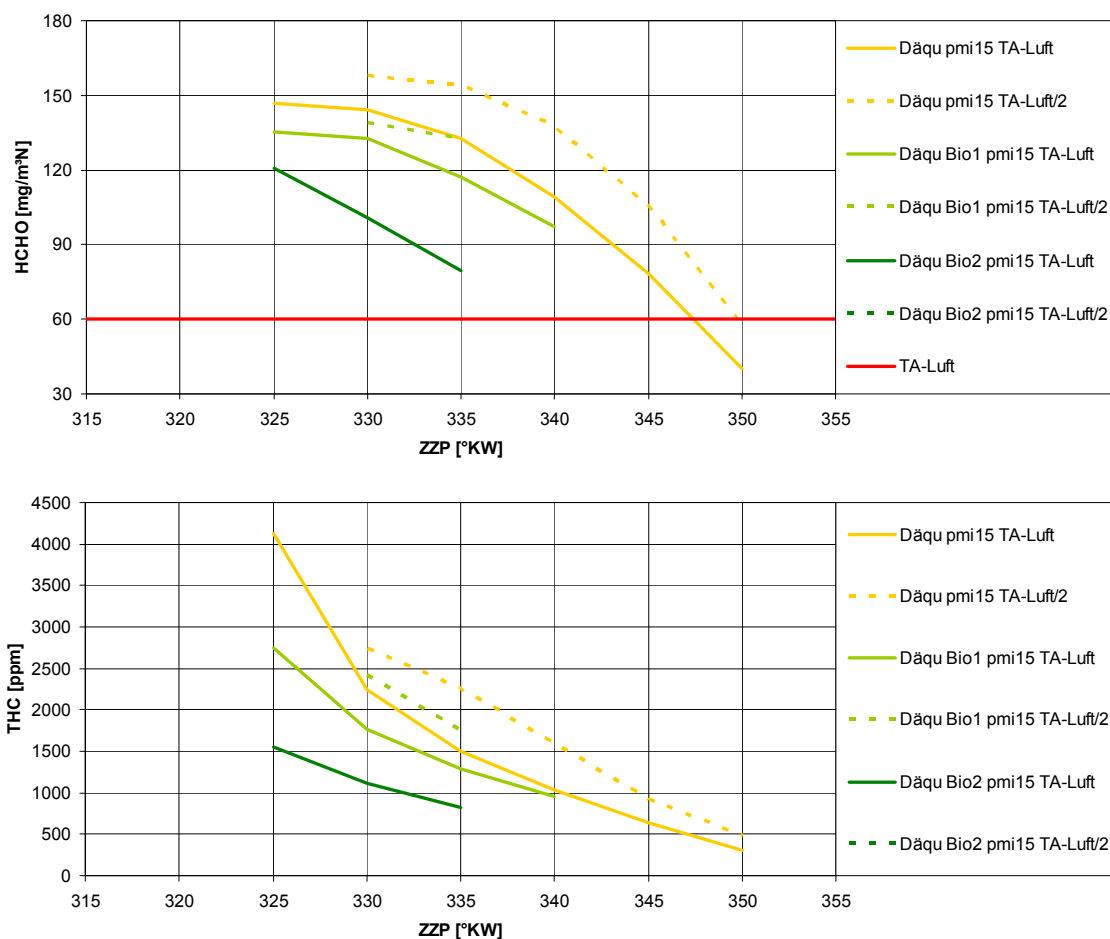


Abbildung 8: Brenngasvariation AVL 520 LVK;  $p_{mi} = 10\text{bar}$ : Brennverläufe  $\text{NO}_x = \text{TA Luft}$

Das führt dazu, dass sich im qualitativen Verlauf der Formaldehydemissionen über dem Zündzeitpunkt kein Unterschied zwischen Erdgas und den Biogasmischungen ausmachen lässt. Quantitativ betrachtet liegen die Emissionen bei „Biogas1“ niedriger als bei Erdgas, die von „Biogas2“ noch niedriger. Ursächlich hierfür ist in erster Linie der geringere Restsauerstoffgehalt im Abgas der Biogasmischungen, der von den fetteren Gemischen herrührt.

Bei indizierten Mitteldrücken von  $p_{mi} = 15\text{bar}$  konnten für die Biogasmischungen auf Grund von Zündaussetzern nur wenige Zündwinkel untersucht werden. Dennoch zeigen sich die gleichen Tendenzen wie bei  $p_{mi} = 10\text{bar}$ . Die Biogasmischungen weisen sowohl geringere Gesamtkohlenwasserstoff- als auch Formaldehydemissionen auf; ihre Verläufe über dem Zündwinkel sind in *Abbildung 9* dargestellt.



*Abbildung 9: Brenngasvariation AVL 520 LVK;  $p_{mi} = 15\text{bar}$ : Formaldehyd- (oben) und Gesamtkohlenwasserstoffemissionen*

## 8 Motorparameter

Neben dem Einfluss der allgemeinen Betriebsparameter und der Brenngaszusammensetzung wurden verschiedene Motorparameter hinsichtlich ihres Einflusses auf die Formaldehydemissionen untersucht. Zusätzlich zu Kühlwasser- und Ladelufttemperatur, welche im Grunde ohne konstruktive Maßnahmen am Motor selbst geändert werden können, wurden hierbei auch Parameter untersucht, die an ausgeführten Motoren ohne konstruktive Maßnahmen nicht geändert werden können. Hierbei wurden verschiedene Turbineneintrittsdrücke (abhängig vom Turboladerwirkungsgrad), Ladungsbewegungen (Drallniveaus), Verdichtungsverhältnisse, ein Kolben mit erhöhtem Feuerstegvolumen sowie ein Kolben mit radikal geänderter Brennraumgeometrie untersucht. Die Messungen über den Einfluss des Turbineneintrittsdruckes wurden an beiden Motoren durchgeführt, die weiteren Untersuchungen nur am AVL 520 LVK. Der Einfluss von Kühlwassertemperatur, Ladelufttemperatur und Turbineneintrittsdruck wurde zum Teil im Rahmen der Basismessungen untersucht.

Variation	MTU 396	AVL 520 LVK
Turbineneintrittsdruck	1,129... 1,539bar abs. ( $\eta_{ATL} = 60... 310\%$ )	1,119... 2,609bar abs. ( $\eta_{ATL} = 48... 432\%$ )
Kühlwassertemperatur	XXX	60...103°C
Ladelufttemperatur	XXX	50... 90°C
Drall	XXX	D = 1,37 D = 1,49 (Standard) D = 0,43
Verdichtungsverhältnis	XXX	$\epsilon = 12 / 15$
Feuerstegvolumen	XXX	verdoppelt
Brennraumgeometrie	XXX	Linse statt Kegelstumpf

*Tabelle 8: Geänderte Motorparameter und Ausprägung*

---

## 8.1 Variation des Turbineneintrittsdruckes

Bei beiden Motoren wurde eine Variation des Turbineneintrittsdruckes untersucht. Da die Forschungsmotoren fremd aufgeladen wurden, erfolgte die Einstellung des Turbineneintrittsdruckes mit einer gesteuerten Abgasklappe. Die ersten Untersuchungen wurden zusammen mit den Basismessungen bei Ladedrücken von 1,6 und 1,9 bar abs. durchgeführt. Am AVL 520 LVK wurden zudem nach Montage des Abgasbehälters die Turbineneintrittsdrücke ausgehend von Referenzpunkten bei Mittelldrücken von  $p_{mi} = 10\text{bar}$  bzw.  $p_{mi} = 15\text{bar}$  vermessen. Bei diesen Untersuchungen wurden der Ladedruck und das Verbrennungsluftverhältnis konstant gehalten, so dass sich die indizierten Mittelldrücke und die Stickoxidemissionen über der Variation des Turbineneintrittsdrucks veränderten. Bei den Versuchen am MTU 396 wurden die Turbineneintrittsdrücke maximal bis zu den Ansaugdrücken erhöht, um eventuelle Rückzündungen in den mit Frischgas gefüllten Einlassbehälter zu vermeiden. Dieser Behälter ist mit einer Berstscheibe abgesichert, so dass bei einer Rückzündung mit einem Ansprechen der Berstscheibe und daraus resultierend einem Erliegen des Prüfstandsbetriebes bis zu deren Austausch gerechnet werden musste. Der Pufferbehälter im Ansaugtrakt des AVL 520 LVK ist mit einem Überdruckventil abgesichert, so dass ein Rückzünden keine weiterreichenden Folgen für den Prüfstandsbetrieb zur Folge hat. Deshalb konnten hier Turbineneintrittsdrücke untersucht werden, die zum Teil deutlich über den Saugrohrdrücken lagen.

	MTU 396	AVL 520 LVK
	$p_{TLein}$ [bar abs.]	$p_{TLein}$ [bar abs.]
$p_{SR} = 1,6$ bar abs.	1,129... 1,539	1,232... 1,622
$p_{SR} = 1,9$ bar abs.	XXX	1,333... 1,823
$p_{mi} = 10$ bar	XXX	1,119... 1,689
$p_{mi} = 15$ bar	XXX	1,259... 2,609

