

DIPLOMARBEIT

**ABSTIMMUNG UND
APPLIKATION EINES 150 CCM
VIERTAKT-
MOTORRADMOTORS
IM HINBLICK AUF DIE
KÜNFTIGE EURO IV
ABGASGESETZGEBUNG**

Verfasser: Michael Minichberger

**Eingereicht am Institut für Verbrennungskraftmaschinen
und Thermodynamik der Technischen Universität Graz**

Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder

Betreuender Professor: Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder

**Betreuende Assistenten: DI Jürgen Tromayer
DI Gerd Neumann**

Graz, 18.03.2014



Vorwort

Diese Diplomarbeit ist im Rahmen eines Industrieprojekts am Institut für Verbrennungsmaschinen und Thermodynamik im Forschungsbereich Konstruktion und Auslegung entstanden.

Hiermit bedanke ich mich beim Institutsvorstand Herrn Univ.-Prof. DI Dr. Helmut Eichlseder und dem Leiter des Forschungsbereichs Ass. Prof. DI Dr. Roland Kirchberger, die die Durchführung dieser Diplomarbeit ermöglichten.

Besonderer Dank gilt meinen beiden Betreuern DI Jürgen Tromayer und DI Gerd Neumann, die mir während der Diplomarbeit zur Seite standen und mich unterstützt haben. Dank gebührt ebenso an den Mitarbeitern des Forschungsbereichs Konstruktion und Auslegung für die gute Zusammenarbeit und die kollegiale Unterstützung.

Mein größter Dank gilt meiner Familie, meinen Eltern und meinen Großeltern, die mir die Schulausbildung und das Studium ermöglicht haben. Ganz besonders danken möchte ich abschließend meiner wundervollen Freundin Birte für ihre Geduld und Hilfestellung bei der Erstellung dieser Diplomarbeit.

Inhalt

VORWORT	I
EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG	V
STATUTORY DECLARATION	V
KURZFASSUNG	VII
ABSTRACT	IX
1 EINLEITUNG	1
2 THEORETISCHE GRUNDLAGEN	2
2.1 Grundlagen der Verbrennungskraftmaschine	2
2.1.1 Funktionsprinzip Viertakt Otto-Motor.....	2
2.1.2 Kenngrößen	3
2.2 Schadstoffe, Schadstoffbildung und Abgasnachbehandlung	7
2.2.1 Kohlendioxid (CO ₂)	7
2.2.2 Kohlenwasserstoffe (HC).....	8
2.2.3 Kohlenmonoxid (CO).....	9
2.2.4 Stickstoffoxide (NO _x)	9
2.2.5 Abgasnachbehandlung.....	10
2.3 Abgasgesetzgebung in Europa.....	14
2.3.1 Einteilung der Fahrzeugklassen	14
2.3.2 World Harmonized Motorcycle Test Cycle (WMTC).....	15
2.3.3 Grenzwerte	17
3 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN	19
3.1 Versuchsträger.....	19
3.1.1 Fahrzeug.....	19
3.1.2 Motor	20
3.1.3 Technische Daten des Versuchsträgers	21
3.1.4 Anpassungen am Versuchsträger	22
3.2 Aufbau Motorenprüfstand	31
3.2.1 Leistungsbremse	31
3.2.2 Kühlwasserkonditionierung.....	32
3.2.3 Messtechnik	32
3.3 Aufbau Zweirad Rollenprüfstand	39
3.3.1 CVS-Anlage.....	39
3.3.2 Abgasanalyse.....	40
3.4 Grundlagen der Einspritzmengenberechnung.....	42
3.5 Untersuchungen am Motorprüfstand	43
3.5.1 Applikation des Basiskennfeldes.....	43
3.5.2 Lambdasondenposition.....	48
3.6 Untersuchungen am Rollenprüfstand	57
3.6.1 Wandfilmkompensation	57
3.6.2 Motorstart und Motorwarmlauf.....	60
3.7 Katalysatoren.....	67
4 ERGEBNISSE DER ABGASEMISSIONSMESSUNGEN	68
4.1 Ergebnisse des Katalysators 13 1320	69
4.2 Ergebnisse des Katalysators 13 1717	72
4.3 Ergebnisse des Katalysators 13 1718	75
4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse.....	77
5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK	81
6 ANHANG	82
6.1 Installationsempfehlungen der Prototypenkomponenten.....	82
6.2 Abgassystem.....	84
VERZEICHNISSE	85

Formelzeichen, Indices und Abkürzungen	85
Abbildungsverzeichnis	88
Tabellenverzeichnis	89
Literatur- und Quellenverzeichnis	90

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Statutory declaration

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
(date)

.....
(signature)

Kurzfassung

Diese Diplomarbeit ist am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz angefertigt worden und ist im Rahmen eines Industrieprojektes entstanden. Im Zuge des Industrieprojektes soll ein 150 ccm Viertakt-Motorradmotor entwickelt werden, der die Euro IV Abgasgesetzgebung erfüllen kann.

Aus diesem Grund sind Untersuchungen an einem zum Prototyp ähnlichen Versuchsmotor, welcher aus einer Benchmarkanalyse hervorgegangen ist, durchgeführt worden.

Der Versuchsmotor, beziehungsweise das Versuchsfahrzeug, sind am Motor- und Rollenprüfstand untersucht worden. Dabei wurde ein neues Motorsteuergerät in das Fahrzeug integriert und die zugrundeliegenden Kennfelder optimiert. Diese Optimierungen sollen dazu beitragen, die Rohemissionen zu reduzieren. Des Weiteren ist ein Katalysator im Fahrzeug verbaut worden, um so die Emissionen weiter zu reduzieren. Die Umbauten am Fahrzeug und die optimierten Kennfelder haben allerdings nicht dazu geführt, dass die künftige Abgasgesetzgebung eingehalten werden konnte. Schlussendlich bedarf es dazu noch weiterer Optimierungsschritte.

Abstract

The aim of this diploma thesis, written at the Institute of Internal Combustion Engines and Thermodynamics at Graz University of Technology, was to adapt a 150 ccm four-stroke motorcycle engine for the upcoming Euro IV emissions law. This diploma thesis was part of an industrial project, in which a new engine was designed.

The intention was to reduce the emissions of the motorcycle until they achieve Euro IV. Therefore a test engine, which is similar to the prototype, was analysed. The chosen engine was the result of a previous benchmark test.

The test engine and the test vehicle were analysed at the roller dynamometer test bench and at the engine test bench. There the engine control unit was adapted by optimizing the underlying engine maps. This improvement had a positive influence on the exhaust fumes of the vehicle.

Furthermore a catalytic converter was embedded into the vehicle to reduce the fumes in the exhaust pipe. However the reconstructed vehicle and the improved engine maps were not able to achieve the future emission standard Euro IV.

1 Einleitung

Diese Diplomarbeit ist Teil eines laufenden Industrieprojektes am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik der Technischen Universität Graz, im Fachbereich Konstruktion und Auslegung. Ziel dieser Arbeit ist es, einen 150 ccm Viertakt-Motorradmotor auf die künftige Euro IV Abgasgesetzgebung abzustimmen.

Im Rahmen des Industrieprojektes wird ein Motorradmotor zur Einhaltung der Euro IV Abgasgesetzgebung entwickelt. Für die Untersuchungen in dieser Diplomarbeit ist ein dem Prototyp ähnlicher Versuchsmotor, der aus einer Benchmarkanalyse hervorgegangen ist, herangezogen worden. Dabei ist das Motorsteuergerät, das Einspritzsystem und das Abgassystem des Prototypenmotors eingesetzt worden.

Da die weltweiten Abgasgesetzgebungen immer schärfer werden, sollen im Rahmen des Projekts die Emissionen des Motorrades reduziert werden, um so die kommende Euro IV-Abgasgesetzgebung zu erfüllen. Dabei soll gleichzeitig eine gute Fahrbarkeit des Motorrades gewährleistet sein. Zu diesem Zweck soll der zu untersuchende Motor beziehungsweise das Motorrad am Motor- und Rollenprüfstand analysiert und in weiterer Folge angepasst werden. Der Fokus dieser Untersuchung liegt dabei besonders auf der Motorsteuerung und auf dem Katalysator, da beide einen großen Einfluss auf den Emissionsausstoß haben. So sollen einerseits die Kennfelder im Motorsteuergerät optimiert werden. Andererseits soll ein passender Katalysator in den Auspuff des Motorrades integriert werden.

Da die Motorsteuerung die Einspritzung und die Zündung regelt, ist sie in weiterer Folge auch für die Zusammensetzung der Abgase verantwortlich. Somit kann über eine Kennfeldanpassung der Emissionsausstoß des Fahrzeuges beeinflusst werden.

Dementsprechend ist die Kennfeldanpassung entscheidend für die Katalysatorenauswahl und soll deswegen zuerst durchgeführt werden. Dabei soll zunächst das Basiskennfeld angepasst werden. Anschließend sollen die Kennfelder für die Wandfilmkompensation und den Motorstart beziehungsweise den Motorwarmlauf optimiert werden.

Aufbauend auf diesen Veränderungen soll ein passender Katalysator ausgesucht werden, der optimal auf die Motorcharakteristik abgestimmt ist.

Grundsätzlich ist die Diplomarbeit in drei Bereiche unterteilt. So werden einleitend die theoretischen Grundlagen vorgestellt. Dieses Kapitel präsentiert allgemeine Informationen zur Verbrennungskraftmaschine, zu Schadstoffen und zur Abgasgesetzgebung in Europa. Anschließend wird im nächsten Kapitel die experimentelle Untersuchung detailliert beschrieben. In diesem Kapitel findet man sowohl Information zum Versuchsmotor und zum Versuchsfahrzeug als auch Informationen zum Motor- und Rollenprüfstand. Außerdem werden hier die Kennfeldanpassung und die Katalysatorauswahl ausführlich beschrieben. Abschließend werden alle Untersuchungsergebnisse präsentiert und ein Ausblick auf den weiteren Projektverlauf gegeben.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Grundlagen der Verbrennungskraftmaschine

[1] [2]

In diesem Kapitel sollen die grundlegende Funktionsweise und die Zusammenhänge der Verbrennungskraftmaschine dargestellt werden. Dies dient zum Verständnis der in der Arbeit verwendeten Begriffe.

Einleitend wird hier die Definition des Verbrennungsmotors nach DIN 1940 [1]:

„Wärmekraftmaschine, die durch diskontinuierliche Verbrennung von Kraftstoffen in einem Arbeitsraum, dessen Volumen durch Bewegung von Kolben oder Läufern verändert wird, nutzbare Energie abgibt. Diese Definition schließt Hubkolbenmotoren und Kreiskolbenmotoren ein.“

und die Definition des Ottomotors nach DIN 1940 [1] gegeben:

„Verbrennungsmotor, bei dem die Verbrennung des verdichteten Kraftstoff-Luft-Gemisches durch zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird.“

2.1.1 Funktionsprinzip Viertakt Otto-Motor

Bei dem in dieser Arbeit verwendeten Motor, handelt es sich um einen gemischansaugenden Otto-Viertaktmotor. Dessen prinzipielle Arbeitsweise soll an dieser Stelle kurz erläutert werden und ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

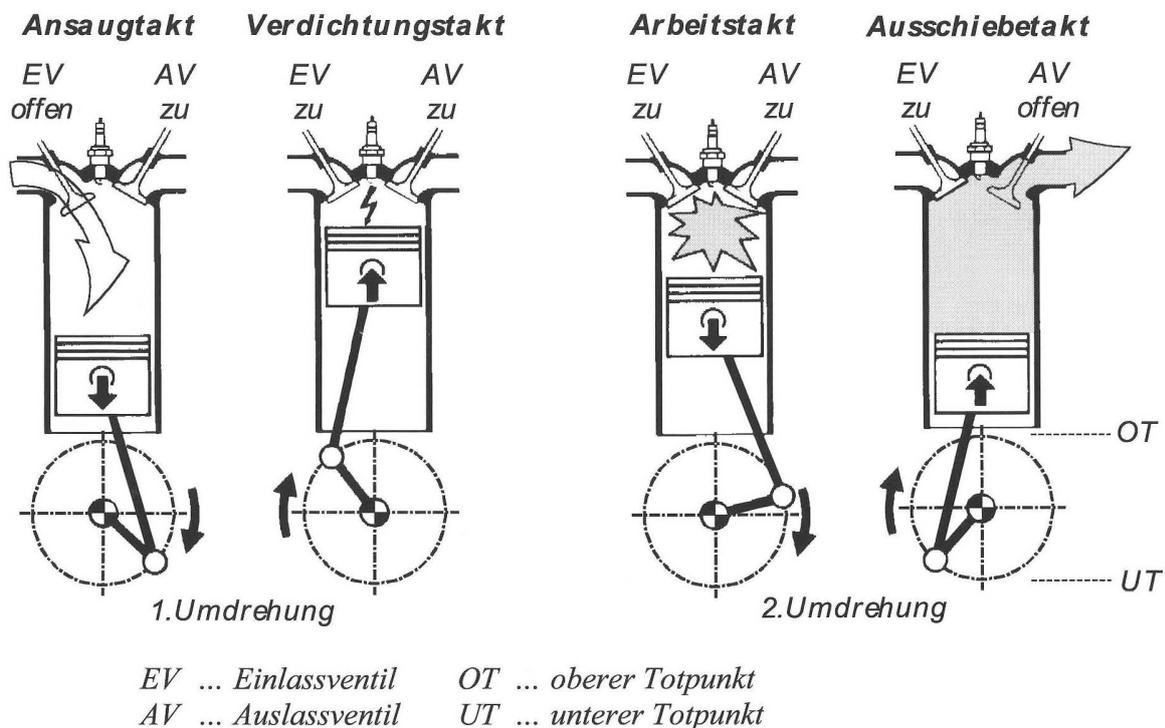


Abbildung 2-1: Arbeitsprozess des Viertaktmotors

[1]

Der Arbeitsprozess kann in 4 Takte eingeteilt werden, die sich über zwei Kurbelwellenumdrehungen verteilen.