*Tabelle 9: Bandbreite der Turbineneintrittsdrücke*

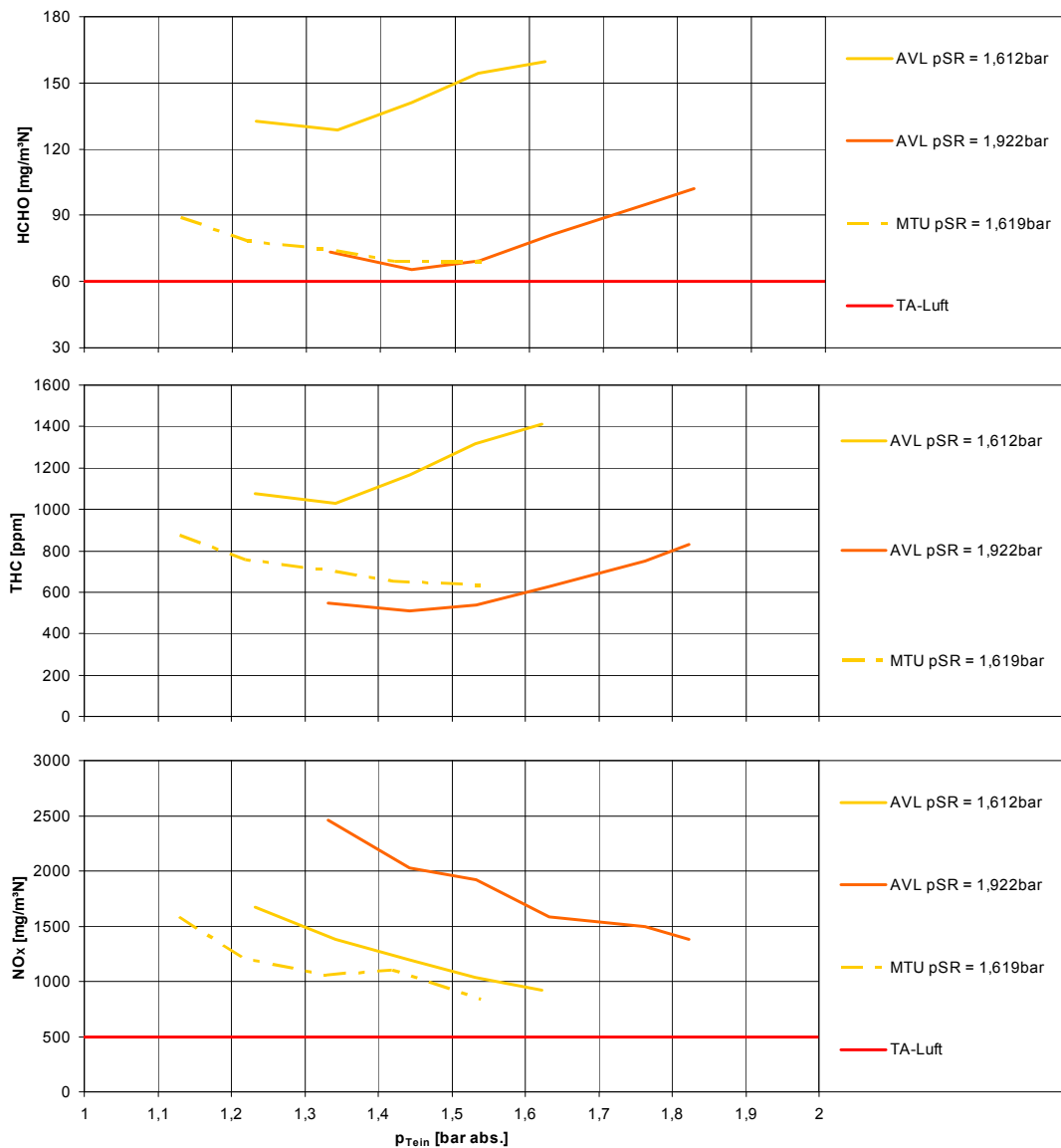


Abbildung 10: Verläufe der Formaldehyd-, Gesamtkohlenwasserstoff- und Stickoxidemissionen bei Turbineneintrittsdruckvariation; Basismessungen

Die Verläufe der Formaldehyd- und Gesamtkohlenwasserstoffemissionen bei dem Forschungsmotor AVL 520 LVK zeigen zu steigenden Turbineneintrittsdrücken hin eine deutlich steigende Tendenz, gleichzeitig fallen die Stickoxidemissionen. Die Ursache hierfür ist in verschlechterten Brennbedingungen auf Grund höherer Restgasgehalte zu suchen. Die Emissionen des Forschungsmotors MTU 396 sind deutlich geringer als die des AVL-Motors bei gleichen Bedingungen. Zu niedrigen Turbineneintrittsdrücken hin steigen die Formaldehydemissionen an. Geht man davon aus, dass bei niedrigen Turbineneintrittsdrücken eine bessere Spülung auftritt, wodurch sich der Restgasgehalt verringert und die Brennbedingungen verbessern, so ist tendenziell mit sinkenden Gesamtkohlenwasserstoffemissionen zu rechnen.

---

Dies deutet darauf hin, dass deren Anstieg nicht auf eine Änderung der Brennbedingungen zurückzuführen ist, sondern auf ein Überströmen von Frischladung in den Abgastrakt während der Ladungswechselphase. Die in gleicher Tendenz steigenden Formaldehydemissionen lassen dabei die Möglichkeit der Formaldehydbildung aus in den Abgastrakt gelangendem Frischgas möglich erscheinen. Die steigende Tendenz zu niedrigen Turbineneintrittsdrücken war vor allem am MTU 396 festzustellen. Da der AVL 520 LVK zu diesem Zeitpunkt noch nicht über einen Auslassbehälter verfügte, wurden nach dessen Montage nochmals Messungen zu den Turbineneintrittsdrücken durchgeführt. Die dadurch sinkenden dynamischen Abgasdrücke sollten für eine verbesserte Durchspülung sorgen, wodurch auch für diesen Motor ein Ansteigen der Formaldehydemissionen bei sehr niedrigen Abgasgedrücken erwartet wurde.

Analog den im gleichen Zeitraum durchgeführten Brenngasvariationen wurden als Ausgangspunkte für die Versuche Betriebspunkte mit  $p_{mi} = 10\text{bar}$  und  $p_{mi} = 15\text{bar}$ , sowie  $\text{NO}_x = 500\text{mg/m}^3_{\text{N}}$  gewählt. Verbrennungsluftverhältnis, Saugrohrdruck und Zündzeitpunkt wurden konstant gehalten und der Turbineneintrittsdruck variiert.

Die Formaldehydemissionen liegen für beide Mitteldrücke absolut auf einem höheren Niveau als bei den ersten Versuchen zum Turbineneintrittsdruck und  $p_L = 1,92\text{ bar abs.}$  ( $p_{mi} \approx 12...13\text{bar}$ ), jedoch unter denen bei  $p_L = 1,61\text{ bar abs.}$  ( $p_{mi} \approx 10...11\text{ bar}$ ). Die Stickoxidemissionen sind dabei deutlich niedriger. Für beide Mitteldrücke ist ein stetiger Anstieg der Formaldehydemissionen zu steigenden Turbineneintrittsdrücken zu erkennen. Die Stickoxidemissionen verhalten sich dazu konträr. Die Ursache für die Emissionsverläufe ist der mit steigendem Turbineneintrittsdruck steigende Restgasgehalt. Die Brennbedingungen verschlechtern sich dadurch, die Formaldehyd- und Kohlenwasserstoffemissionen steigen, die Stickoxidemissionen sinken. Bei fehlendem Auslassbehälter steigt die Restgasmenge mit steigendem Turbineneintrittsdruck überproportional an, was zu steileren Gradienten in den Verläufen der Kohlenwasserstoff- und Formaldehydemissionen führt. Ein nennenswertes Überströmen von Frischladung in den Abgastrakt ist nicht zu erkennen, lediglich bei  $p_{mi} = 15\text{bar}$  und sehr niedrigen Turbineneintrittsdrücken steigen die Gesamtkohlenwasserstoffemissionen mit sinkenden Turbineneintrittsdrücken (*Abbildung 11*).

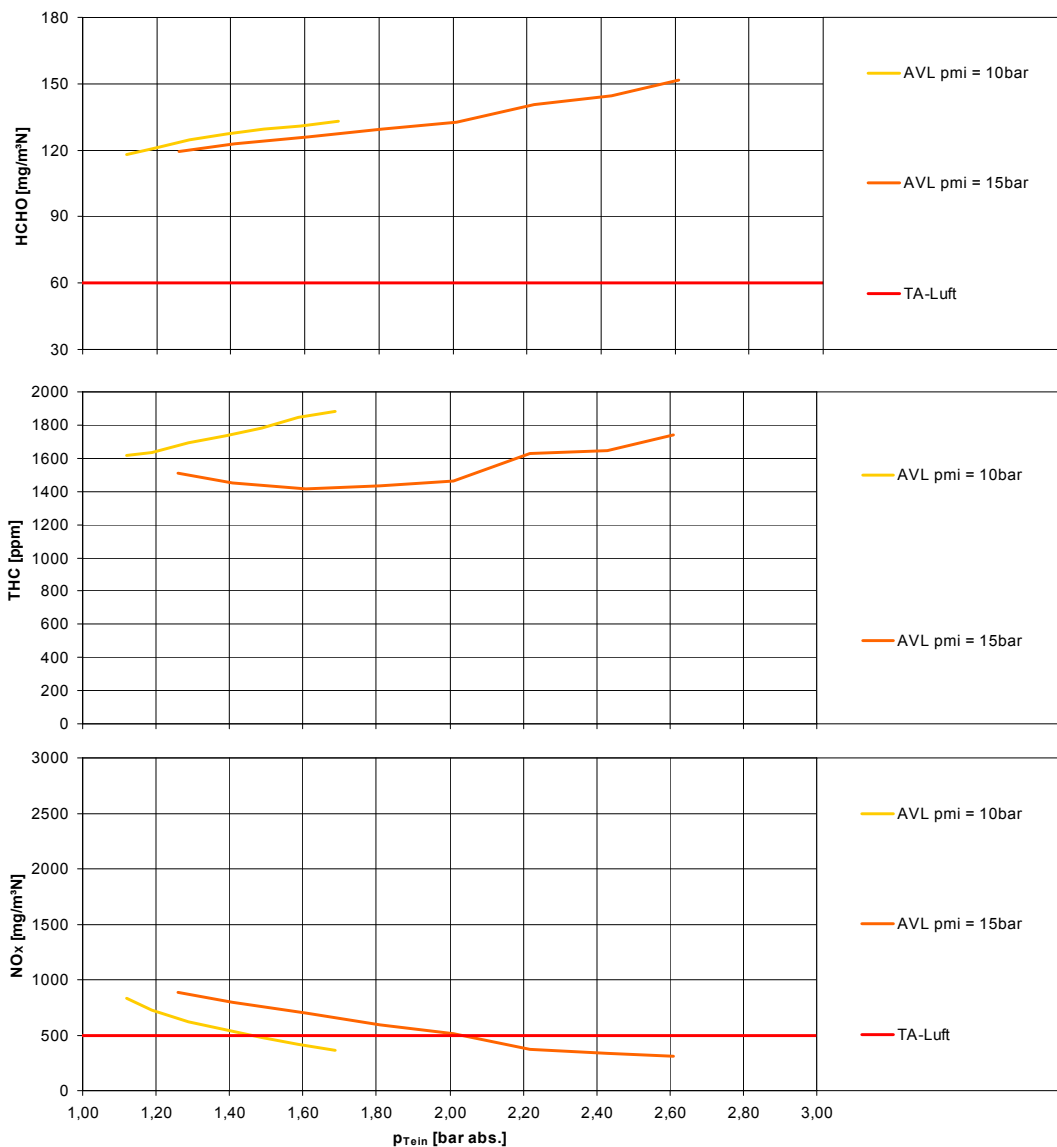


Abbildung 11: Verläufe der Formaldehyd-, Gesamtkohlenwasserstoff- und Stickoxidemissionen bei Turbineneintrittsdruckvariation; Nachmessungen

Die Bildung von Formaldehyd durch in den Abgastrakt übergeschobenes Frischgas war mit dem Forschungsmotor AVL 520 LVK nicht nachzuweisen. Es ist davon auszugehen, dass die Ventilüberschneidungsphase bei diesem Motor auch bei großen positiven Spülgefälle zu kurz ist, um nennenswerte Frischgasmengen überzuschieben.

In einer letzten Versuchsreihe wurde das Verhalten auf eine Anpassung des Verbrennungsluftverhältnisses untersucht, um auch bei geänderten Turbineneintrittsdrücken konstante Stickoxidemissionen zu erhalten (siehe *Abbildung 12*). Die Stickoxidemissionen der  $\lambda$ -korrigierten Betriebspunkte treffen nicht ganz die Vorgabe von  $500\text{mg/m}^3_{\text{N}}$ . Dennoch ist die Tendenz festzustellen, dass potentielle

Verbesserungen in den Formaldehydemissionen durch die notwendige Anpassung des Verbrennungsluftverhältnisses überkompensiert wird.

Eine signifikante Verbesserung des Emissionsverhaltens bezüglich Formaldehyd auf Grund einer Änderung des Turbineneintrittsdrucks / Turboladerwirkungsgrades ist folglich nicht möglich.