Ansaugen: Durch die Abwärtsbewegung des Kolbens entsteht im Brennraum ein Unterdruck gegenüber dem Außendruck. Diese Druckdifferenz führt zur Füllung des

Zylinders mit Frischladung. Um eine möglichst gute Füllung zu erreichen, wird das Einlassventil (EV) bereits vor dem oberen Totpunkt geöffnet und erst nach dem unteren Totpunkt geschlossen.

Verdichten: Bei der anschließenden Aufwärtsbewegung wird die Ladung entsprechend komprimiert. Die dadurch entstehende Druck- und Temperaturerhöhung trägt zur Verdampfung des Kraftstoffes im Zylinder bei, wobei die Erhöhung vom Verdichtungsverhältnis, der Füllung als auch dem Schließen des Einlassventils abhängig ist. Bereits im Verdichtungstakt überspringt der Zündfunke an der Zündkerze. Der Verdichtungstakt endet beim oberen Totpunkt.

Arbeiten: Der Arbeitstakt beginnt im oberen Totpunkt. Die Verbrennung ist im Regelfall bereits im Gange. Die Verbrennungswärme führt zu einem weiteren Druckanstieg im Zylinder, welcher eine Kraft auf dem Kolben ausübt. Diese wird mithilfe des Kurbeltriebs in ein Drehmoment umgewandelt. Der Arbeitstakt endet mit dem Öffnen des Auslassventils.

Ausschieben: Das Auslassventil (AV) öffnet bereits vor dem unteren Totpunkt, wodurch die Abgasausströmung begünstigt wird. Diese wird durch den im Zylinder verbliebenen Druck getrieben. Dabei kann ein überkritisches Druckverhältnis anliegen, wodurch es zum Erreichen der Schallgeschwindigkeit kommen kann. Das Auslassventil schließt erst nach dem oberen Totpunkt, also erst, nachdem das Einlassventil bereits geöffnet hat. Dieser Bereich stellt die Ventilüberschneidung dar.

2.1.2 Kenngrößen

Im Folgenden werden die wichtigsten Kenngrößen beschrieben.

Verdichtungsverhältnis

Eine wichtige Kenngrößen zum Beschreiben einer Verbrennungskraftmaschine ist das Verdichtungsverhältnis. Es wird aus dem Quotienten des Hubvolumens (V_h) zum Kompressionsvolumens (V_c) gebildet, siehe Formel 2-1.

$$\varepsilon = \frac{V_h + V_c}{V_c} \quad \text{Formel 2-1}$$

Mit steigendem Verdichtungsverhältnis steigt der thermodynamische Wirkungsgrad an. Durch Glühzündungen und klopfende Verbrennung ist das Verdichtungsverhältnis nach oben hin begrenzt.

Mitteldruck

Um verschiedene Motoren und Motorkonzepte vergleichen zu können, wird die abgegebene Arbeit auf das Hubvolumen bezogen. Dieses Verhältnis wird als Mitteldruck p_m (Formel 2-2) bezeichnet, weil es die Dimension eines Druckes besitzt.

$$p_m = \frac{W}{V_h} \quad \text{Formel 2-2}$$

Unter Verwendung der an der Kurbelwelle abgegebenen Arbeit, erhält man den effektiven Mitteldruck p_e , Formel 2-3.

$$p_e = \frac{W_e}{V_h} \quad \text{Formel 2-3}$$

Die indizierte Arbeit (Formel 2-4), ist die Arbeit des Verbrennungsgases auf den Kolben und wird als indizierter Mitteldruck p_i (Formel 2-5). Bezeichnet.

$$W_i = \int p dV \quad \text{Formel 2-4}$$

$$p_i = \frac{W_i}{V_h} \quad \text{Formel 2-5}$$

Den Zusammenhang zwischen indiziertem und effektivem Mitteldruck zeigt Formel 2-6

$$p_r = p_i - p_e \quad \text{Formel 2-6}$$

Die Differenz p_r wird Reibmitteldruck genannt und ist ein Maß für die mechanischen Verluste im Motor.

$$p_r = \frac{W_r}{V_h} \quad \text{Formel 2-7}$$

Leistung und Drehmoment

Für die Leistung P und das Drehmoment M_d gelten die bekannten Zusammenhänge:

$$P = \frac{n}{2} \cdot V_H \cdot p_m \quad \text{Formel 2-8}$$

$$M_d = \frac{V_H \cdot p_m}{4\pi} \quad \text{Formel 2-9}$$

mit

$$V_H = z \cdot V_h \quad \text{Formel 2-10}$$

Darin ist P die Leistung, M_d das Moment, n die Motordrehzahl, V_H das Gesamtvolumen, z die Zylinderanzahl und p_m der Mitteldruck. Bei der Leistung, dem Drehmoment und dem Mitteldruck wird je nach Index zwischen dem effektiven Wert, dem indizierten Wert oder dem Reibwert unterschieden.

Wirkungsgrade

Eine weitere wichtige Vergleichsgröße bei Motoren stellt der Wirkungsgrad dar. Der Wirkungsgrad η ist als Quotient aus Nutzen und Aufwand definiert.

$$\eta = \frac{\text{Nutzen}}{\text{Aufwand}} \quad \text{Formel 2-11}$$

Der effektive Wirkungsgrad (Formel 2-12) wird als Quotient der effektiv abgegebenen Arbeit W_e zur zugeführten Brennstoffmenge Q_B angegeben. Die Brennstoffmenge setzt sich dabei aus der Brennstoffmasse m_B und dem unteren Heizwert H_u zusammen.

$$\eta_e = \frac{W_e}{Q_B} = \frac{W_e}{m_B \cdot H_u} \quad \text{Formel 2-12}$$

Der innere Wirkungsgrad η_i (Formel 2-13) wird mit der inneren Arbeit W_i errechnet.

$$\eta_i = \frac{W_i}{Q_B} \quad \text{Formel 2-13}$$

Der mechanische Wirkungsgrad η_m ist wie folgt definiert:

$$\eta_m = \frac{W_e}{W_i} = \frac{P_e}{P_i} = \frac{p_e}{p_i} \quad \text{Formel 2-14}$$

Dabei gilt der Zusammenhang:

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m \quad \text{Formel 2-15}$$

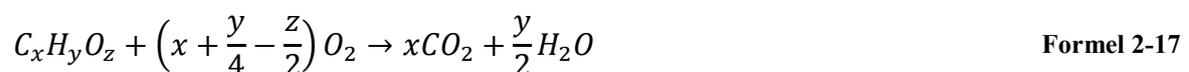
Luftbedarf und Luftverhältnis

Der stöchiometrische Luftbedarf L_{st} beziehungsweise der stöchiometrische Sauerstoffbedarf O_{2st} gibt an, wieviel kmol Luft beziehungsweise Sauerstoff für die Verbrennung von 1 kmol Kraftstoff benötigt wird. Bei festen und flüssigen Kraftstoffen wird das stöchiometrische Luftverhältnis meist mit kg Luft je kg Kraftstoff angegeben.

Das stöchiometrische Luftverhältnis wird aus dem Sauerstoffbedarf der Reaktionen und der Zusammensetzung der Luft ($N_2:O_2 = 0,79:0,21$) berechnet:

$$L_{st} = \frac{1}{0,21} \cdot O_{2st} = 4,76 \cdot O_{2st} \quad \text{Formel 2-16}$$

Die Berechnung des stöchiometrischen Luftbedarfs für eine Kohlenwasserstoffverbindung $C_xH_yO_z$ lautet:



Der Sauerstoffbedarf für eine stöchiometrische Verbrennung lautet:

$$O_{2st} = \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \left[\frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol } B}\right] \quad \text{Formel 2-18}$$

Mithilfe von Formel 2-16 ergibt sich:

$$L_{st} = 4,76 \cdot \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \left[\frac{\text{kmol } L}{\text{kmol } B}\right] \quad \text{Formel 2-19}$$

Unter Verwendung der molaren Massenanteile für C, H, S und O ergibt sich der Sauerstoffbedarf beziehungsweise der Luftbedarf in kmol je kg Kraftstoff:

$$O_{2st} = \frac{c}{12,01} + \frac{h}{4,032} + \frac{s}{32,06} - \frac{o}{32,00} \quad \text{Formel 2-20}$$

$$L_{st} = 4,76 \cdot \left(\frac{c}{12,01} + \frac{h}{4,032} + \frac{s}{32,06} - \frac{o}{32,00} \right) \quad \text{Formel 2-21}$$

Der stöchiometrische Luftbedarf in kg Luft je kg Kraftstoff ergibt sich mit:

$$L_{st} = 137,8 \cdot \left(\frac{c}{12,01} + \frac{h}{4,032} + \frac{s}{32,06} - \frac{o}{32,00} \right) \quad \text{Formel 2-22}$$

Bei der Verbrennung weicht die zugeführte Luftmenge meist vom stöchiometrischen Luftbedarf ab. Diese Abweichung wird durch das Luftverhältnis λ (Lambda) angegeben. Mit L als tatsächlich zugeführte Luftmenge ergibt sich:

$$\lambda = \frac{L}{L_{st}} = \frac{m_L}{m_{L_{st}}} \quad \text{Formel 2-23}$$

mit der zugeführten Brennstoffmasse

$$m_{L_{st}} = L_{st} \cdot m_B \quad \text{Formel 2-24}$$

ergibt sich

$$\lambda = \frac{m_L}{L_{st} \cdot m_B} \quad \text{Formel 2-25}$$

Im englischsprachigen Raum wird häufig der Kehrwert des Luftverhältnisses verwendet und wird als „Equivalence Ratio“ bezeichnet.

$$\Phi = \frac{L_{st}}{L} = \frac{1}{\lambda} \quad \text{Formel 2-26}$$

Gemischheizwert

Für den mittleren effektiven Druck und das Drehmoment ist bei Verbrennungsmotoren die eingebrachte Brennstoffenergie maßgebend. Zum Bestimmen dieser Energie wird der Gemischheizwert H_G verwendet. Er bezeichnet die Energie die mit 1 m³ Frischladung (auf Umgebungszustand bezogen) in den Zylinder eingebracht werden kann. Bei Ottomotoren (Gemischansaugend) bezieht sich der Gemischheizwert auf 1 m³ Gemisch, und bei luftansaugenden Motoren auf 1 m³ Luft.

Für gemischansaugende Motoren gilt:

$$H_G = \frac{m_B \cdot H_u}{V_G} \quad \text{Formel 2-27}$$

Setzt man für V_G

$$V_G = \frac{m_L + m_B}{\rho_G} \quad \text{Formel 2-28}$$

und für m_L

$$m_L = \lambda \cdot L_{St} \cdot m_B$$

Formel 2-29

ergibt sich der Gemischheizwert für den gemischansaugenden Motor:

$$H_G = \frac{H_u \cdot \rho_G}{\lambda \cdot L_{St} + 1}$$

Formel 2-30

2.2 Schadstoffe, Schadstoffbildung und Abgasnachbehandlung [3] [4] [5]

Es sollen sowohl alle bei der Verbrennung entstehenden Komponenten kurz beschrieben werden, als auch geeignete Gegenmaßnahmen aufgezeigt werden.

In Abbildung 2-2 ist das Verhalten der drei wichtigsten Schadstoffkomponenten eines Ottomotors in Abhängigkeit des Luftverhältnisses dargestellt. Dabei stellen Kohlenmonoxide (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) Produkte der unvollständigen Verbrennung dar, während die Stickoxide durch hohe Verbrennungstemperaturen und Sauerstoffüberschuss entstehen.

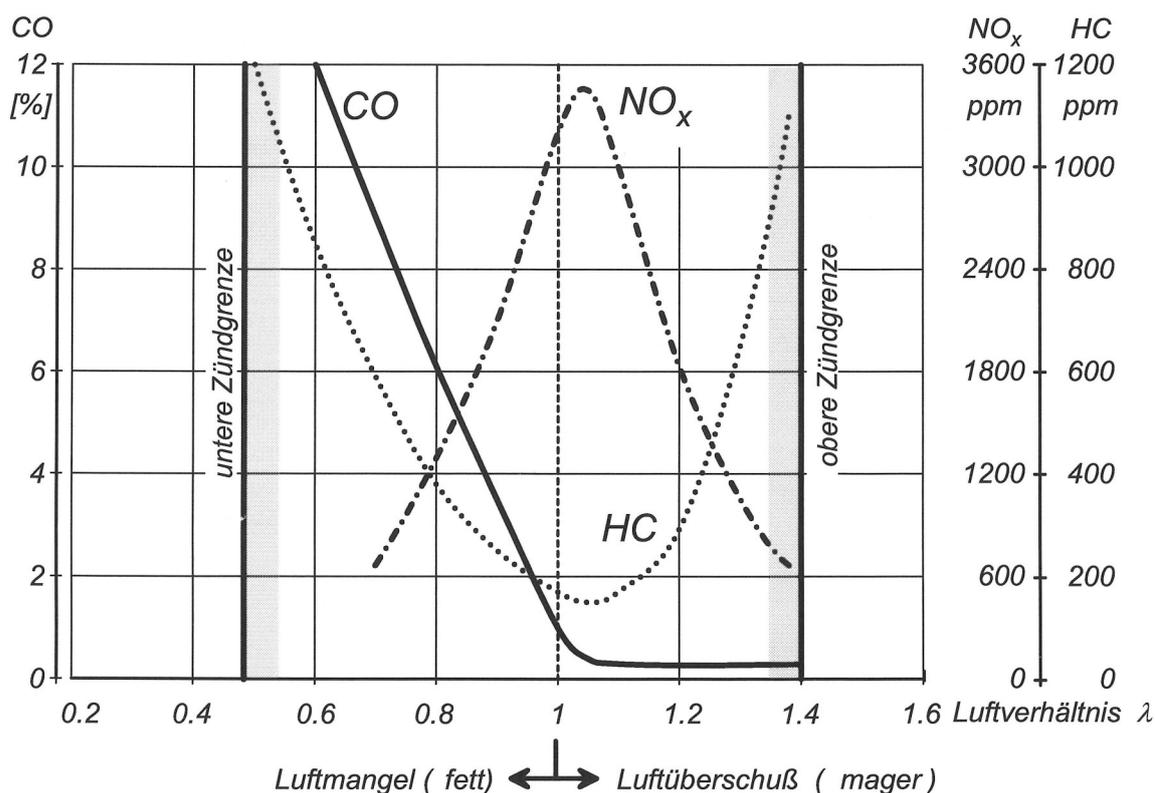


Abbildung 2-2: Prinzipielles Abgasverhalten eines Ottomotors in Abhängigkeit des Luftverhältnisses

[1]

2.2.1 Kohlendioxid (CO₂)

Kohlendioxid ist das Produkt der vollständigen Verbrennung. Es gilt nicht als Schadstoff, da es keine toxische Auswirkung auf den Menschen und die Umwelt hat. Dennoch ist die Reduktion von CO₂ von besonderer Bedeutung, da dieses Gas ein hochwirksames

Treibhausgas darstellt. Um eine Erwärmung der Erdatmosphäre zu vermeiden, ist eine Verminderung von CO₂-Emissionen unabdingbar.