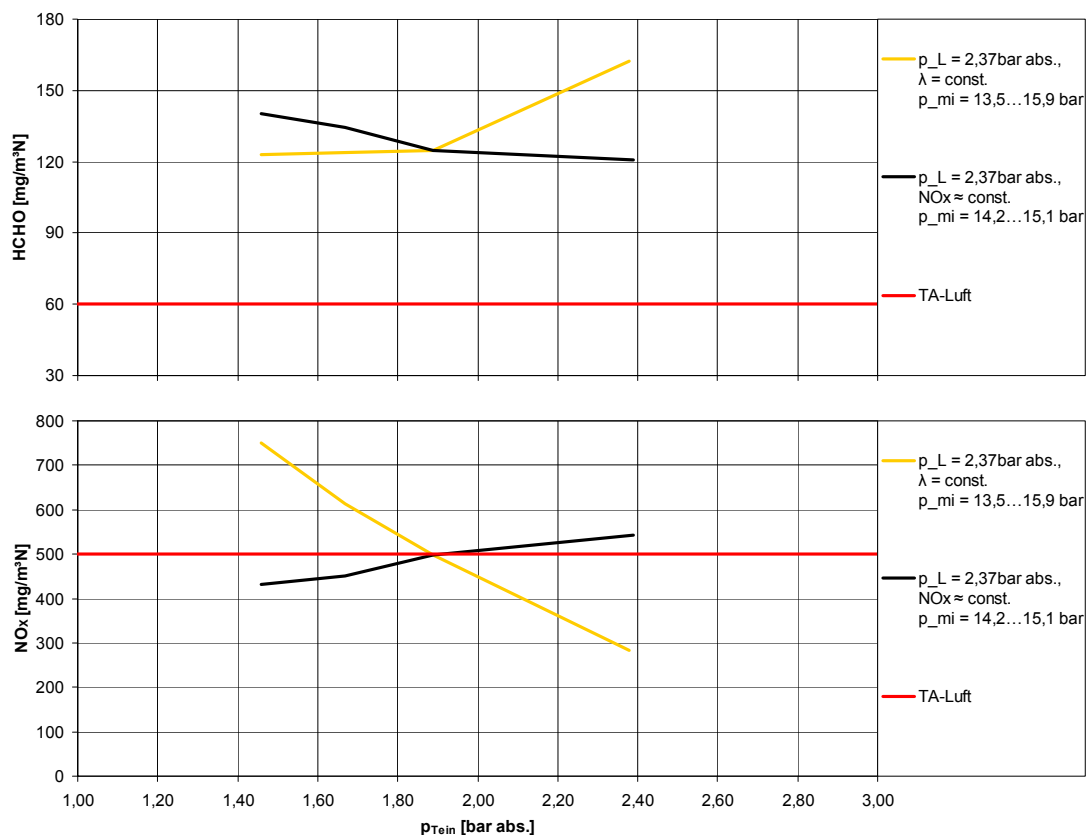


Abbildung 12: Verläufe der Formaldehyd-, und Stickoxidemissionen bei Turbineneintrittsdruckvariation;  $p_L = \text{const.}$ ,  $\lambda = \text{const.}$

## 8.2 Variation der Kühlwassertemperatur

Um den Einfluss der Bauteiltemperatur auf die Formaldehydemissionen zu bestimmen, wurden die Kühlwasser- und Öltemperatur ausgehend von 80°C um 20°C nach oben und unten variiert. Dabei führte eine Veränderung der Fluidtemperaturen um 20°C zu einer Änderung der wandnahen Bauteiltemperaturen um ca. 10°C.

Mit steigenden Fluidtemperaturen sinken die Formaldehydemissionen. So führt eine Erhöhung von Öl- und Wassertemperatur um 40°C zu einer Verringerung der Formaldehydemissionen um 10mg/m<sup>3</sup>N, was einer Senkung um 7% bis 10%

entspricht (Abbildung 13). Gleichzeitig steigen jedoch die Stickoxidemissionen um ca.  $200\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ , entsprechend einem Anstieg von ca. 20% bis ca. 50%. Es wurde nicht untersucht, wie sich die Formaldehydemissionen bei Variation der Fluidtemperaturen unter gleichzeitiger Konstanzhaltung der Stickoxidemissionen verhalten. Die nur geringe Änderung der Formaldehydemissionen bei gleichzeitig erheblich stärkerem Anstieg der Stickoxidemissionen zeigt jedoch, dass eine höhere Kühl- und Schmiermitteltemperatur kein geeignetes Instrument für eine Verringerung der Formaldehydemissionen darstellt.

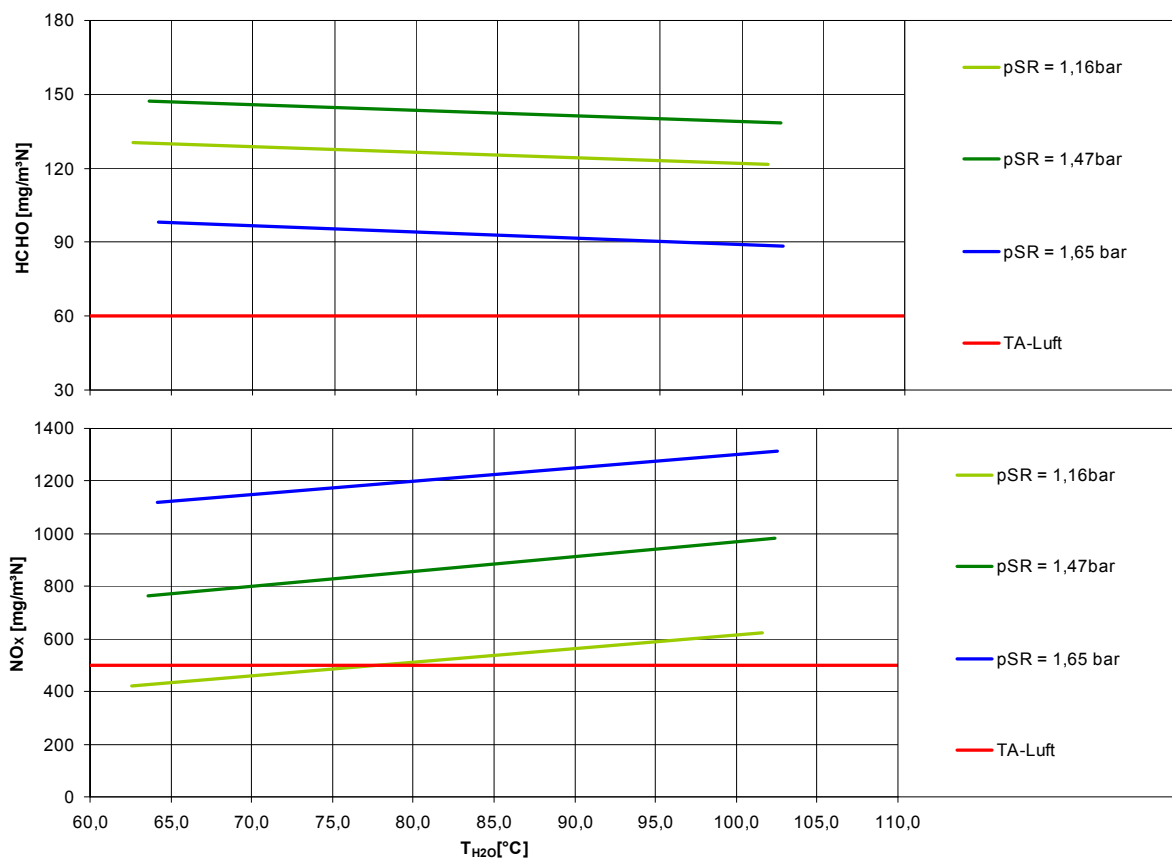


Abbildung 13: Formaldehyd- und Stickoxidemissionen bei Variation der Fluidtemperaturen

### 8.3 Variation der Frischgastemperatur

Für die Variation der Frischgastemperatur wurde ein Betriebspunkt mit Biogas untersucht. Der indizierte Mitteldruck lag bei  $p_{mi} = 15\text{bar}$ , die Stickoxidemissionen bei  $500\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$ . Die Frischgastemperatur wurde ausgehend von  $50^\circ\text{C}$  über  $70^\circ\text{C}$  auf  $90^\circ\text{C}$  angehoben. Die Formaldehydemissionen verhalten sich dabei tendenziell wie bei einer Erhöhung der Fluidtemperaturen. Bedingt durch das nicht nur in Wandnähe, sondern im ganzen Brennraum erhöhte Temperaturniveau, fallen hier jedoch sowohl die Verringerung der Formaldehydemissionen, als auch der Anstieg der Stickoxidemissionen erheblich stärker aus. Wird das Gemisch abgemagert, um die Stickoxidemissionen auf das Ausgangsniveau zu reduzieren, steigen die Formaldehydemissionen tendenziell mit der Gemischtemperatur an, wie in den Diagrammen in *Abbildung 14* zu sehen ist. Somit stellt auch die Frischgastemperatur kein geeignetes Instrument dar, die Formaldehydemissionen abzusenken.

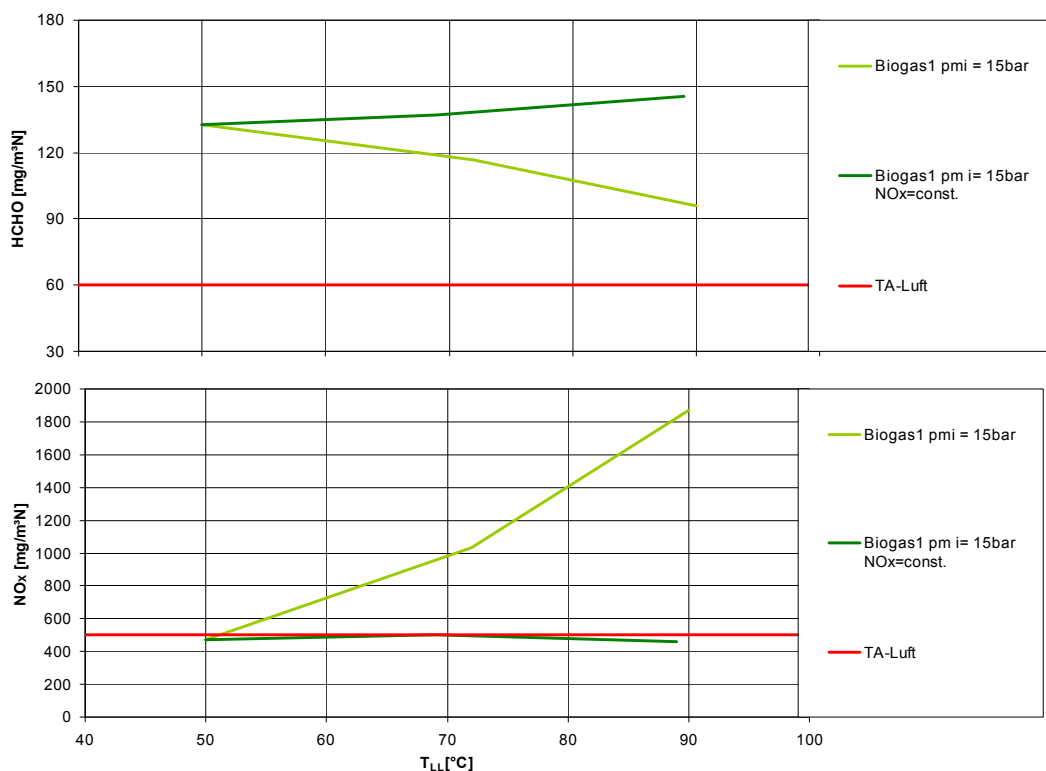


Abbildung 14: Formaldehyd- und Stickoxidemissionen bei Variation der Frischgastemperatur



---

Der Zylinderkopf des Forschungsmotors AVL 520 LVK ist zur Drallerzeugung mit einem Spiral-Einlasskanal ausgestattet. Damit die Intensität des Dralls eingestellt werden kann, verfügt der Zylinderkopf über ein Schirmventil im Einlasskanal (*Abbildung 16*). Durch den Schirm wird die Strömung umgelenkt, so dass mit einer Verdrehung des Ventils und damit des Schirms die Drallzahl in einem Bereich von  $-1,62 \leq D \leq 5,75$  eingestellt werden kann.

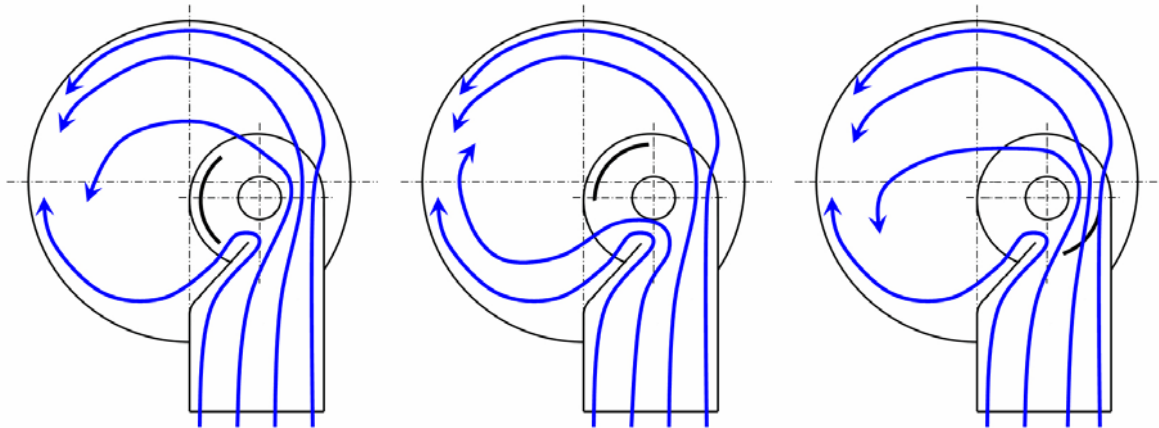


*Abbildung 16: Schirmventil*

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde ein Drallniveau festgelegt, mit welchem der Motor betrieben werden sollte. Mit diesem Drallniveau wurde der überwiegende Teil der Untersuchungen durchgeführt, weshalb es hier als „Referenzdrall“ oder  $D_{ref}$  bezeichnet werden soll. Durch Verdrehen des Schirmventils wurde der Drall variiert und sein Einfluss auf die Formaldehydemissionen zunächst in einem Stichversuch untersucht. Diese Untersuchung erfolgte vor Umbau der Abgasanlage am AVL 520 LVK und umfasste – neben dem Referenzdrall – vier weitere Drallniveaus. Während bei zweien dieser Schirmventilstellungen die Formaldehydemissionen gut mit denen des Referenzdralls übereinstimmten, wurden bei den beiden anderen deutliche Abweichungen festgestellt. Aus diesem Grund beschränkte sich die tiefer gehende Untersuchung des Dralleinflusses nach Umbau der Abgasanlage auf die beiden Drallniveaus.

Die deutlichsten Abweichungen vom Referenzdrall waren in den Formaldehydemissionen bei Drallniveaus aufgetreten, die im Folgenden als „Niedrigdrall“ ( $D_{low}$ ) und „äquivalenter Drall“ ( $D_{äqu}$ ) bezeichnet werden. Bei Niedrigdrall wurde durch eine nur geringfügig vom Referenzdrall abweichende

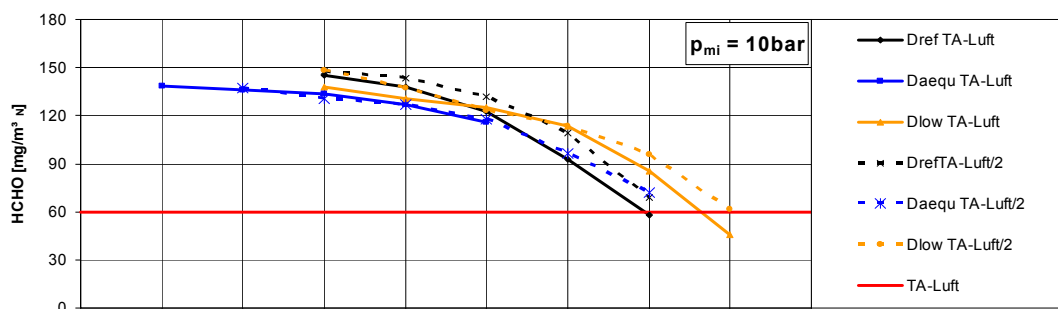
Schirmventilstellung ein deutlich geringerer Drall von nur  $D_{low} = 0,43$  erzeugt. Demgegenüber steht beim äquivalenten Drall eine von Betrag und Richtung her dem Referenzdrall in etwa gleiche Drallzahl ( $D_{äqu} = 1,37$ ), die jedoch mit einer deutlich abweichenden Schirmventilstellung erzeugt wird, siehe *Abbildung 17*.



*Abbildung 17: Schirmventilstellungen und schematische Einlassströmung; von links nach rechts:  $D_{ref}$ ,  $D_{low}$ ,  $D_{äqu}$*

Die Drallvariationen wurden mit Erdgas als Brenngas durchgeführt. Dabei wurden zwei indizierte Mitteldrücke ( $p_{mi} = 10 / 15\text{bar}$ ) und zwei Stickoxid-Niveaus ( $\text{NO}_x = 250 / 500\text{mg/m}^3_N$ ) anhand von Zündzeitpunktvariationen untersucht.

In den Formaldehydemissionen zeigen alle Drallniveaus die gleiche, von den bisherigen Versuchen bereits bekannte Charakteristik eines Plateaus bei frühen Zündzeitpunkten und abnehmenden Emissionen zu späten Zündzeitpunkten hin. Während die Drallniveaus mit in etwa gleicher Drallintensität im Grunde gleiche Verläufe der Emissionen aufweisen, die sich nur geringfügig in der absoluten Höhe unterscheiden, zeigen die Emissionen des Niedrigdralls eine Verschiebung in Richtung später Zündzeitpunkte.



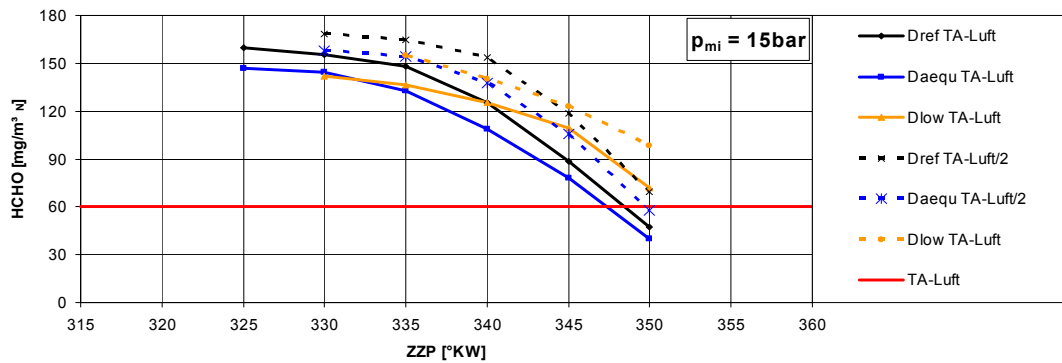


Abbildung 18: Formaldehydemissionen der Drallvariationen

Auch hier ist ein Zusammenhang mit den Brennverläufen erkennbar; bei Niedrigdrall sind tendenziell die schnellsten Umsatzraten und frühesten Schwerpunktlagen zu erkennen, die anderen beiden Drallniveaus weisen in etwa gleiche Schwerpunktlagen auf.

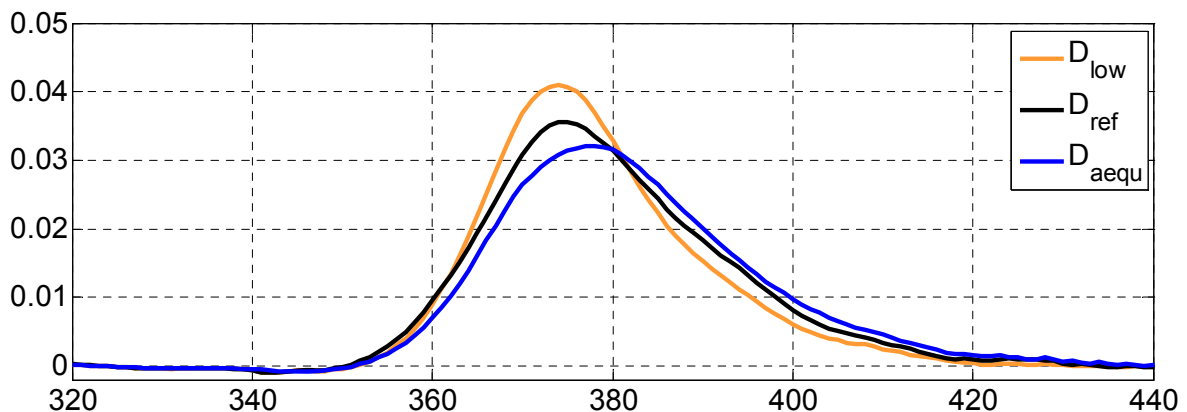


Abbildung 19: Brennverläufe der Drallvariation bei  $p_{mi} = 15\text{bar}$ ,  $ZPP\ 340^\circ\text{KW}$ ,  $NO_x = 500\text{mg}/\text{m}^3_N$

## 8.5 Variation des Verdichtungsverhältnisses

Um das Verdichtungsverhältnis variieren zu können, wurden zwei Versuchskolben mit geänderten Kolbenmuldenvolumen gefertigt. Dabei wurde versucht, die Brennraumgeometrie weitestgehend unverändert zu behalten. Um dies zu erreichen, wurden Muldendurchmesser und -tiefe im gleichen Verhältnis skaliert; der Kolbenrückstand zum Zylinderkopf wurde nicht verändert. Die Quetschflächen konnten somit weitestgehend gleich gehalten werden, sie veränderten sich im Vergleich zum Ausgangskolben um ca. 5%-Punkte (Quetschflächenanteil Ausgangskolben: 59%). Es wurden Verdichtungsverhältnisse von  $\epsilon = 12$  und  $\epsilon = 15$

---

untersucht. Auch hier wurden konstante Mitteldrücke bei jeweils konstanten Stickoxidemissionen untersucht.