Kohlendioxid entsteht bei der Verbrennung von organischem Material. Relevant für die anthropogene Änderung der CO₂-Konzentration in der Atmosphäre sind vor allem fossile Brennstoffe. Bei der vollständigen Verbrennung von Erdgas oder Kraftstoffen auf Öl-Basis wird der im Brennstoff gebundene Kohlenstoff oxidiert.



Eine Reduktion von Kohlendioxid kann somit durch Verwendung von Kraftstoffen mit geringerem Kohlenstoffgehalt wie zum Beispiel Erdgas beziehungsweise Biogas, oder durch eine Effizienzsteigerung bei der Verbrennung von fossilen Brennstoffen erreicht werden.

2.2.2 Kohlenwasserstoffe (HC)

Kohlenwasserstoffemissionen umfassen alle organischen Verbindungen die beim Betrieb einer Verbrennungskraftmaschine emittiert werden. Es gibt mehr als 1000 verschiedene HC-Moleküle, die bei der Verbrennung von Benzin oder Diesel entstehen können. Die hohe Anzahl an möglichen Bindungsarten ist auf die Fähigkeit des Kohlenstoffatoms zurückzuführen, sowohl Ketten als auch Ringe zu bilden. Die Auswirkungen auf den Menschen und die Umwelt sind stark von der Verbindung abhängig und reichen von Treibhausgasen wie Methan bis hin zu kanzerogenen Substanzen wie Benzol. Von besonderer Bedeutung sind die „Polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe“ (PAH). Diese Gruppe von Kohlenwasserstoffmolekülen umfasst mehrere hundert verschiedene Arten, von denen einige als gesundheitsgefährdend gelten. [4]

Kohlenwasserstoffe sind des Weiteren an der Ozonbildung beteiligt (siehe Kapitel 2.2.4).

Kohlenwasserstoffe werden durch unverbrannten Kraftstoff hervorgerufen. Die Auslöschung der Flamme kann verschiedene Gründe haben. Zum einen kommt es zur Abkühlung unter die Verbrennungstemperatur in der Nähe von Zylinderwänden und anderen kalten Stellen im Brennraum. Des Weiteren kann es durch ein zu hohes Turbulenzniveau im Zylinder zu einem Verblasen der Flamme und dadurch zum Erliegen der Verbrennung führen. Beim Über- oder Unterschreiten der Zündgrenzen kommt es ebenfalls zu einem starken Ausstoß von unverbrannten Kohlenwasserstoffen. Hierbei ist zu beachten, dass das lokale Luftverhältnis relevant ist. Dies kann, je nach Grad der Homogenisierung des Gemisches, vom globalen Luftverhältnis im Brennraum abweichen.

Während die ersten beiden Mechanismen einen starken geometrischen Einfluss aufweisen, ist der Einfluss von λ von der Vormischzeit, sowie dem gewählten globalen Luftverhältnis abhängig. Die HC-Emissionen können mithilfe eines Oxidationskatalysators, bei ausreichendem Sauerstoffangebot, sehr gut reduziert werden. Um die vom Gesetzgeber geforderten strengen Grenzwerte hinsichtlich Kohlenwasserstoffemissionen einhalten zu können, ist zudem ein schnelles Ansprechen des Katalysators unabdingbar.

2.2.3 Kohlenmonoxid (CO)

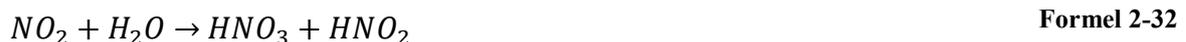
Kohlenmonoxid ist ein farb- und geruchloses Gas. Es besitzt eine höhere Affinität zu Hämoglobin als Sauerstoff und ist daher hoch toxisch. Hämoglobin ermöglicht den Sauerstofftransport im menschlichen Organismus. Bei zu hoher Aufnahme von CO besteht daher Erstickungsgefahr.

Kohlenmonoxid tritt typischerweise bei fetter Verbrennung auf. Es kommt dabei zum vollständigen Verbrauch von Sauerstoff, ohne den die Verbrennung nicht möglich ist.

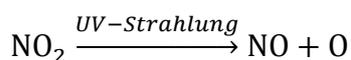
Die CO-Emissionen können innermotorisch durch die Vermeidung von fetten Gemischzonen, sowie mithilfe eines Oxidationskatalysators mit Luftüberschuß verringert werden. Von besonderer Bedeutung sind die fetten Betriebszustände beim Kaltstart.

2.2.4 Stickstoffoxide (NO_x)

Stickoxide treten vor allem bei sehr hohen Verbrennungstemperaturen auf. Hierbei oxidiert der in der Luft vorhandene Sauerstoff mit dem ebenfalls vorliegenden Stickstoff. Es tritt bei der innermotorischen Verbrennung sowohl NO als auch NO₂ auf, wobei der Anteil von NO erheblich höher ist als NO₂. Durch die Oxidation in einem Katalysator bzw. durch Einfluss von Sonnenlicht kann NO zu NO₂ aufoxidiert werden (vergleiche [4]). Vor allem NO₂ ist aus humanbiologischer Sicht kritisch, da es zu einer Beeinträchtigung der Lungenfunktion führen kann. Bei sehr hohen Konzentrationen von NO₂ können sogar letale Lungenödeme entstehen. NO₂ ist weiters verantwortlich für die Entstehung von bodennahem Ozon und für die Bildung von „Saurem Regen“ welcher eine Überdüngung von Böden zur Folge haben kann. Er entsteht durch die Bildung von Salpetersäure nach folgender Reaktionsgleichung:



Die Bildung von Ozon ist aus nachstehenden Gleichungen ersichtlich:



Dabei ist M ein Stoßpartner, z. B. N₂, der zur Erfüllung der Energiebilanz nötig ist.

Verläuft die Oxidation des bei der Bildung von Ozon gebildeten NO unter Einwirkung von Radikalen so erhöht sich die Ozonkonzentration. Als Radikale können unverbrannte Kohlenwasserstoffverbindungen dienen. Die Ozonbelastung ist also sowohl von der zur Verfügung stehenden NO₂- als auch HC-Emissionen abhängig. In Abbildung 2-3 ist der prinzipielle Zusammenhang aus NO_x und HC dargestellt.

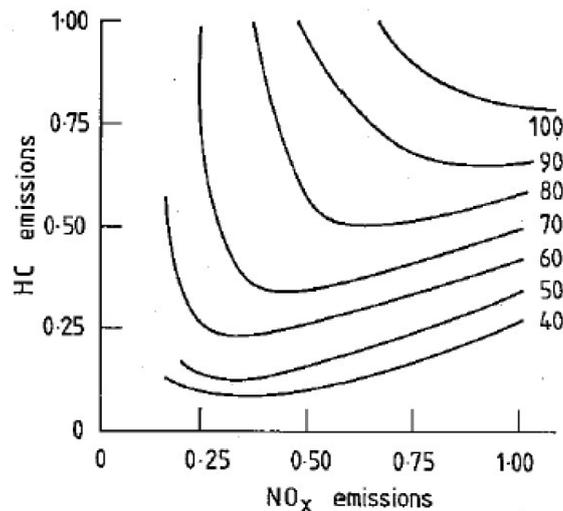


Abbildung 2-3: Abhängigkeit der Ozonkonzentration von NO_x und HC Emissionen [4]

Die Entstehung von Stickoxiden kann in die thermische Bildung, die prompte Bildung sowie die Umwandlung aus Brennstoffstickstoff unterteilt werden. Während bei den Letzteren der Stickstoff mittels Zwischenreaktionen in Verbindung mit Kraftstoff zu NO beziehungsweise NO_2 oxidiert wird, ist die thermische Bildung stark von der Verbrennungstemperatur abhängig. Überschreitet die Gastemperatur $2000\text{ }^\circ\text{C}$ stellt man einen starken Anstieg von Stickoxiden fest. Dieser Mechanismus ist nach seinem „Entdecker“ Zeldovich benannt.

Während die Reduktion von Stickoxiden bei Magerkonzepten mitunter sehr aufwändig sein kann, ist bei einer $\lambda = 1$ Verbrennung die Dezimierung der Stickoxide mithilfe eines Drei-Wege-Katalysators verhältnismäßig einfach realisierbar.

2.2.5 Abgasnachbehandlung

Bei einem Ottomotor, der mit einem stöchiometrischen Gemisch betrieben wird, stellt eine Abgasnachbehandlung mittels Drei-Wege-Katalysator eine sehr gute Lösung dar. Dieser ermöglicht die Reduktion aller, bei der Verbrennung entstehenden, relevanten Schadstoffe. Dabei setzt der Katalysator die für die chemischen Reaktionen notwendigen Aktivierungsenergien herab, sodass der angestrebte Zustand der vollständigen Verbrennung erreicht werden kann. Es kommt zu einer Oxidation der Kohlenwasserstoffe, sowie des Kohlenmonoxids zu CO_2 .



Auch die Stickoxide können mithilfe des Katalysators reduziert werden. NO entspricht keinem Gleichgewichtszustand. Der Zerfall von Stickoxiden in molekularen Stickstoff findet auch bei Umgebungstemperatur nach dem Ausstoß aus dem Fahrzeug statt. Die Halbwertszeit ist jedoch ungleich länger und beträgt für NO beispielsweise 1 - 2 Tage, während im Katalysator eine Konvertierungsrate von über 90 % in weniger als 1 Sekunde

erreicht werden kann. NO kann durch mehrere Abgaskomponenten reduziert werden. In Formel 2-36 ist die Reduktionsgleichung mit CO angeführt.



Um ausreichend hohe Konvertierungsraten der drei wichtigsten Abgaskomponenten zu erhalten, ist ein Betrieb mit einem stöchiometrischen Gemisch beziehungsweise Abgas notwendig. In Abbildung 2-4 sind die möglichen Konvertierungsraten über das Luftverhältnis λ aufgetragen. Es zeigt sich ein sehr kleiner Betriebsbereich bei $\lambda \sim 1$. In diesem Fenster können sowohl Stichoide reduziert als auch Kohlenmonoxide und Kohlenwasserstoffe oxidiert werden. Liegt Luftmangel vor ($\lambda < 1$) können CO und HC nicht konvertiert werden, während bei Luftüberschuss ($\lambda > 1$) NO und NO₂ nicht ausreichend reduziert werden können.

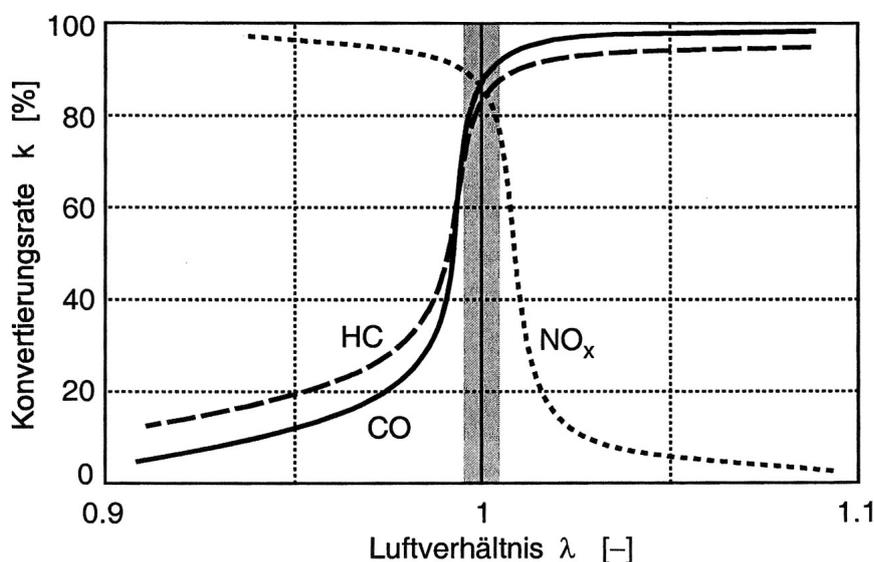


Abbildung 2-4: Konvertierungsraten über λ

[2]

Aufbau

Ein Katalysator kann in einen Trägerkörper, eine Zwischenschicht und eine katalytisch aktive Schicht unterteilt werden. Der Trägerkörper kann aus Keramik oder gewickeltem Stahlblech bestehen. Er besitzt eine wabenförmige Struktur, die mit einer Zwischenschicht und der katalytischen Schicht überzogen ist (Abbildung 2-5).