Bei den Mitteldrücken  $p_{mi} = 10\text{bar}$  und  $p_{mi} = 15\text{bar}$  wird mit dem Forschungsmotor bei allen untersuchten Verdichtungsverhältnissen in etwa der gleiche maximale Wirkungsgrad erreicht. Mit dem niedrigen Verdichtungsverhältnis entstehen dabei bei wirkungsgradoptimalem Zündzeitpunkt in etwa gleich hohe Formaldehydemissionen wie mit dem ursprünglichen Verdichtungsverhältnis von  $\epsilon = 13$ . Mit dem höheren Verdichtungsverhältnis kommt es über weite Zündwinkelbereiche zu höheren Formaldehydemissionen. Dies zeigt sich bereits bei  $p_{mi} = 10\text{bar}$  und wird bei  $p_{mi} = 15\text{bar}$  noch deutlicher. Bei annähernd gleichem maximalen Wirkungsgrad entstehen hier mit dem höher verdichtenden Kolben um 25% höhere Formaldehydemissionen, bei  $p_{mi} = 10\text{bar}$  liegen sie um ca. 5% über den Werten des Ausgangskolbens. Bei sehr späten Zündzeitpunkten kehrt sich dieses Verhältnis um, da die Emissionen des höher verdichtenden Kolben zu späten Zündzeitpunkten hin stärker abfallen. Hier ergibt sich bei in etwa gleichen Formaldehydemissionen ein Wirkungsgradvorteil für den höher verdichtenden Kolben von ca. einem Prozentpunkt (*Abbildung 20, Abbildung 21*).

Durch die höhere Verdichtung bei  $\epsilon = 15$  sind die Spitzendrücke und -temperaturen, deutlich höher, woraus entsprechend höhere Stickoxidemissionen resultieren. Um diese auf zulässige Werte zu verringern, muss das Gemisch stark abgemagert werden. Diese Abmagerung führt zu drastisch erhöhten Emissionen von Formaldehyd und Gesamtkohlenwasserstoffen. Bei sehr späten Zündzeitpunkten musste nicht so stark abgemagert werden, so dass die Erhöhung der Formaldehydemissionen nicht so stark ausfällt wie bei frühen Zündzeitpunkten.

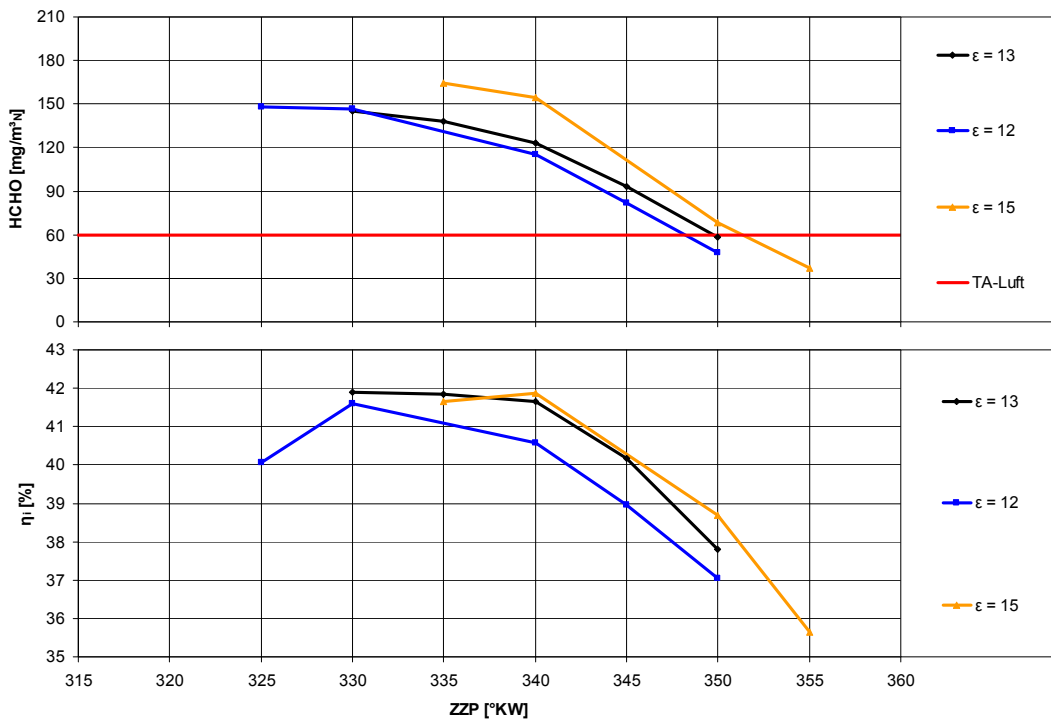


Abbildung 20: Variation des Verdichtungsverhältnisses,  $p_{mi} = 10\text{bar}$ ; Formaldehydemissionen und indizierter Wirkungsgrad

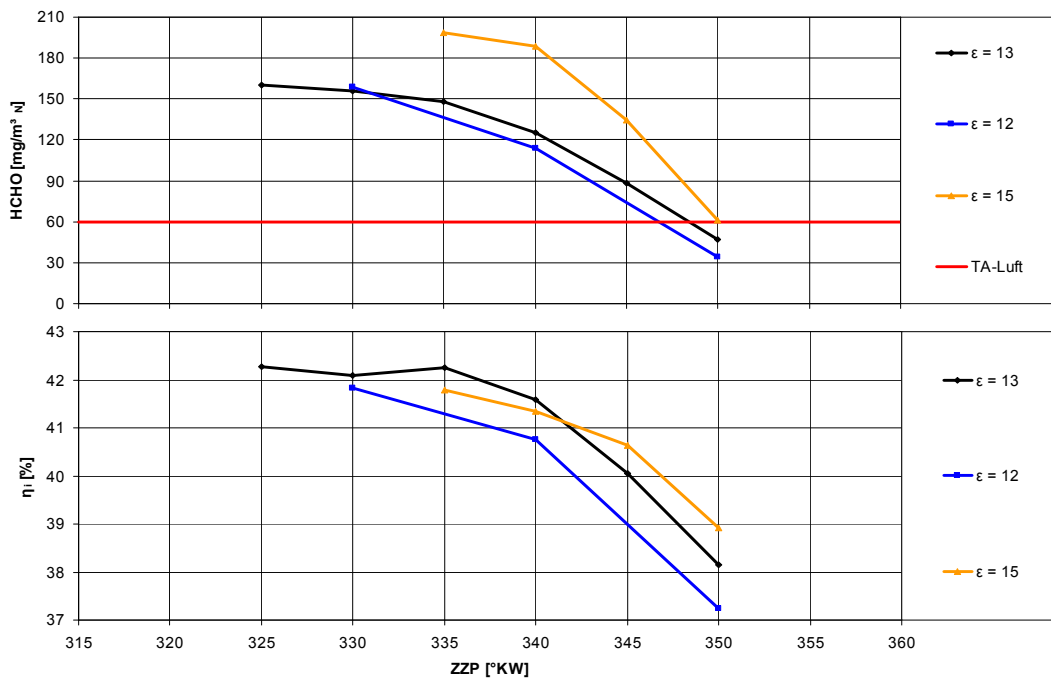


Abbildung 21: Variation des Verdichtungsverhältnisses,  $p_{mi} = 15\text{bar}$ ; Formaldehydemissionen und indizierter Wirkungsgrad

Ein indizierter Mitteldruck von  $p_{mi} = 20\text{bar}$  konnte mit dem höher verdichtenden Kolben nicht untersucht werden, für die beiden anderen Kolben ergeben sich fast deckungsgleiche Verläufe der Emissionen.

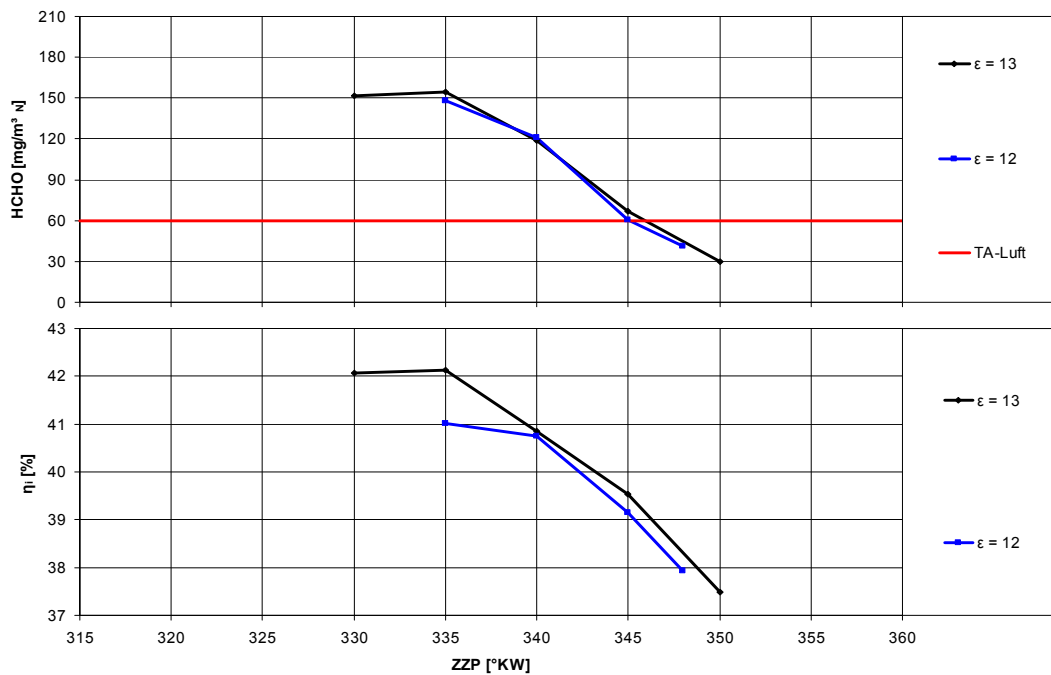


Abbildung 22: Variation des Verdichtungsverhältnisse,  $p_{mi} = 20\text{bar}$ ;  
Formaldehydemissionen und indizierter Wirkungsgrad

Bei den theoretischen Vergleichsprozessen des Verbrennungsmotors führt eine Erhöhung des Verdichtungsverhältnisses immer zu einer Steigerung des Wirkungsgrades. Das nahezu gleich bleibende Niveau der maximalen Wirkungsgrade für alle untersuchten Verdichtungsverhältnisse widerspricht dieser Theorie, was bei dem Forschungsmotor AVL 520 LVK vor allem bei  $\epsilon = 15$  deutlich wird. Bei späten Zündzeitpunkten stimmen die Messungen noch mit der theoretischen Betrachtung überein: der Wirkungsgrad liegt hier für  $\epsilon = 15$  höher als für  $\epsilon = 12$  und  $\epsilon = 13$ . Dieser Wirkungsgradvorteil wird kleiner, je früher gezündet wird, bis er sich schließlich in einen Wirkungsgradnachteil gegenüber  $\epsilon = 13$  umkehrt.

Eine Betrachtung der Gesamtkohlenwasserstoffemissionen erklärt dieses Verhalten. Während diese bei den beiden niedrigeren Verdichtungsverhältnissen auf gleichem Niveau liegen, wird bei  $\epsilon = 15$  und frühen Zündzeitpunkten in etwa die doppelte Menge an Kohlenwasserstoffen emittiert, vgl. *Abbildung 23*. Diese Kohlenwasserstoffe stehen der Verbrennung nicht zur Verfügung und führen damit zu einer deutlichen Verringerung des Wirkungsgrades. Ursache dieser sehr hohen Kohlenwasserstoffemissionen ist der hohe Luftüberschuss, mit dem der Motor hier betrieben wird, um die Stickoxidgrenzwerte einhalten zu können.

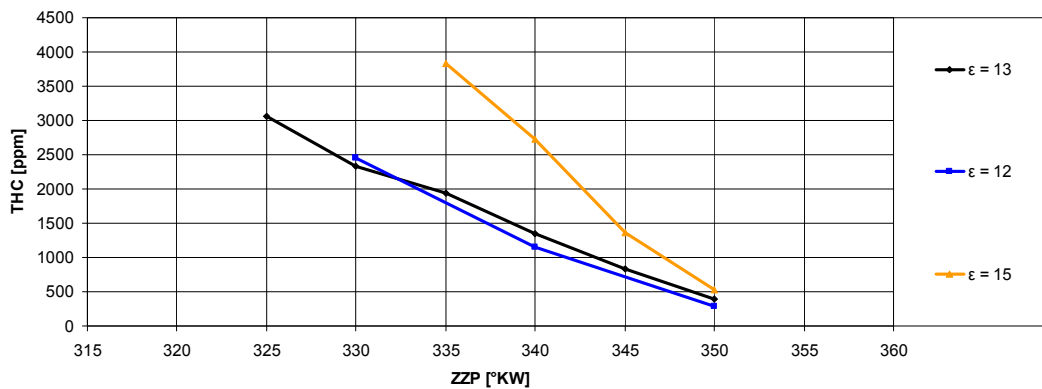


Abbildung 23: Variation des Verdichtungsverhältnisses,  $p_{mi} = 15\text{bar}$ ; Gesamtkohlenwasserstoffemissionen

In *Tabelle 10* sind für den sehr frühen Zündzeitpunkt von  $335^\circ\text{KW}$  Wirkungsgrad und Ausbrand für  $\epsilon = 13$  und  $\epsilon = 15$  verglichen. Mit dem höheren Verdichtungsverhältnis wird ein geringerer Wirkungsgrad erreicht. Aus den Gesamtkohlenwasserstoffemissionen und dem Verbrennungsluftverhältnis errechnet sich der Ausbrand, der bei  $\epsilon = 15$  deutlich kleiner ist als bei  $\epsilon = 13$ . Unter Berücksichtigung des Wirkungsgrades kann abgeschätzt werden, dass aus dem geringeren Ausbrand ein Wirkungsgradverlust von 1,5%-Punkten resultiert. Diese Betrachtung zeigt, dass das Absinken des indizierten Wirkungsgrades für  $\epsilon = 15$  unter die Werte von  $\epsilon = 13$  auf den verringerten Ausbrand infolge des sehr mageren Gemisches zurückzuführen ist.

Verdichtungsverhältnis $\epsilon$ [1]	13	15
Verbrennungsluftverhältnis $\lambda$ [1]	1,78	1,86
ind. Wirkungsgrad $\eta_i$ [%]	42,3	41,8
CH <sub>4</sub> im Frischgas (errechnet aus $\lambda$ ) [ppm]	55700	53400
THC im Abgas [ppm]	1942	3828
Ausbrand [%]	96,5	92,8
$\Delta$ Ausbrand [%-Punkten]		-3,7
$\eta_i \cdot \Delta$ Ausbrand [%-Punkten]		-1,5

Tabelle 10: Vergleich Wirkungsgrad und Ausbrand  $\epsilon = 13$  und  $\epsilon = 15$ ;  $p_{mi} = 15\text{bar}$ ,  $\text{ZZP} = 335^\circ\text{KW}$

---

## 8.6 Einfluss des Feuerstegs

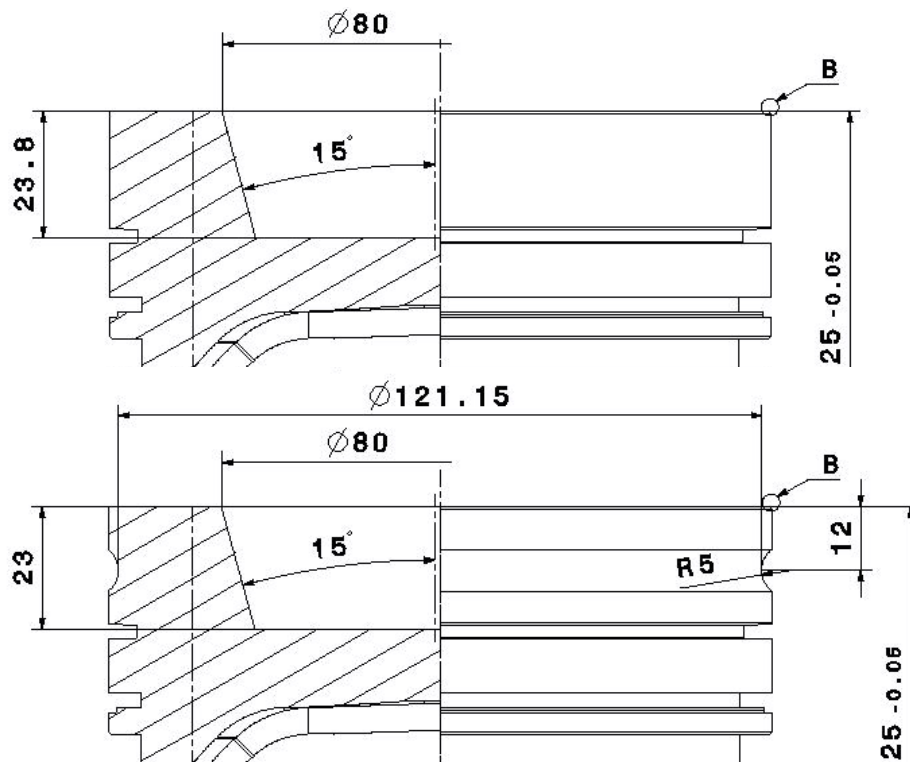
Der Feuersteg stellt bei Ottomotoren eine wichtige Quelle für die Emission von unverbrannten Kohlenwasserstoffen dar. Während des Druckanstiegs im Brennraum auf Grund der Verdichtung und Verbrennung strömt unverbranntes Gemisch in diesen Brennraumspalt. Bei Überschreiten des Spitzendrucks kehrt sich das Druckgefälle um und das im Feuersteg enthaltene Restgas gelangt zurück in den Brennraum. Die Flamme erreicht den Feuerstegbereich gegen Ende der Verbrennung und erfasst den Anteil des Gemisches, der bis dahin hieraus in den Brennraum zurück geströmt ist. Wegen der geringen Spalthöhe kann sie jedoch nicht in den Feuersteg hinein brennen und verlöscht. Im weiteren Verlauf der Expansion tritt das restliche unverbrannte Gemisch aus dem Feuersteg in den Brennraum aus. Da die Flamme bereits verloschen ist, verbrennt dieses Gemisch nicht mehr und bildet einen Teil der Emission von unverbrannten Kohlenwasserstoffen.

Im Brennraum herrschen zu diesem Zeitpunkt allerdings noch Temperaturen, die zu Reaktionen der unverbrannten Kohlenwasserstoffe führen können. Damit kommt es auch zur Bildung von Formaldehyd, wenn die Kohlenwasserstoffe nur teilweise oxidiert werden

Für die Entstehung von Formaldehydemissionen aus Brennraumspalten heraus ist ein weiterer Mechanismus denkbar: Durch die Drucksteigerung während der Verdichtung und später während der Verbrennung erhitzt sich das unverbrannte Gemisch. Dabei werden Temperaturen erreicht, bei denen bereits Vorreaktionen stattfinden. Damit ist denkbar, dass Formaldehyd bereits während der Verdichtung und der Verbrennung im Restgas entsteht. In Brennraumspalten wie dem Feuersteg kann es dann bis nach Verbrennungsende verbleiben und nach dem Herausströmen aus den Spalten einen Beitrag zur Gesamtformaldehydemission leisten.

Um den Einfluss der Brennraumspalte, insbesondere des Feuerstegs, auf die Emission von Formaldehyd untersuchen zu können, wurde ein modifizierter Kolben angefertigt. Bei diesem wurde im Bereich des Feuerstegs eine Nut angebracht, die das Spaltvolumen des Feuerstegs erhöht. Dadurch kann im Feuersteg mehr unverbranntes Gemisch bis nach Verbrennungsende verbleiben, wodurch eine erhöhte Kohlenwasserstoffemission zu erwarten ist. Die Nut wurde dabei so

dimensioniert, dass sich das Feuerstegvolumen nahezu verdoppelte. Die Vergrößerung des Feuerstegvolumens führt dazu, dass sich das Verdichtungsverhältnis merklich ändert. Um wieder das ursprüngliche Verdichtungsverhältnis von  $\varepsilon = 13$  zu erhalten, wurde deshalb die Tiefe der Kolbenmulde etwas verkleinert. Die Geometrie des Ausgangskolbens und des Kolbens mit erhöhtem Feuerstegvolumen sind in *Abbildung 24* zu sehen.



*Abbildung 24: Standardkolben (oben) und Kolben mit erhöhtem Feuerstegvolumen*

Die Versuche mit diesem Kolben zeigten einen sehr deutlichen Einfluss des Feuerstegs sowohl auf die Formaldehyd-, als auch auf die Gesamtkohlenwasserstoffemissionen. Die Gesamtkohlenwasserstoffemissionen erhöhten sich bei einem Niveau der Stickoxidemissionen von  $500\text{mg}/\text{m}^3_{\text{N}}$  über den gesamten Zündwinkelbereich um etwa 70%. Demgegenüber ist der Zuwachs an Formaldehydemissionen stark vom Zündwinkel abhängig. Bei frühen Zündzeitpunkten entstammen in etwa 40% des emittierten Formaldehyds dem Feuersteg, bei späten Zündzeitpunkten in etwa 70%.