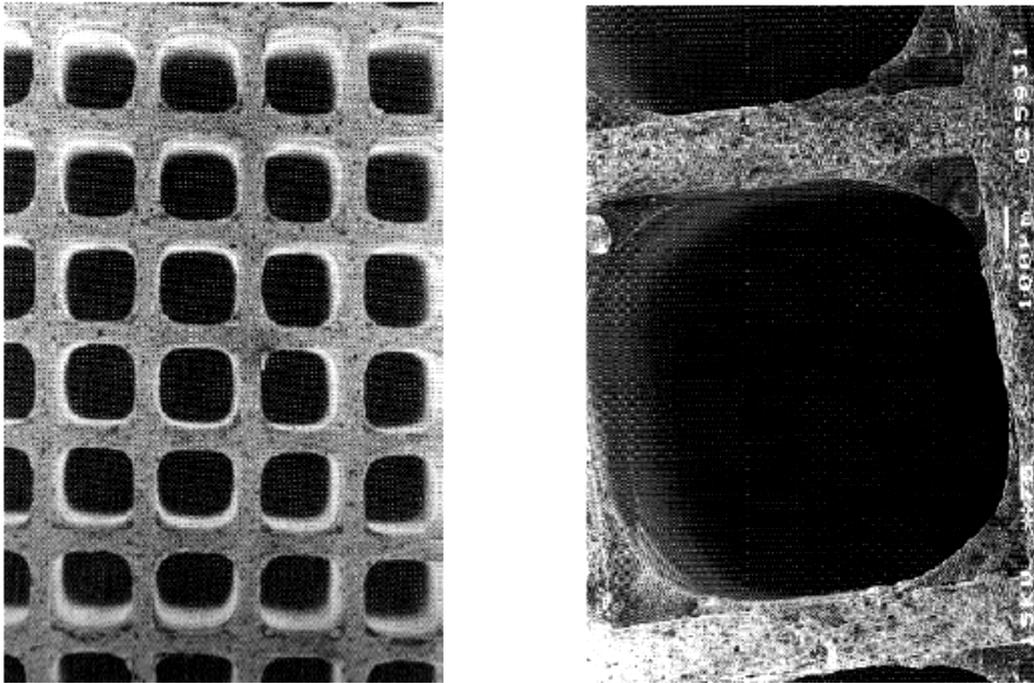


Abbildung 2-5: Kanäle eines unbeschichteten Wabenkatalysators (links) und eines beschichteten Einzelkanals (rechts) [3]

Die Zwischenschicht ist maßgeblich für die Vergrößerung der katalytisch aktiven Oberfläche verantwortlich. Dieser so genannte *Washcoat* besteht hauptsächlich aus Aluminiumoxid und weist eine starke Porosität auf. In Abbildung 2-6 ist eine vergrößerte Ansicht des *Washcoats* dargestellt. Die aktive Schicht selbst besteht meist aus Platin, Rhodium und Palladium. Weiters kommen Ceriumoxid und Zirkoniumoxid als Sauerstoffspeicher zum Einsatz.

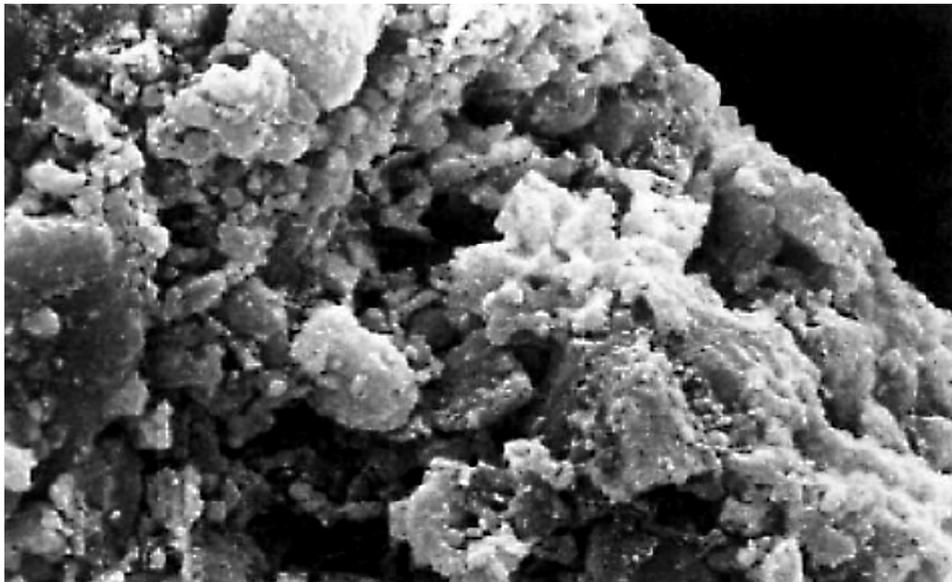


Abbildung 2-6: Washcoat [3]

Im Gegensatz zu einem Rußpartikelfilter, dessen Kanäle an einem Ende verschlossen sind, ist ein Drei-Wege-Katalysator an beiden Enden der Wabenstruktur offen. Eine Konvertierung des Abgases kann jedoch nur an der katalytischen Oberfläche stattfinden. Der dazu notwendige Stoffstrom von der Kanalmitte zur Kanalwand kann durch

verschiedene Mechanismen realisiert werden. Neben der Strömung und der Wärmekonvektion ist auch die Diffusion entscheidend.

Anspringtemperatur des Katalysators (Light-Off)

Der Katalysator benötigt eine gewisse Mindesttemperatur, damit die Umwandlung der Schadstoffe wirkungsvoll beschleunigt wird. Unter dieser Temperatur laufen die Umwandlungsprozesse zwar auch ab, jedoch so langsam, dass keine nennenswerten Konvertierungsraten erzielt werden. Die Mindesttemperatur wird auch als Anspringtemperatur oder im englischen Light-Off genannt. Die Konvertierungsrate steigt im Bereich dieser Anspringtemperatur rasch an. Die Anspringtemperatur ist diejenige Temperatur, bei der eine Konvertierungsrate von 50 % erreicht wird. Die Temperatur ist von der betrachteten Abgaskomponente abhängig und liegt bei rund 250 °C. Es nehmen auch die Zusammensetzung der Katalysatorbeschichtung und die Alterung Einfluss auf die Konvertierungsraten.

Alterung

Die Alterung eines Katalysators, das heißt die Verschlechterung der Konvertierungsraten und eine höhere Light-Off Temperatur, ist grundsätzlich durch zwei Vorgänge bedingt. Zum einen tritt durch hohe Temperaturen eine thermische Deaktivierung auf und zum anderen kann durch Bestandteile des Abgases eine so genannte „Vergiftung“ auftreten.

Die thermisch bedingte Deaktivierung kann auf zwei Arten erfolgen. Durch die so genannte Edelmetallsinterung wachsen die feinen Edelmetallkristalle auf der Katalysatoroberfläche zu großen Kristallen zusammen, siehe rechte Darstellung in Abbildung 2-7.

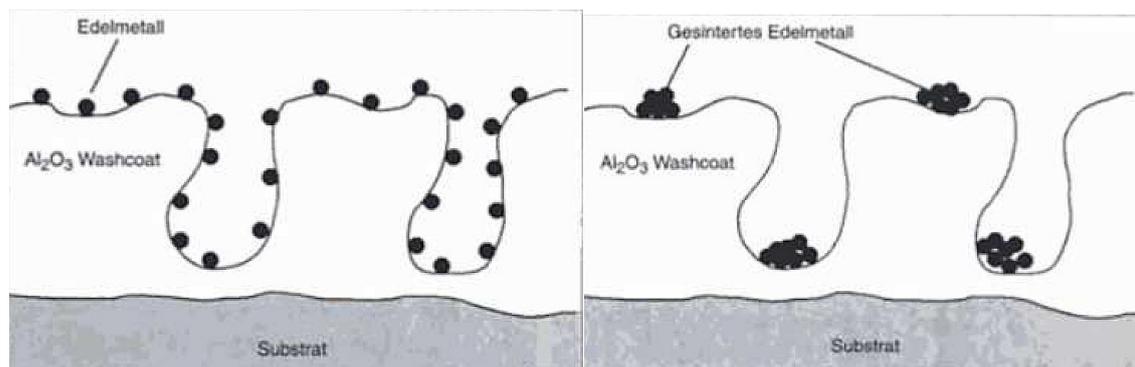


Abbildung 2-7: Schema eines frischen Katalysator (links) und der Edelmetallsinterung (rechts) [5]

Durch das Zusammenwachsen der Kristalle nimmt die Anzahl der aktiven Bereiche ab und die zur Verfügung stehende Oberfläche sinkt.

Der zweite Effekt, der durch hohe thermische Beanspruchung auftritt, ist die Trägermaterialsinterung. Durch diesen Prozess verkleinern sich die Porendurchmesser. Es kann dabei sogar zum Zusammenfall der Porenstruktur kommen (Abbildung 2-8).

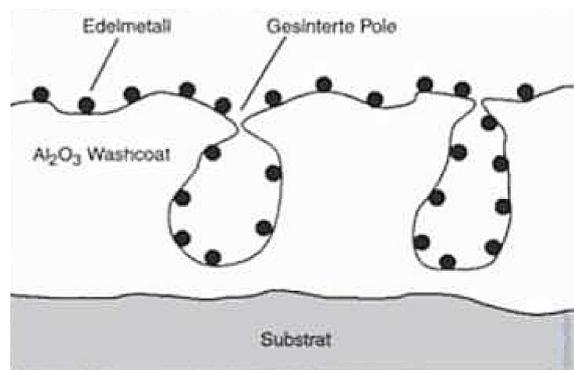


Abbildung 2-8: Schema der Trägermaterialsinterung eines Katalysators

[5]

Bei der Vergiftung eines Katalysators treten auch zwei Arten auf. Bei der selektiven Vergiftung reagieren Bestandteile des Abgases mit Komponenten der katalytischen Beschichtung (Abbildung 2-9). Dabei kommt es zur Bildung einer inaktiven Legierung. Bekannte Stoffe für die selektive Vergiftung sind Blei, Quecksilber und Cadmium. Die selektive Vergiftung ist irreversibel.

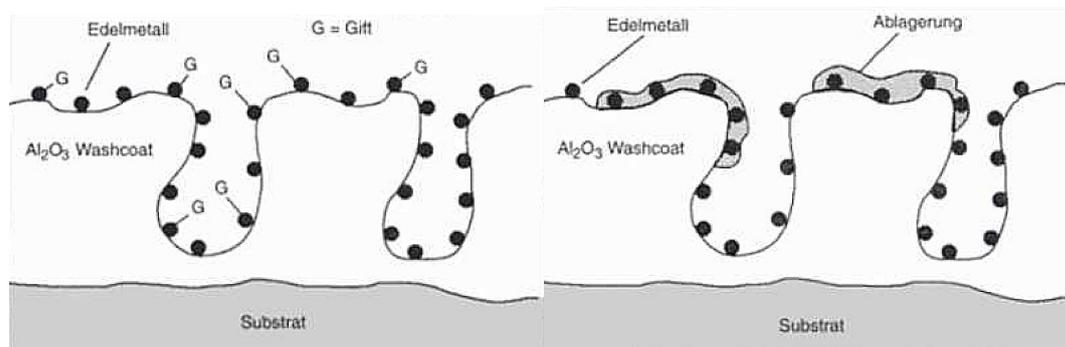


Abbildung 2-9: Schema der selektiven (links) und nicht selektiven (rechts) Vergiftung eines Katalysators

[5]

Die nicht selektive Vergiftung sind Ablagerungen wie zum Beispiel Rußpartikel auf dem Washcoat. Dadurch sind die aktiven Bereiche beziehungsweise ganze Poren nicht zugänglich. Diese Ablagerungen können durch höhere Temperaturen wieder abgebrannt werden, jedoch besteht die Gefahr der thermischen Schädigung.

2.3 Abgasgesetzgebung in Europa

[6] [7] [8]

Im Jahr 1999 ist mit der Richtlinie 97/24/EG erstmals das Typprüfverfahren zur Limitierung des Schadstoffausstoßes bei Krafträdern europaweit vereinheitlicht worden. Bei Personenkraftwagen ist eine solche Regelung bereits 1970 vereinheitlicht worden.

Derzeit sind die Vorschriften bei PKW wesentlich restriktiver als bei Krafträdern. Die Anforderungen bei Krafträdern sollen jedoch schrittweise an die des PKWs angepasst werden.

2.3.1 Einteilung der Fahrzeugklassen

Die europäische Regelung 97/24/EG sieht bei der Gesetzgebung für Euro 4 und Euro 5 eine Unterteilung der Fahrzeuge nach Hubraum und Bauartgeschwindigkeit vor. Dabei wird in drei Klassen und mehreren Unterklassen unterschieden, siehe Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: Einteilung der Fahrzeuge nach Hubraum und Bauartgeschwindigkeit

Klasse	Unterklasse	Hubraum	Geschwindigkeit
1	1.1	$50 \text{ cm}^3 \leq \text{Motorhubraum}$	$50 \text{ km/h} < v_{\text{max}} \leq 60 \text{ km/h}$
	1.2	$50 \text{ cm}^3 < \text{Motorhubraum} < 150 \text{ cm}^3$	$v_{\text{max}} < 50 \text{ km/h}$
	1.3 ¹	$\text{Motorhubraum} < 150 \text{ cm}^3$	$50 \text{ km/h} \leq v_{\text{max}} < 100 \text{ km/h}$
2	2.1	$\text{Motorhubraum} < 150 \text{ cm}^3$	$100 \text{ km/h} \leq v_{\text{max}} < 115 \text{ km/h}$
		$\text{Motorhubraum} \geq 150 \text{ cm}^3$	$v_{\text{max}} < 115 \text{ km/h}$
	2.2		$115 \text{ km/h} \leq v_{\text{max}} < 130 \text{ km/h}$
3	3.1		$130 \text{ km/h} \leq v_{\text{max}} < 140 \text{ km/h}$
	3.2		$v_{\text{max}} \geq 140 \text{ km/h}$

Die Klassenunterteilung gibt an, welche Teile des *World Harmonized Motorcycle Test Cycle (WMTC)*, für die Homologation eines Kraffrades gefahren werden müssen, vergleiche Kapitel 2.3.2. Dabei muss in *Klasse 1* der erste Teil zweimal hintereinander durchfahren werden (Kaltphase und Warmphase). In *Klasse 2* muss der erste und zweite Teil und bei *Klasse 3* alle Teile des *WTMC* absolviert werden.

Die Unterklassen geben an, ob der Zyklusteil in normaler Geschwindigkeit oder mit einer reduzierten Geschwindigkeit gefahren werden muss. Dabei weisen die niedrigeren Ziffern auf eine reduzierte Geschwindigkeit hin.