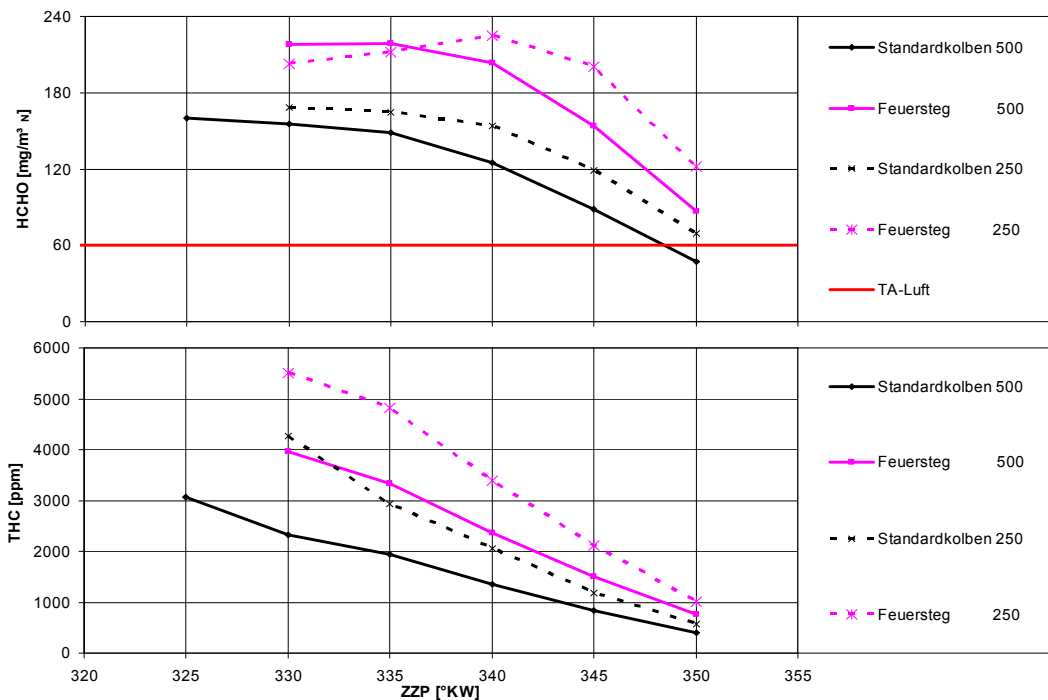


Abbildung 25: Vergleich Standardkolben – erhöhter Feuersteg; Formaldehyd- und Gesamtkohlenwasserstoffemissionen für  $\text{NO}_x = 250 / 500 \text{ mg/m}^3_N$

Unter der Annahme, dass sich durch die Verdoppelung des Feuerstegvolumens auch die aus dem Feuersteg stammenden Emissionen verdoppeln, kann abgeschätzt werden, wie sich die Herkunft der Emissionen auf Feuersteg und andere Quellen aufteilt. Dabei sieht man, dass die Gesamtkohlenwasserstoffemissionen aus dem Feuersteg in Richtung früher Zündzeitpunkte stetig ansteigen. Im Gegensatz dazu weisen die dem Feuersteg entstammenden Formaldehydemissionen ein Maximum auf und fallen von diesem aus in Richtung früherer und späterer Zündwinkel ab. Dies legt den Schluss nahe, dass der Entstehung der Gesamtkohlenwasserstoff- und Formaldehydemissionen aus dem Feuersteg unterschiedliche Mechanismen zu Grunde liegen. Die Entstehung von Formaldehyd kann einerseits während der Verdichtung vor dem Einströmen in den Feuersteg erfolgen. Andererseits ist eine Entstehung durch aus dem Feuersteg entweichendes Methan in den heißen Brennraum denkbar. Zudem ist es möglich, dass aus dem Feuersteg entweichendes oder im Brennraum aus Methan gebildetes Formaldehyd bei ausreichenden Brennraumtemperaturen weiter umgesetzt wird. Somit kann eine komplexe Abhängigkeit der Formaldehydemissionen von den Bedingungen im Brennraum während Verdichtung, Verbrennung und Expansion nicht ausgeschlossen werden. Für genauere Aussagen hierzu sind weiterführende Betrachtungen vonnöten.

Im Gegensatz dazu zeigen sowohl die Formaldehydemissionen, als auch die Gesamtkohlenwasserstoffemissionen, die aus anderen Quellen als dem Feuersteg stammen, einen stetigen Anstieg in Richtung früherer Zündzeitpunkte. Hier scheint es einen direkten Zusammenhang zwischen der Menge der Gesamtkohlenwasserstoff- und der Menge der Formaldehydemissionen zu geben. Die Betrachtung erfolgt hier für einen Mitteldruck von  $p_{mi} = 15\text{bar}$ , für  $p_{mi} = 10\text{bar}$  sind die Tendenzen gleich.

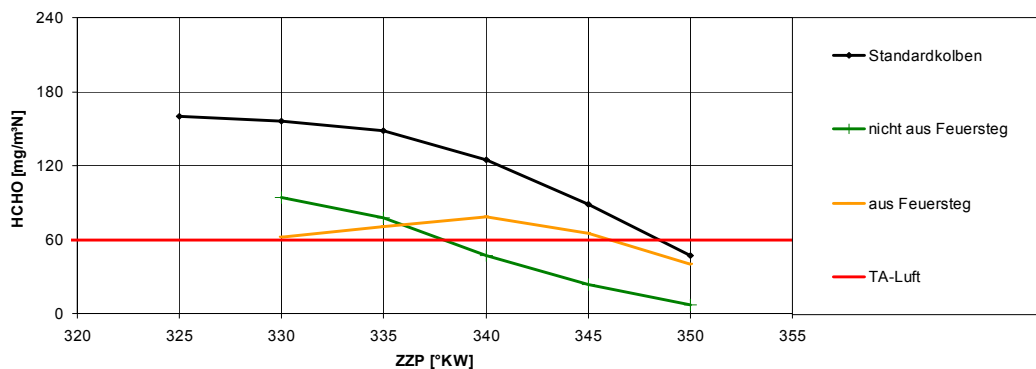


Abbildung 26: Aufteilung der Formaldehydemissionen auf Feuersteg und andere Quellen;  $p_{mi} = 15\text{bar}$ ;  $\text{NO}_x = 500\text{mg}/\text{m}^3_N$

## 8.7 Variation der Brennraumgeometrie

Bei diesen Versuchen wurde statt eines Kolbens mit Kegelstumpfmulde ein Kolben mit Linsenbrennraum verwendet (Abbildung 27). Die Linse wurde in Form einer Kugelkalotte ausgeführt und so dimensioniert, dass sich der Quetschflächenanteil im Vergleich zum Standardkolben halbiert. Das Verdichtungsverhältnis bleibt dabei gleich, das Verhältnis von Brennraumoberfläche zu Brennraumvolumen ändert sich im oberen Totpunkt nur um ca. 1%.

Durch die geänderte Brennraumgeometrie steigt bei ansonsten gleichen Randbedingungen die Umsetzungsrate deutlich. Dies ist gut an den Brennverläufen der Kolbenvarianten in Abbildung 28 zu sehen: Mit dem Linsenbrennraum (KoLi) werden deutlich frühere Schwerpunktslagen erreicht als mit dem Standardkolben (KoSt).

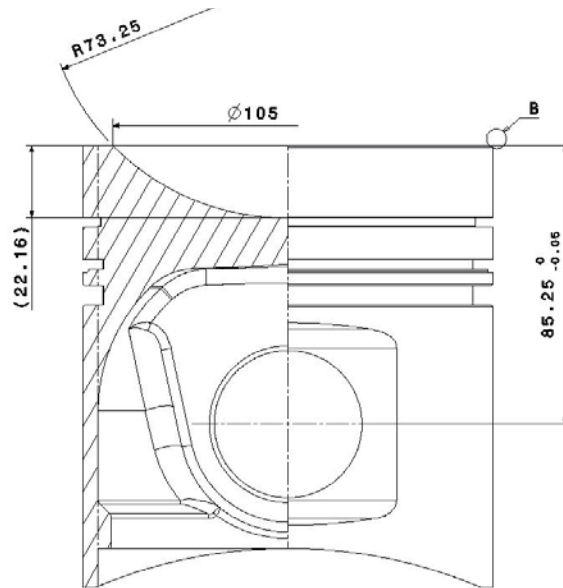


Abbildung 27: Kolben mit Linsenbrennraum

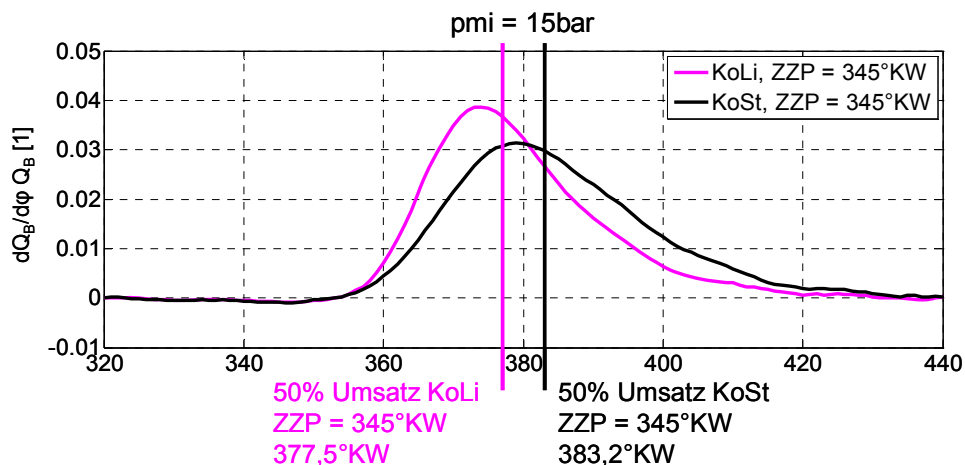


Abbildung 28: Brennverläufe des Standard- und des Linsenkolbens

Die Formaldehydemissionen verhalten sich für konstante Mitteldrücke und konstante Stickoxidemissionen so, wie es nach den bisherigen Erkenntnissen zu erwarten ist: Die absolute Höhe der Emissionen ist bei beiden Kolbenvarianten in etwa gleich; beide Verläufe weisen bei frühen Zündzeitpunkten ein Plateau auf und fallen zu späten Zündzeitpunkten ab. Der Verlauf der Formaldehydemissionen des Kolbens mit früherer Schwerpunktlage ist zu späten Zündzeitpunkten hin verschoben.

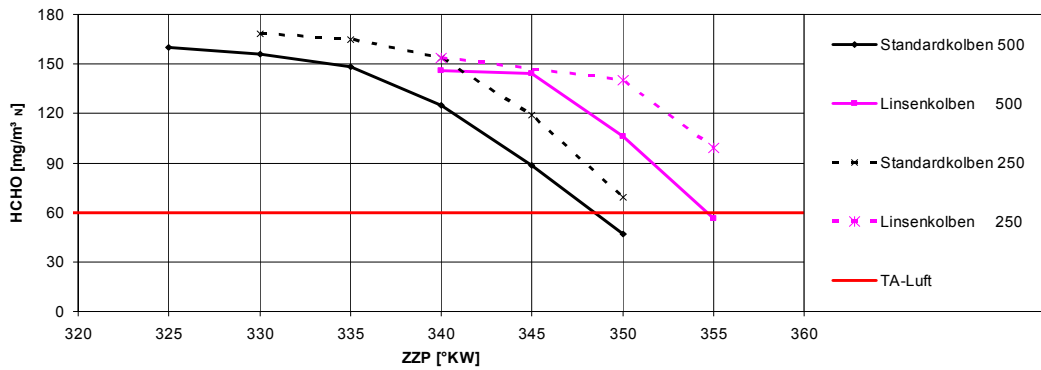


Abbildung 29: Verlauf der Formaldehydemissionen für Standard- und Linsenkolben,  $p_{mi} = 15\text{bar}$ ;  $\text{NO}_x = 250 / 500\text{mg/m}^3_N$

Für einen Mitteldruck von  $p_{mi} = 10\text{bar}$  zeigen die Emissionen die gleiche Tendenz, bei  $p_{mi} = 20\text{bar}$  konnten für den Linsenkolben nur wenige Versuche durchgeführt werden, es ist jedoch die gleiche Tendenz wie bei den anderen untersuchten Mitteldrücken zu erkennen.