2.3.2 World Harmonized Motorcycle Test Cycle (WMTC)

Der hier beschriebene Testzyklus *World Harmonized Motorcycle Test Cycle (WMTC)* ist für die kommende Abgasgesetzgebungen *Euro 4* im Jahr 2016 und für die Abgasgesetzgebung *Euro 5*, welche für das Jahr 2020 vorgesehen ist, vorgeschrieben.

Auch bei der Abgasnorm *Euro 3* hat man bereits den *WMTC* als Alternative zum damals vorgeschriebenen *Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ)* nutzen können. Für die Richtlinie von *Euro 4* ist der *WMTC* leicht überarbeitet worden. Für die *Euro 5* Grenzwerte soll der Fahrzyklus nochmals überarbeitet werden. [7]

Der *WMTC* besteht insgesamt aus drei Teilen, siehe Abbildung 2-10 bis Abbildung 2-12. Es müssen jedoch nicht alle Fahrzeuge alle drei Zyklen durchfahren. Abhängig von Hubraum und Höchstgeschwindigkeit sind nur gewisse Zyklen für die Homologation erforderlich, vergleiche Kapitel 2.3.1.

¹ inkludiert nicht Unterklasse 1.1

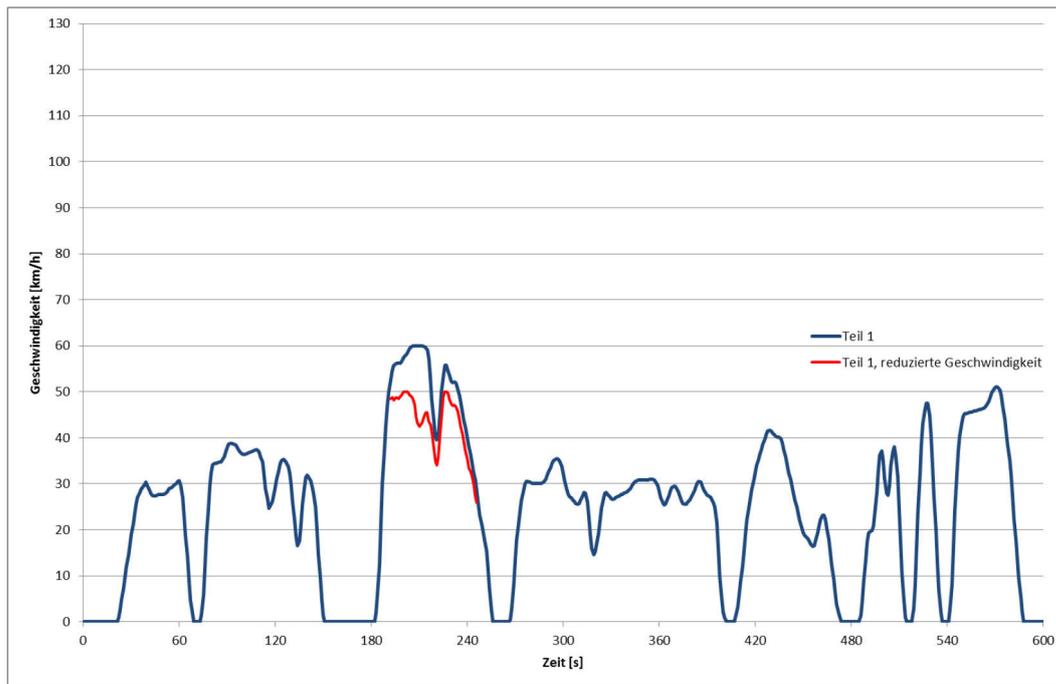


Abbildung 2-10: WMTC Teil 1 und Teil 1 mit reduzierter Geschwindigkeit

Der in Abbildung 2-10 dargestellte erste Teil des *WMTC* repräsentiert ein städtisches Fahrprofil. Dieser Abschnitt ist der herausforderndste Teil des Testzyklus, weil hier der Kaltstart und der Warmlauf des Motors stattfinden. Bei reduzierter Geschwindigkeit liegt die Höchstgeschwindigkeit in diesem Bereich bei 50 km/h, ansonsten bei 60 km/h.

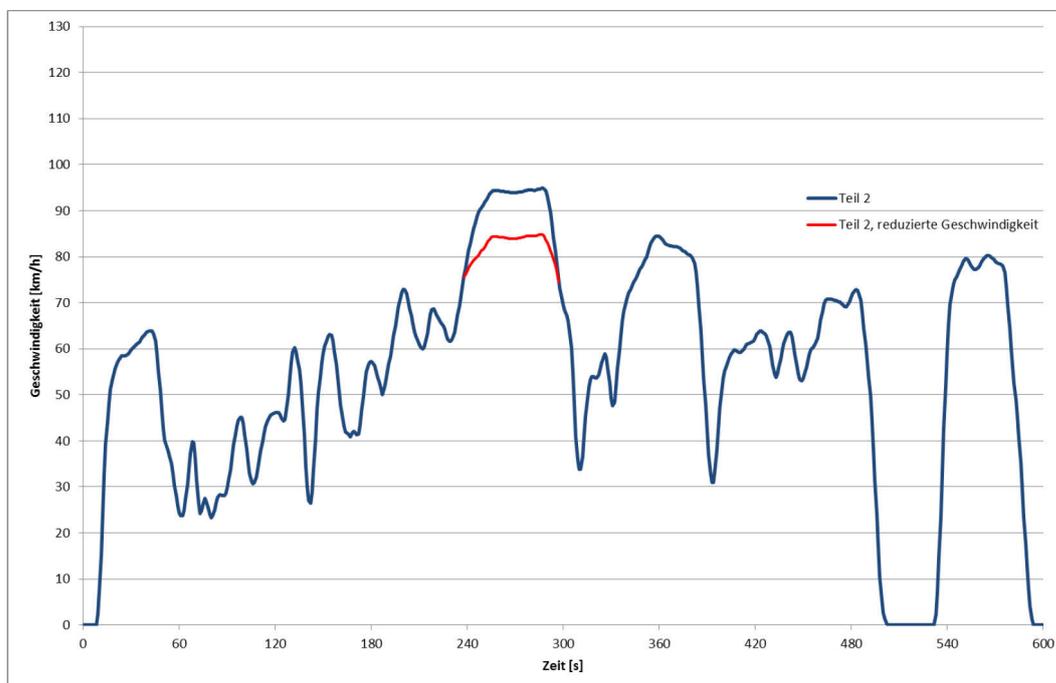


Abbildung 2-11: WMTC Teil 2 und Teil 2 mit reduzierter Geschwindigkeit

Der zweite Teil des *WMTC*, siehe Abbildung 2-11, entspricht Überlandbedingungen. Das reduzierte Geschwindigkeitsmaximum liegt hier bei 85 km/h, ansonsten bei 95 km/h.

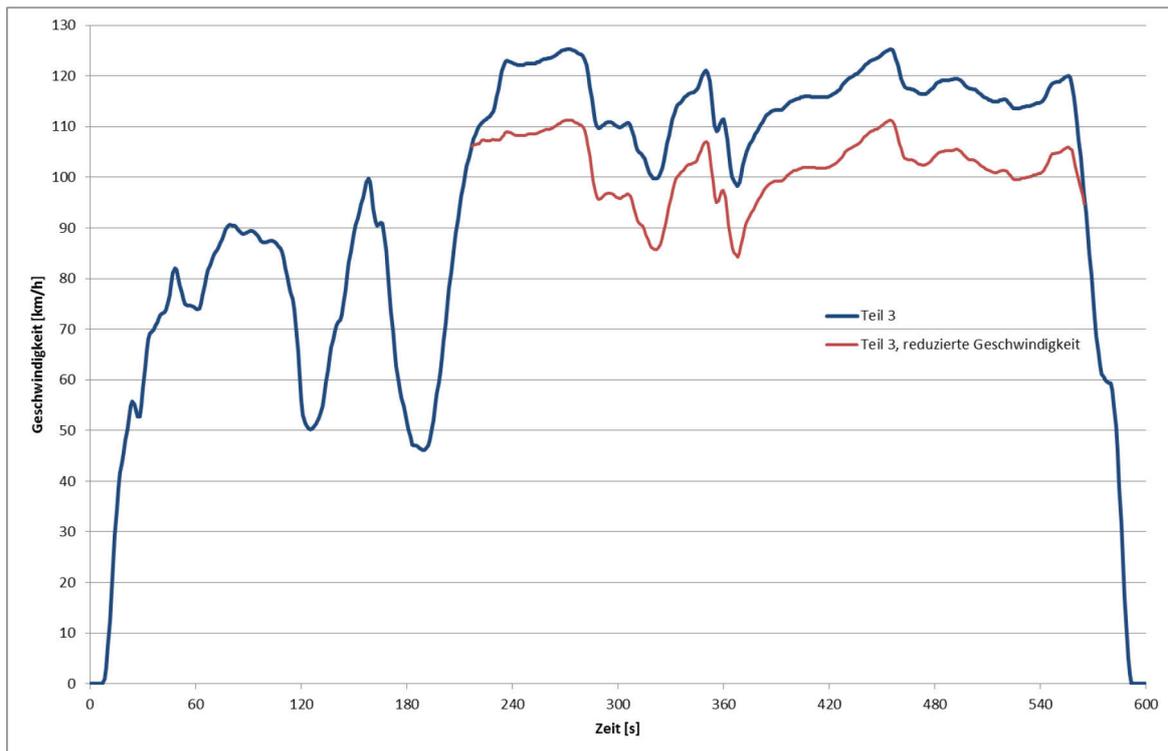


Abbildung 2-12: WMTC Teil 3 und Teil 3 mit reduzierter Geschwindigkeit

In Abbildung 2-12 ist der dritte Teil des *WMTC* ersichtlich, der einen Fahrtverlauf für Autobahnen widerspiegelt. Die Höchstgeschwindigkeit beträgt dabei 125 km/h, die bei reduzierter Geschwindigkeit circa 111 km/h. Bei dem Fahrzeug, das in dieser Diplomarbeit behandelt wird, wird der dritte Teil nicht gefahren.

2.3.3 Grenzwerte

Die in der Norm 97/24/EC geregelten Abgase sind Kohlenwasserstoffe (HC), Kohlenmonoxid (CO) und Stickoxide (NO_x). Kohlendioxid (CO₂) gilt zwar als Treibhausgas, ist jedoch ein Ergebnis der vollständigen Verbrennung von kohlenwasserstoffhaltigen Kraftstoffen, wie Benzin und Diesel, und somit nicht reglementiert. Für Euro 4 und Euro 5 ist zudem auch der Ausstoß von Partikeln (PM) bei Motoren mit Selbstzündung (CI) begrenzt. Die Berücksichtigung von Nichtmethankohlenwasserstoffen (NMHC) ist für die Euro 5 Reglementierung vorgesehen. In Tabelle 2-2 sind die Grenzwerte der reglementierten Emissionen für Fremdzündungsmotoren (PI) und Selbstzündungsmotoren (CI) dargestellt.

Tabelle 2-2: Euro Abgasgrenzwerte nach Antriebsklassen

Antriebsklasse	Abgasnorm	Testzyklus	HC [g/km]	CO [g/km]	NO _x [g/km]	NMHC [g/km]	PM
I (< 150 cm³)	Euro 2	NEFZ	1,20	5,50	0,30		
II (≥ 150 cm³)		(Euro 2)	1,00	5,50	0,30		
I (< 150 cm³)	Euro 3	NEFZ	0,80	2,00	0,15		
II (≥ 150 cm³)		(Euro 3)	0,33	2,00	0,15		
v_{max} < 130 km/h	(seit 01.01.2006)	WMTC	0,75	2,62	0,17		
v_{max} ≥ 130 km/h			0,30	2,62	0,22		
PI, PI Hybrid v_{max} < 130 km/h	Euro 4	WMTC	0,38	1,14	0,07		
PI, PI Hybrid v_{max} ≥ 130 km/h			(ab 01.01.2016)	(Stufe 2)	0,17	1,14	0,09
CI, CI Hybrid			0,10	1,00	0,30		80
PI, PI Hybrid	Euro 5	WMTC	0,10	1,00	0,06	0,068	4,5 ²
CI, CI Hybrid			(ab 01.01.2020)	(überarbeitet)	0,10	0,50	0,09

Ab der Euro 4 Gesetzgebung wird erstmals im Motorradsektor eine Dauerhaltbarkeit verlangt. Die Hersteller müssen eine Haltbarkeit aller abgasrelevanten Bauteile für Fahrzeuge bis 130 km/h Bauartgeschwindigkeit für 20000 km garantieren. Für Fahrzeuge über 130 km/h sogar für 35000 km. Dabei haben die Hersteller die Möglichkeit, wenn sie die Dauerhaltbarkeit nicht selbst mit Versuchen bestimmen wollen, gesetzliche Verschlechterungsfaktoren zu benutzen (Tabelle 2-3).

Tabelle 2-3: Verschlechterungsfaktoren

Norm	Klasse	HC	CO	NO _x	NMHC	PM
Euro 4		1,2	1,3	1,2	-	1,1
Euro 5	PI, PI Hybrid	1,3	1,3	1,3	1,3	1,0
	CI, CI Hybrid	1,1	1,3	1,1	1,1	1,0

² nur für Benzin-Direkteinspritzung (DI)

3 Experimentelle Untersuchungen

Im Folgenden wird die Vorgehensweise der durchgeführten experimentellen Untersuchungen genauer beschrieben. Zuerst soll auf den Versuchsträger für Motor und Fahrzeug eingegangen werden. In weiterer Folge wird dann die Beschaffenheit der Prüfstände inklusive der verwendeten Messtechnik näher erläutert. Schlussendlich sollen die einzelnen Versuchsvorgänge detailliert beschrieben werden.

3.1 Versuchsträger

3.1.1 Fahrzeug

Das Versuchsfahrzeug ist eine *Yamaha FZ 150i*, siehe Abbildung 3-1. Der in dem Fahrzeug verbaute Motor ist nach einem Baukastenprinzip entwickelt worden und ist in verschiedenen Hubraumversionen erhältlich. Zur Veränderung des Hubraums muss lediglich der Zylinder und der Kolben getauscht werden.