---

## 9 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Formaldehyd – Wirkmechanismen“ erfolgten umfangreiche Untersuchungen zu Verhalten und Entstehung der motorischen Formaldehydemissionen vor allem von Magergasmotoren. Es wurden Basismessungen durchgeführt, mit denen allgemeine Kenntnisse über die motorischen Bedingungen gewonnen wurden, bei denen bevorzugt Formaldehyd entsteht. Nach diesen Basismessungen wurden Motorparameter untersucht, mit denen nach den Erkenntnissen der Basismessungen eine Beeinflussung der Formaldehydemissionen zu erwarten war.

Die Basismessungen zeigten, dass zunehmend magere Gemische die Entstehung von Formaldehyd begünstigen. Es wurde eine Abhängigkeit der Emissionen vom Zündzeitpunkt festgestellt. Vor allem bei relativ fettem Gemisch zeigte sich ein ausgeprägtes Maximum der Emissionen, das zu früheren und späteren Zündzeitpunkten hin abfiel. Bei fetten Gemischen wurde zudem festgestellt, dass hohe Ladedrücke geringe Formaldehydemissionen zur Folge haben. Werden die Gemische zunehmend magerer, ist diese Aussage nicht mehr zutreffend. Bei den Basismessungen wiesen die Betriebspunkte mit geringen Formaldehydemissionen hohe Stickoxidemissionen auf. Ergänzend sei hier erwähnt, dass sich durch die Verstellung einzelner Parameter die Mitteldrücke und damit auch die Motorleistung änderten.

Die in den Brenngasvariationen untersuchten Gasarten verhielten sich qualitativ alle gleich. Bei den Brenngasvariationen ergaben sich erste Hinweise auf eine Abhängigkeit der Formaldehydemissionen von der Schwerpunktlage der Verbrennung. Bei Einstellung von konstantem Mitteldruck und konstanten Stickoxidemissionen zeigten alle Brenngase bei frühen Zündzeitpunkten ein Plateau der Formaldehydemissionen mit einem Abfall zu späten Zündzeitpunkten hin. Die Emissionsverläufe der Brenngase waren hier – im Gegensatz zu den Versuchen mit konstanten Ladedrücken und Verbrennungsluftverhältnissen – nicht zu späten Zündzeitpunkten hin verschoben. Ursächlich hierfür waren verbesserte Brennbedingungen durch das mögliche Anfetten und die daraus resultierende frühe Schwerpunktlage der Verbrennung. Die Brenngase mit geringerem Heizwert wiesen

---

niedrigere Formaldehydemissionen auf. Dies ist auf die Möglichkeit zurückzuführen, bei diesen Gasen stärker anfetten zu können, ohne die Stickoxidemission zu erhöhen.

Bei den Versuchen zur Beeinflussung der Formaldehydemissionen durch Motorparameter wurde gezeigt, dass durch ein erhöhtes Temperaturniveau der Frischgasladung oder der Brennraumwände eine geringfügige Verringerung der Formaldehydemissionen zu erreichen ist. Diese war immer verbunden mit einer Erhöhung der Stickoxidemissionen. Maßnahmen zur Verringerung dieser Stickoxidemissionen auf ihren Ausgangswert führten dazu, dass sich die Formaldehydemissionen wieder auf ihren Ausgangswert erhöhten oder ihn zum Teil noch übertrafen.

Es wurde untersucht, wie sich der Turbineneintrittsdruck auf die Formaldehydemissionen auswirkt. Dabei wurden an einem der beiden Forschungsmotoren Hinweise gefunden, die auf übergeschobenes Frischgas als Quelle von Formaldehyd schließen lassen. Bei Versuchen an dem zweiten Forschungsmotor konnte diese These weder bewiesen noch widerlegt werden. Es zeigte sich, dass die Formaldehydemissionen mit sinkenden Turbineneintrittsdrücken tendenziell sinken, dass im Gegenzug jedoch die Stickoxidemissionen steigen. Wurden Gegenmaßnahmen getroffen, um die Stickoxidemissionen wieder auf ihren Ausgangswert zu bringen, erhöhten sich auch die Formaldehydemissionen wieder auf ihren Ausgangswert.

Messungen haben gezeigt, dass ab einem bestimmten Verdichtungsverhältnis die Formaldehydemissionen ansteigen. Dies liegt darin begründet, dass das Gemisch dabei stark abgemagert werden muss, um die Stickoxidemissionen im Rahmen der Grenzwerte zu halten. Die hieraus resultierenden verschlechterten Brennbedingungen führen zu hohen Emissionen von unverbrannten Kohlenwasserstoffen und Formaldehyd. Wegen der hohen Kohlenwasserstoffemissionen konnte mit diesem hohen Verdichtungsverhältnis auch keine Verbesserung des Spitzenwirkungsgrades erreicht werden. Bei sehr späten Zündzeitpunkten musste nicht so stark abgemagert werden, weshalb sich hier Wirkungsgradvorteile bei gleichen Formaldehydemissionen zeigten. Für niedrigere Verdichtungsverhältnisse

---

konnte kein signifikanter Einfluss auf die Formaldehydemissionen festgestellt werden.

Durch eine Änderung der Ladungsbewegung oder Brennraumform konnte eine Beschleunigung der Verbrennung erreicht werden. Unter Einhaltung konstanter Stickoxidemissionen zeigte sich dabei kein Einfluss auf die absolute Höhe der Formaldehydemissionen. Es konnte jedoch festgestellt werden, dass der Verlauf der Emissionen über dem Zündzeitpunkt für Brennverfahren mit früherer Schwerpunktlage in Richtung später Zündzeitpunkte verschoben waren. Die Verschiebung bewegte sich dabei in der gleichen Größenordnung wie die Differenz der Schwerpunktlagen der Brennverfahren.

Durch Versuche mit einem Kolben mit erhöhtem Feuerstegvolumen konnte nachgewiesen werden, dass ein Großteil sowohl der Formaldehyd- als auch der Gesamtkohlenwasserstoffemissionen aus dem Feuersteg stammt. Während die nicht dem Feuersteg entstammenden Emissionen von Formaldehyd und Gesamtkohlenwasserstoffen eine annähernd lineare Abhängigkeit voneinander zeigen, verlaufen die Emissionen aus dem Feuersteg zum Teil konträr. Während die Gesamtkohlenwasserstoffemissionen aus dem Feuersteg mit früherem Zündzeitpunkt stetig steigen, weisen die Formaldehydemissionen ein Maximum auf und fallen zu frühen und späten Zündzeitpunkten hin ab. Den Emissionen von Gesamtkohlenwasserstoff und Formaldehyd aus dem Feuersteg liegen anscheinend verschiedene Mechanismen zu Grunde. Um konkrete Aussagen über diese Mechanismen treffen zu können, müssen weitere Betrachtungen angestellt werden. Für geringstmögliche Emissionen von Formaldehyd ist ein möglichst kleines Feuerstegvolumen anzustreben. Allerdings sind hier durch die Notwendigkeit der Einhaltung eines Minimalspaltes zur Vermeidung von Feuersteg/Zylinderbuchsen – Kontakten Grenzen gesetzt.

Mit keiner der untersuchten Einflussgrößen war es möglich, eine deutliche Verringerung der Formaldehydemissionen zu erreichen, ohne dass andere Parameter (Wirkungsgrad, Stickoxide) nicht verschlechtert werden. Eine Möglichkeit, die Formaldehydemissionen positiv zu beeinflussen, wäre eine Anfettung des Gemisches. Dies führt jedoch zu Stickoxidemissionen, die nicht mit der aktuellen Gesetzgebung zu vereinbaren sind. Durch eine Verstellung des Zündzeitpunktes in

---

Richtung spät konnten sowohl die Formaldehyd- als auch die Stickoxidemissionen verringert werden, was jedoch einen Wirkungsgradverlust von fünf Prozentpunkten zur Folge hatte. Dieser Wirkungsgradverlust entspricht einem Brennstoffmehrverbrauch von 10 bis 13%. Die Abgastemperaturen im Auslasskanal erhöhten sich dadurch im Vergleich mit dem Punkt maximalen Wirkungsgrades um ca. 150°C, was eine drastisch erhöhte Belastung des Auslassventils und der Komponenten der Aufladegruppe und des Abgastraktes zur Folge hat.

Nach dem derzeitigen Stand der Technik scheint es nicht möglich, einen Grenzwert von 60mg/m<sup>3</sup><sub>N</sub> Formaldehyd innermotorisch ohne Abgasnachbehandlung bei allen Randbedingungen sicher zu erreichen, ohne entweder unzulässig hohe Mengen an Stickoxiden zu emittieren oder einen um etwa 10% erhöhten Brennstoffverbrauch, bezogen auf den Punkt maximalen Wirkungsgrades, in Verbindung mit drastisch erhöhten thermischen Belastungen einzelner Motorbauteile akzeptieren zu müssen.

---

## 10 Literaturverzeichnis

- [ZACH2001] ZACHARIAS, F. (2001): **Gasmotoren**. 1. Auflage. Würzburg: Vogel Verlag
- [TALUFT2002] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (2002): **Erste Allgemeine Verwaltungsvorschrift zum Bundes-Immissionsschutzgesetz (Technische Anleitung zur Reinhaltung der Luft – TA Luft) Vom 24. Juli 2002**. Internetfassung des BMU.
- [BÄUERLE1999] BÄUERLE, B. (1999): **Untersuchung der zeitlichen Entwicklung von Klopfzentren im Endgas eines Zweitakt Ottomotors mittels zweidimensionaler laserinduzierter Fluoreszenz von Formaldehyd**. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [OLSEN2000] MITCHELL, C.; OLSEN, D. (2000): Formaldehyde Formation in Large Bore Natural Gas Engines Part 1: Formation Mechanisms; **Journal of Engineering for Gas Turbines and Power**, Jhrg. 122, Nr. 4, S. 603-610.
- [GRAF2003] GRAF, N. (2003); **Einsatz der Laserinduzierten Fluoreszenz organischer Moleküle zur Visualisierung von Gemischbildungs- und Verbrennungsprozessen**. Dissertation, Universität Heidelberg.
- [FVV560] FEHL, G.; WAGNER, CH. (1995): **Untersuchungen der Eignung von FTIR-Abgasanalytoren zur Erfassung von limitierten und nichtlimitierten Abgaskomponenten in stationärem und dynamischem Betrieb**. Abschlussbericht, FVV-Forschungsheft 625
- [BIOMON2003] GRONAUER, A.; EFFENBERGER, M.; KAISER, F.; SCHATTENMANN, M. (2003): **Biogasanlagen – Monitoring und Emissionsverhalten von Biogas – Blockheizkraftwerken**.

---

Abschlussbericht, München: Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen

- [KRISTEN2007] KRISTENSEN, P. (2007): **Formaldehyde reduction by catalyst**. Projektbericht, Hørsholm, Danish Gas Technology Centre
- [TIPPEL1977] TIPPELMANN, G. (1977): **A New Method of Investigation of Swirl Ports**. SAE Paper 770404, Detroit, 1977



Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V.

Lyoner Straße 18    Telefon: 069/66 03 16 81

60528 Frankfurt    Telefax: 069/66 03 16 73

E-Mail: [info@fvv-net.de](mailto:info@fvv-net.de)    Website: [www.fvv-net.de](http://www.fvv-net.de)

Mitglied der  
  
*Ideen eine Zukunft geben*