Das im Motorgehäuse integrierte Getriebe hat fünf Gänge. Es kann auch als 6-Gang-Getriebe ausgeführt sein. Dazu sind eine andere Schaltwalze und die Zahnräder für die sechste Getriebestufe erforderlich.



Abbildung 3-1: Versuchsfahrzeug Yamaha FZ 150i am Rollenprüfstand

3.1.2 Motor

Der Versuchsmotor am Prüfstand stammt aus dem Motorrad *Yamaha YZF-R125DE*, siehe Abbildung 3-2. Es ist der gleiche Motor, wie der der *Yamaha FZ150i*, jedoch mit anderem Zylinder und Kolben.

Der Motor ist aus dem Fahrzeug ausgebaut und am Motorprüfstand aufgebaut worden. Im Zuge dessen sind der Zylinder und der Kolben getauscht worden, sodass der Motor dem im Fahrzeug entspricht. Der einzige Unterschied im Vergleich zum Fahrzeug ist das Sechsgang-Getriebe. Dies hat jedoch keine Auswirkungen, da am Motorprüfstand keine Gangwechsel im Betrieb durchgeführt werden.

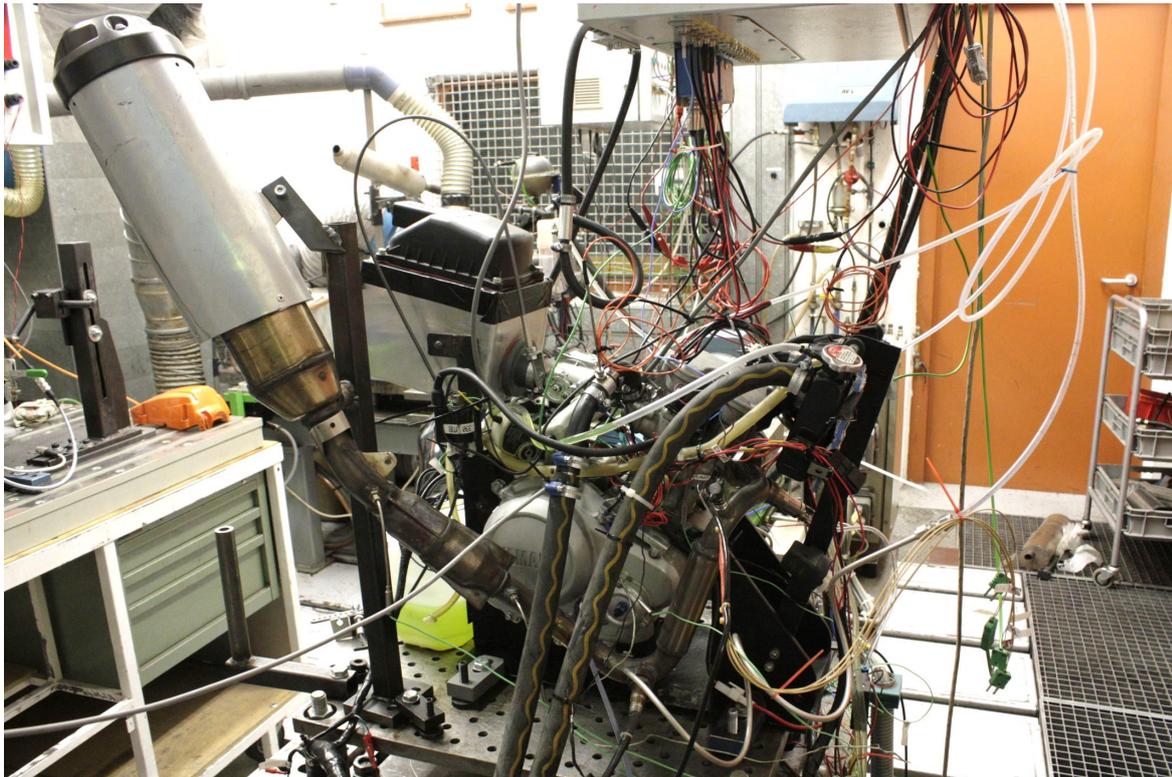


Abbildung 3-2: Versuchsmotor am Motorprüfstand

3.1.3 Technische Daten des Versuchsträgers

Im Folgenden sind die technischen Daten tabellarisch aufgeführt. In Tabelle 3-1 werden die Grundabmaße des Fahrzeuges wiedergegeben.

Tabelle 3-1: Abmessungen und Gewicht des Versuchsfahrzeuges

Abmessungen	
Gesamtlänge [mm]	2000
Gesamtbreite [mm]	705
Gesamthöhe [mm]	1035
Sitzhöhe [mm]	790
Radstand [mm]	1282
Bodenfreiheit [mm]	167
Wendehalbkreis [mm]	2080
Gewicht	
Mit Öl und Kraftstoff [kg]	125
Maximale Zuladung [kg]	205

In der Tabelle 3-2 sind die Technischen Daten des Versuchsfahrzeugs aufgeführt. Dabei wird der original Motor dem modifizierten Motor gegenübergestellt.

Tabelle 3-2: Technische Daten des Versuchsmotors

Motor	Original	Modifiziert
Motortyp	Flüssigkeitsgekühlter 4-Taktmotor mit obenliegender Nockenwelle	
Hubraum [cm³]	149,8	
Zylinderanordnung	nach vorne geneigter Einzelzylinder	
Bohrung [mm] x Hub [mm]	57,0 x 58,7	
Verdichtungsverhältnis	10,4:1	
Startsystem	Elektrostarter	
Kraftstoff		
Kraftstoff	Bleifreies Superbenzin	
Kraftstoffpumpe	elektrisch	
Hersteller	5B2/Bitron	
Ausgangsdruck	2,5 bar	
Schmierung		
Schmiersystem	Nassumpfschmierung	
Gesamte Ölmenge	1,15 l	
Ölfilter	Papier	
Ölpumpe	Zahnrad	
Drosselklappengehäuse und Motorsteuergerät		
Hersteller	Yamaha	Synerject
Typ	5D700	M3A
Einspritzventil		
Modell	1100-87H10	Prototyp
Hersteller	AISAN	Continental
Lochanzahl	6	2
Lambdasonde		
	-	NTK
Modell	-	ZSHG-004-BA
Zündsystem		
Zündkerzenhersteller/Modell	NGK/CR8E	
Zündsystem	TCI	
Zündverstellertyp	Last/Drehzahl	

Kühlsystem	
Fassungsvermögen des Kühlers	1 l
Thermostat	5YP/NIPPON Thermostat
Ventil-Öffnungstemperatur [°C]	80,5-83,5
Wasserpumpe	Einzelansaug-Kreiselpumpe
Übersetzungsverhältnis	0,5
Ventile	
Einlass [mm]	19,4-19
Auslass [mm]	16,9-17,1
Kolben	
Kolbendurchmesser [mm]	56,965-56,990
Kolben-Laufspiel [mm]	0,020-0,045
Desaxierung [mm]	0,25
Kupplung	
Kupplung	nasse Mehrscheiben-Kupplung
Ausrückmethode	Druckstange, Schaltwalzendruck

Die Unterschiede im Getriebe werden in Tabelle 3-3 verglichen.

Tabelle 3-3: Gegenüberstellung der Getriebeabstufungen

Getriebe		
Übersetzungsart	5-Ganggetriebe	6-Ganggetriebe
Primärübersetzungssystem	Schräg Zahnrad	
Primärübersetzung	73/24 (3,042)	
Getriebeabstufung		
Erster Gang	34/12 (2,833)	
Zweiter Gang	30/16 (1,875)	
Dritter Gang	30/21 (1,429)	30/22 (1,364)
Vierter Gang	24/21 (1,143)	
Fünfter Gang	22/23 (0,957)	
Sechster Gang	21/25 (0,840)	

3.1.4 Anpassungen am Versuchsträger

Am Versuchsträger sind Prototypenkomponenten für das Einspritzsystem der Firma *Synerject* zum Einsatz gekommen. Für diese Bauteile mussten Bereiche am Versuchsmotor und im Versuchsfahrzeug angepasst werden. Die Anpassungen reichen von einer abgewandelten Zahnscheibe für die Drehzahlbestimmung und Kurbelwinkelmessung, über einen veränderten Einlasskanaladapter für den Injektor bis hin zu einem neuen Kabelbaum zur Stromversorgung und Signalübertragung.

Für den Auspuff ist ein Schnellwechselsystem konstruiert worden, um so ein schnelles Wechseln der Katalysatoren zu ermöglichen.

Drosselklappenmodul

Das am Versuchsfahrzeug verwendete Motorsteuergerät *M3A* der Firma *Synerject* vereint die Motorsteuerung mit dem Drosselklappengehäuse, siehe Abbildung 3-3.



Abbildung 3-3: Drosselklappenmodul M3A mit Leerlaufregler

[9]

In dem Gehäuse sind ein Drosselklappenpositionssensor, ein Temperatursensor und ein Saugrohrdrucksensor integriert. Für die Leerlaufregelung ist ein Luftbeipassventil (air bypass valve) vorgesehen, welches sich ebenfalls in der Gehäuseeinheit befindet.

Durch dieses kompakte Design werden die erforderlichen externen Sensoren auf ein Minimum reduziert. Als externe Sensoren sind eine unbeheizte Lambdasonde, ein Motordrehzahlsensor und ein Motortemperatursensor vorgesehen, die bei Bedarf an das Drosselklappenmodul angeschlossen werden können. Der Motordrehzahlsensor gibt dabei auch Auskunft über den Kurbelwellenwinkel.

Für die Bestimmung der vom Motor angesaugten Luftmasse wird kein Luftmassenmesser verwendet. Die Luftmasse wird anhand der Daten der oben genannten Sensoren und der im Motorsteuergerät hinterlegten Kennfelder berechnet. Die Bestimmung dieser Kennfelder (Luftpfadkalibrierung) ist somit sehr wichtig und wird in Kapitel 3.5.1 beschrieben.

Zur Leerlaufregelung durch das oben erwähnte Luftbypassventil kann eine bestimmte Luftmenge durch eine Bypassbohrung dem Motor zugeführt werden. Das Ventil, welches sich in der Bypassbohrung befindet, kann nicht kontinuierlich verstellt werden. Es vollzieht durch Ansteuerung des Motorgerätes schnelle Öffnungs- und Schließbewegungen. Anhand der Frequenz und der Öffnungsdauer wird die geförderte Luftmenge geregelt. Des Weiteren kann auch der Regelbereich in Abhängigkeit vom Kurbelwinkel eingestellt werden. Das heißt, es kann während eines ganzen Verbrennungszyklus oder auch nur während der Ansaugphase Luft durch die Bypassbohrung gefördert werden.

Das Motorsteuergerät ist vom Hersteller mit einer Grundbedatung der Kennfelder ausgeliefert worden. Das bedeutet es befinden sich in den Kennfeldern Daten eines Serienmotors mit annähernd gleichem Hubraum (120 cm³). Eine Aufgabe während dieser Diplomarbeit war es, diese Kennfelder an den Versuchsträger anzupassen.

Einlassadapter mit Injektoraufnahme

Der verwendete Prototypeninjektor besitzt auf Grund der Einbaubedingungen im Entwicklungsmotor zwei Bohrungen, durch die der Kraftstoff austreten kann. Diese

Bohrungen sind in einem Winkel von 30° geneigt, siehe Abbildung 3-4, um den Kraftstoff in Richtung der Einlassventile zu spritzen.

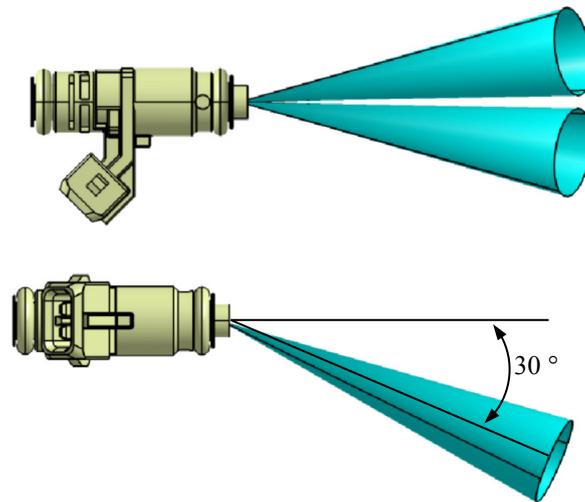


Abbildung 3-4: 3-D Modell des Injektors mit Sprühkegel

Damit auch im Versuchsfahrzeug gewährleistet ist, dass der Kraftstoff in Richtung der Einlassventile gespritzt wird, ist ein angepasster Einlassadapter (Abbildung 3-5) konstruiert worden. Der Injektor wird vom Einlassadapter aufgenommen und mit einer Injektorkappe befestigt.

Der Einlassadapter stellt auch die Verbindung zum Drosselklappenmodul und in weiterer Folge zum Ansaugeräuschkämpfer her. Daher sind bei der Konstruktion die engen Einbaubedingungen im Fahrzeug, verursacht durch den schmalen Rahmen, zu beachten gewesen.

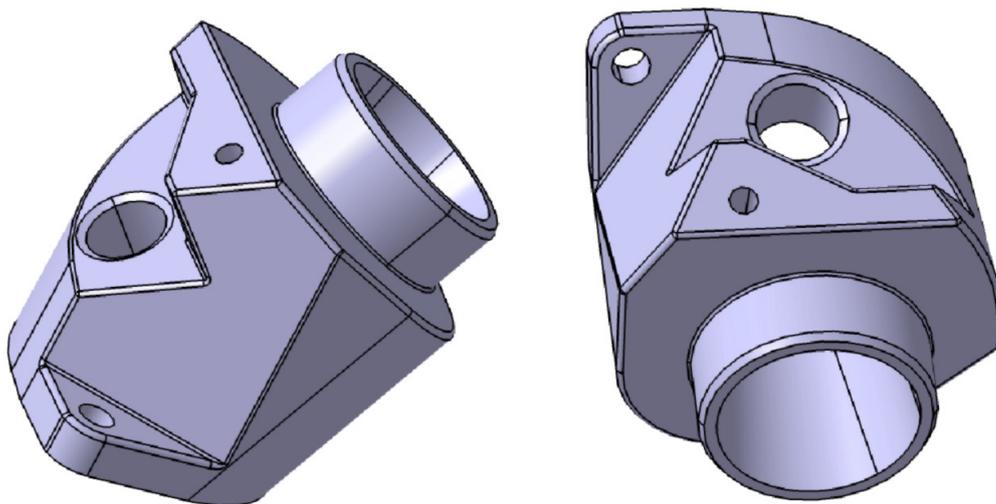


Abbildung 3-5: Einlassadapter mit Injektoraufnahme

Für die Aufnahme des Injektors sind die Montageempfehlungen des Herstellers berücksichtigt worden, siehe dazu Abbildung 6-1 in Kapitel 6.1.

Ansauggeräuschkämpfer

Durch eine CFD-Simulation ist das ideale Volumen des Ansauggeräuschkämpfers mit 4,5 Litern bestimmt worden.

Am Motorprüfstand ist eine quaderförmige Box (15 x 15 x 20 cm) aus Aluminium zum Einsatz gekommen.

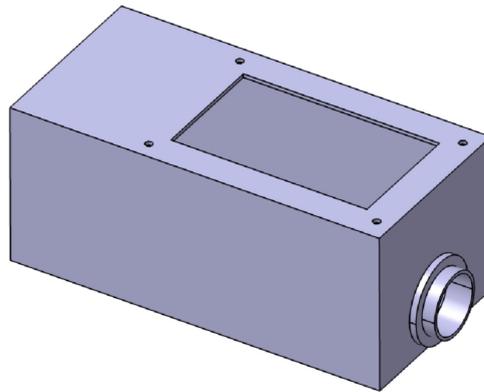


Abbildung 3-6: Ansauggeräuschkämpfer für das Fahrzeug

Um im Versuchsfahrzeug die gleichen Bedingungen wie am Motorprüfstand zu erhalten, ist für das Fahrzeug ein Ansauggeräuschkämpfer mit dem gleichen Volumen konstruiert worden. Dieser ist an die engen Platzbedingungen im Fahrzeug angepasst worden (Abbildung 3-6).

Beide Ansauggeräuschkämpfer nutzen den Serien-Luftfilter und Luftfilteraufsatz des bestehenden Fahrzeuges.

Triggerring

Zur Drehzahl- und Kurbelwinkelmessung benötigt das Motorsteuergerät *M3A* einen Triggerring mit 24-1 Zähnen, siehe Abbildung 3-7. Dieser Ring ist eigens angefertigt worden.

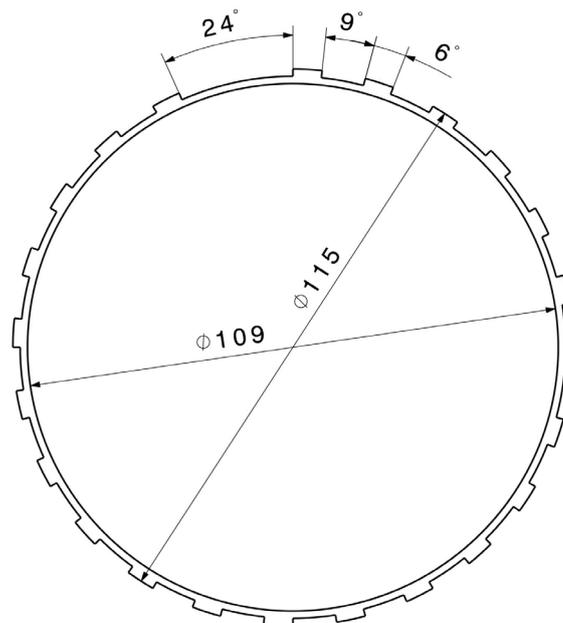


Abbildung 3-7: Triggerring für das Motorsteuergerät M3A

[10]

Zur Montage des Triggerrings sind die vorhandenen Triggermarkierungen auf der bestehenden Schwungscheibe abgedreht worden. Im Anschluss ist der neue Triggerring mit der Schwungscheibe verpresst worden. Dabei ist der Zahnkranz so ausgerichtet worden, dass beim oberen Zündtotpunkt der neunte Zahn unter dem Induktivgeber liegt, siehe Abbildung 3-8.

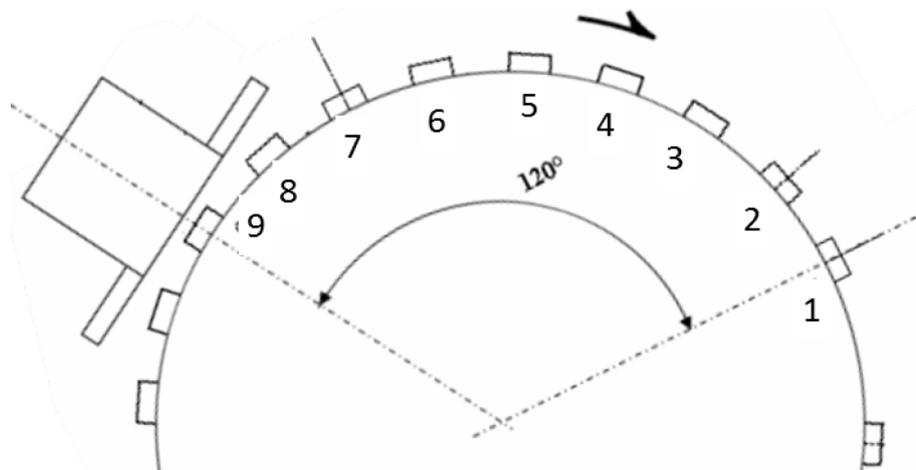


Abbildung 3-8: Positionierung der Triggerscheibe und Induktivgeber

[10]

Der Halt des Triggerrings auf der Schwungscheibe wird durch eine Übermaßpassung gewährleistet.

Kabelbaum

Für die Verbindung des Steuergerätes mit dem Bordnetz ist der vorhandene Kabelbaum des Fahrzeuges modifiziert worden. Dadurch ist die Ansteuerung des Starters und der Ladeelektronik vereinfacht worden, da diese nun nicht mehr separat berücksichtigt werden müssen.

Weiters ist die Verbindung zu den externen Sensoren (Lambda-Sonde, Induktionsgeber, Motortemperatur) und zu den Aktuatoren (Einspritzung, Zündung, Kraftstoffpumpe) hergestellt worden.

Die Verbindung des Motorsteuergerätes mit dem Kabelbaum, ist nach dem Schaltplan in Abbildung 3-9 erfolgt.

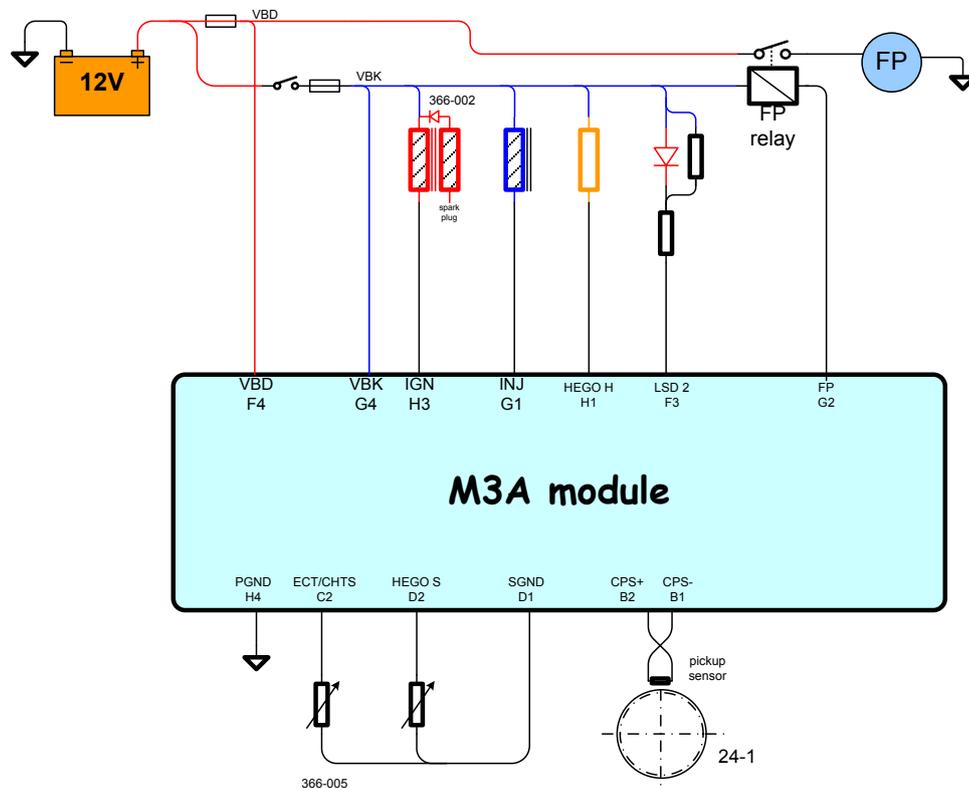


Abbildung 3-9: Stromversorgung und Komponentenverbindung des M3A Steuergerätes [10]

Die in Abbildung 3-9 enthaltenen Abkürzungen werden im Folgenden beschrieben. VBD ist eine so genannte Dauerplus-Verbindung zur Batterie und VBK das geschaltete Plus. Die Zündung wird mit IGN (ignition), die Einspritzung mit INJ (injection) und die Kraftstoffpumpe mit FP (fuel pump) abgekürzt. Die Masseleitung für die Spannungsversorgung wird als PGND (power ground), die für die Signalübertragung mit SGND (signal ground) abgekürzt. Der induktive Drehzahlabnehmer (pickup sensor) wird mit den Leitungen CPS+ und CPS- (crankshaft position sensor) verbunden. Die Verbindung zur Lambda-Sonde wird mit HEGO (heat exhaust gas oxygen) abgekürzt. ECT/CHTS steht für den Wassertemperaturfühler (engine temperatur sensor)

Abgassystem

Bei der Konstruktion des Abgassystems ist auf Modularität und ein schnelles Austauschen der Komponenten geachtet worden. Grund dafür war, dass mehrere Katalysatoren vermessen werden sollten und auch für die Applikationsarbeiten ein unbeschichteter Metallträger verwendet werden sollte.

In Abbildung 3-10 ist das Katalysatorwechselsystem im Auspuff verbaut abgebildet.

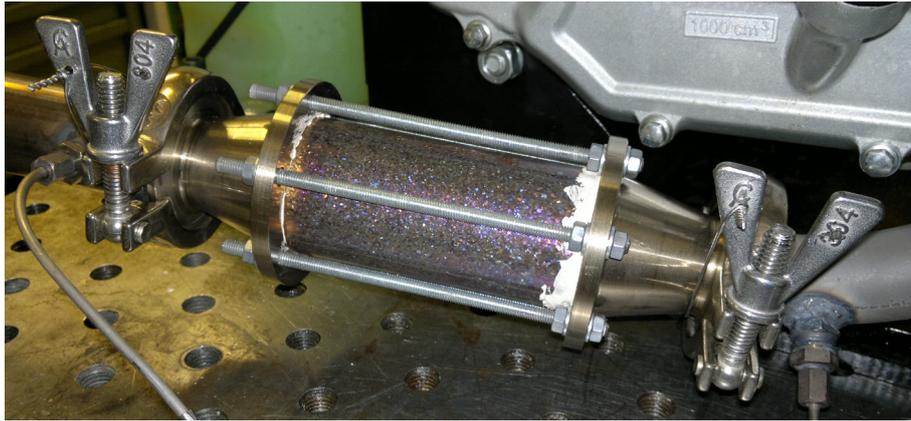


Abbildung 3-10: Katalysatorwechselsystem mit *TriClamp*-Flanschsystem im Auspuff verbaut

Das Wechselsystem besteht aus zwei Konussen (Abbildung 3-11), die eine Aufnahme für den Katalysator besitzen. Der Katalysator wird zwischen den Konussen positioniert und mithilfe von sechs Gewindestangen, die am Umfang verteilt sind, verspannt. Zur Abdichtung ist eine Auspuffmontagepaste verwendet worden. Dieses Wechselsystem kann mithilfe von so genannten *TriClamps* auf das Auspuffrohr geklemmt werden.

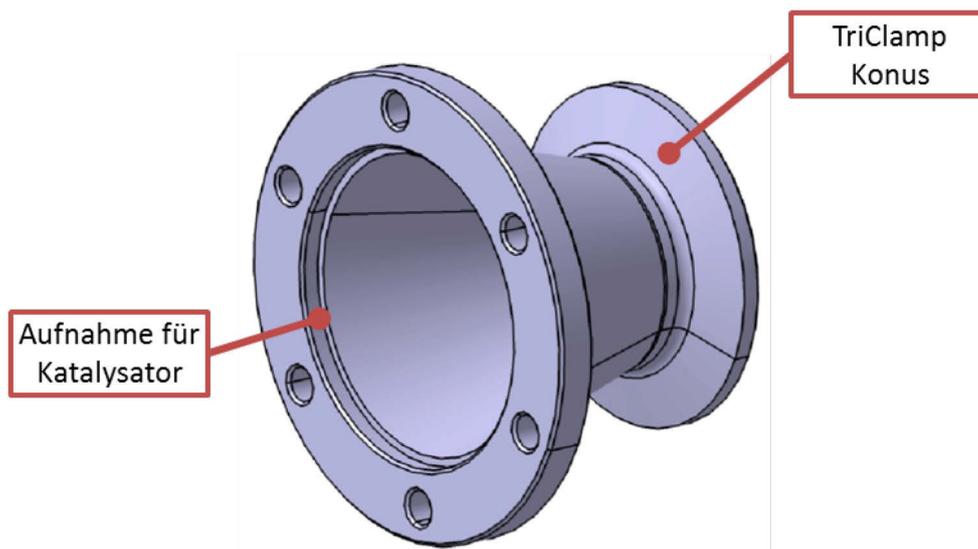
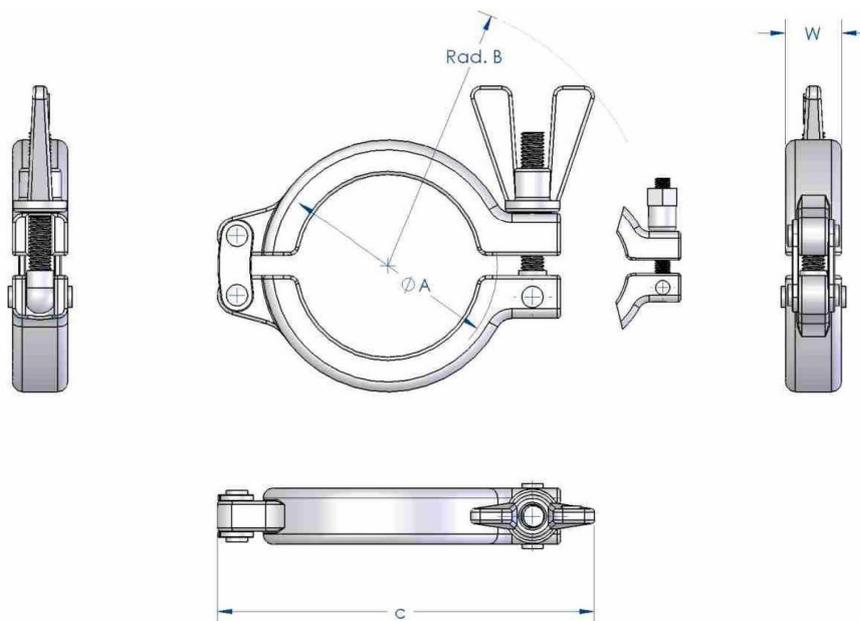


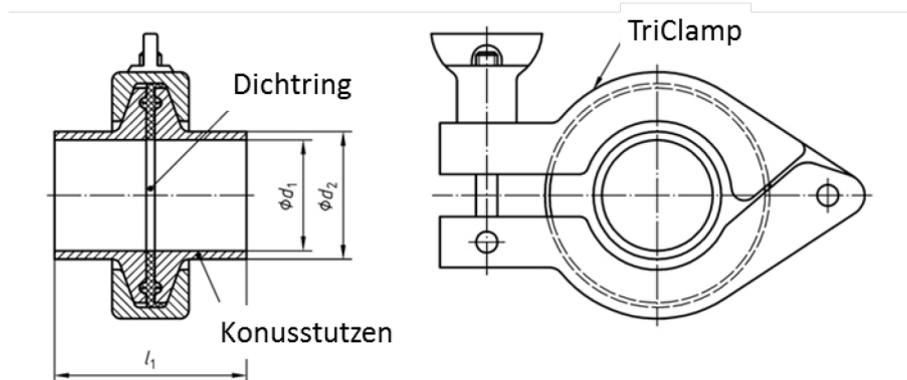
Abbildung 3-11: Katalysatoradapter mit *TriClamp*-Konus

TriClamps sind genormte Schnellspannsysteme (ISO 2852, DIN 32676), die vor allem in der Pharmaindustrie benutzt werden (Abbildung 3-12).

Abbildung 3-12: *TriClamp*

[11]

Mithilfe von *TriClamps* werden genormte Konusse (ISO 2852) miteinander verbunden. Durch eine Dichtung zwischen den beiden Konussen bleibt diese Verbindung auch bei hohen Drücken dicht, siehe Abbildung 3-13.

Abbildung 3-13: *TriClamp* Klemmverbindung

[12]

Weil diese Systeme in der Pharmaindustrie eingesetzt werden und dort keine hohen Temperaturen ($> 300\text{ °C}$) vorkommen sind die Dichtungen nicht auf den Einsatz im Abgassystem ausgelegt. Aus diesem Grund sind die *TriClamp*-Konusse an eine Aluminium-Flachdichtung angepasst worden, siehe Abbildung 3-14.

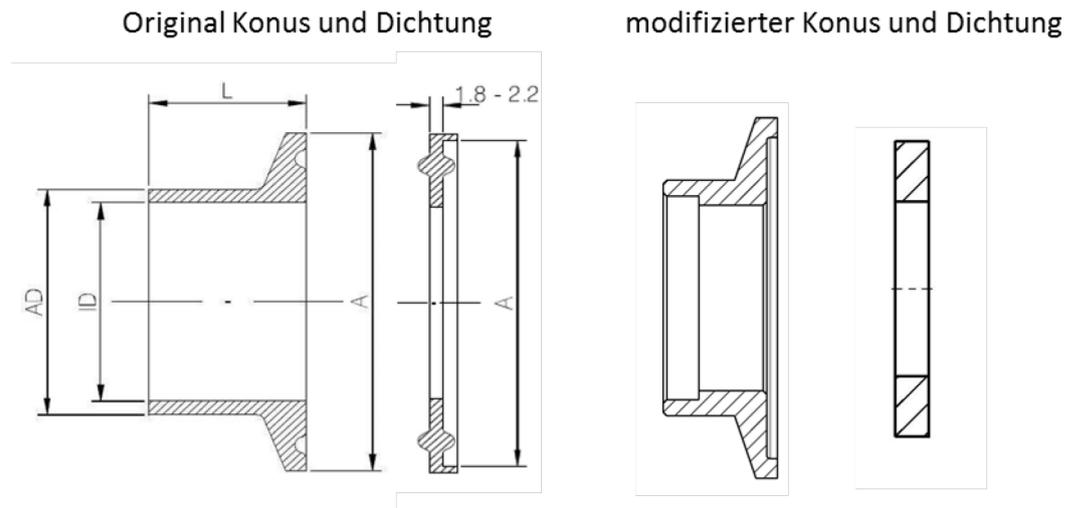


Abbildung 3-14: *TriClamp*-Konus mit Dichtung, original und modifiziert

[11]

Des Weiteren ist ein Endschalldämpfer mit Befestigungsvorrichtung für das Fahrzeug angefertigt worden (Abbildung 3-15) zu sehen. Er wird mittels *TriClamp* und Rohrschelle befestigt.

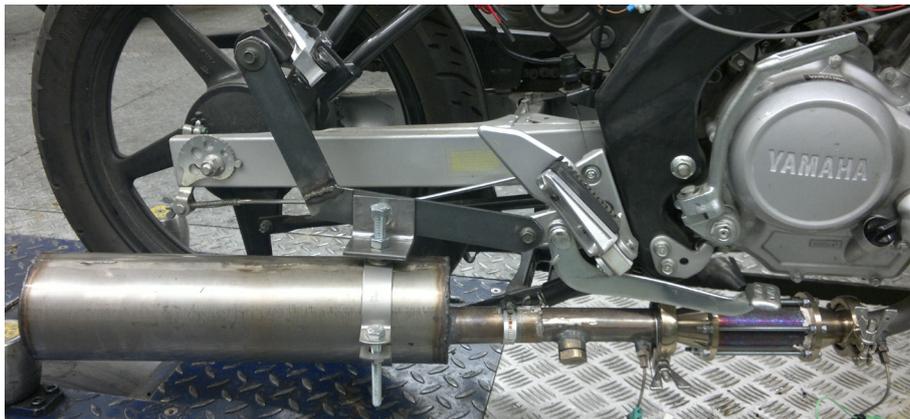


Abbildung 3-15: Auspuffenschalldämpfer mit Rahmenbefestigung

3.2 Aufbau Motorenprüfstand

Im folgenden soll der Motorprüfstand beschrieben werden. Dabei wird auf den Aufbau und die verwendete Messtechnik eingegangen.

In Abbildung 3-16 ist eine Prinzipskizze zu sehen, die den Aufbau wiedergibt.

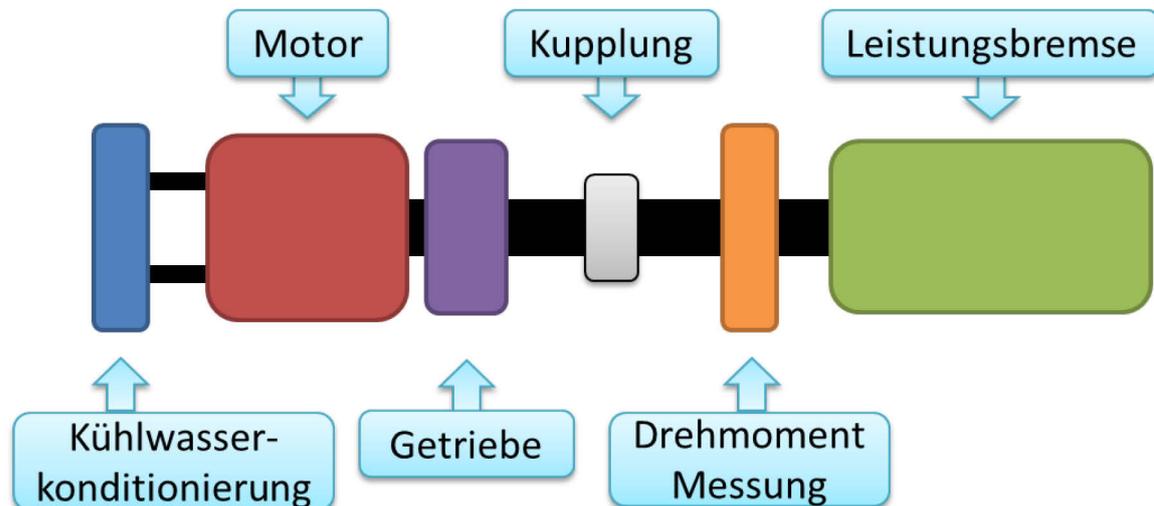


Abbildung 3-16: Prüfstands Aufbau (Prinzip)

3.2.1 Leistungsbremse

Als Leistungsbremse kommt die wassergekühlte Wirbelstrombremse *FA20* der Firma *Borghini & Saveri* zum Einsatz. Das maximale Drehmoment dieser Bremse liegt bei 36 Nm und die maximale Drehzahl bei 15000 U/min. Ab 4000 U/min bietet die Bremse eine konstante Leistung von 14,72 kW. Ein konstantes Drehmoment wird nur in einem engen Drehzahlband von circa 3200 U/min bis 4000 U/min geboten (Abbildung 3-17).

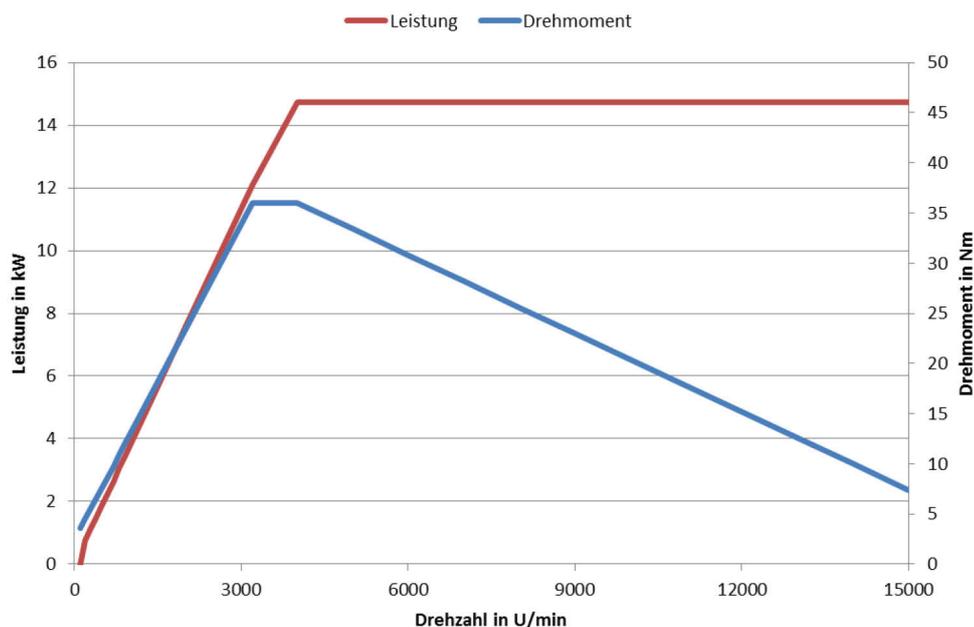


Abbildung 3-17: Leistungscharakteristik der Leistungsbremse

3.2.2 Kühlwasserkonditionierung

Die Kühlwasserkonditionierung zur Motorkühlung am Prüfstand ist durch einen Wasser-Wasser-Plattenwärmetauscher der Firma Alfa Laval erfolgt. In Tabelle 3-4 sind die technische Daten des Wärmetauschers aufgeführt.

Tabelle 3-4: Technische Daten des Wasser-Wasser-Plattenwärmetauschers

Hersteller:	Alfa Laval
Type:	CB14-14(A21,A21)
Auslegungstemperatur:	175 °C
Wärmeleistung	20 kW
Auslegungsdruck:	32 bar
Volumen pro Kanal:	0,02 l
maximale Partikelgröße:	1,2 mm
maximaler Durchfluss:	4,6 m ³ /h (Wasser bei 5 m/s)
Druckverlust	144 mbar
Plattenanzahl:	14

Mithilfe eines PI-Reglers zur Steuerung eines Stellmotors ist die Motortemperatur geregelt worden. Die technischen Daten des Stellmotors können der Tabelle 3-5 entnommen werden.

Tabelle 3-5: Technische Daten des Honeywell Stellmotors

Hersteller:	Honeywell
Typ:	ML7420A 3006 (B1N)
Versorgungsspannung:	24 V 50/60 Hz
Leistungsaufnahme:	5VA
Stellweg:	20mm
Stellzeit bei 50 Hz:	1 min
Stellkraft:	≥ 600N

3.2.3 Messtechnik

Als Prüfstandssoftware wurde das Programm *Tornado* der Firma *Kristl, Seibt & Co* verwendet. Des Weiteren wurde die Software *INCA* der Firma *ETAS* für die Applizierungsaufgaben am Motor verwendet.

Drehmomentmessung

Zur Drehmomentmessung wird ein Drehmomentmessflansch des Typs *4504A1* (Abbildung 3-18) der Firma *Kistler* eingesetzt. Das maximale Drehmoment ist 100 Nm und die maximale Drehzahl beträgt 15000 U/min.

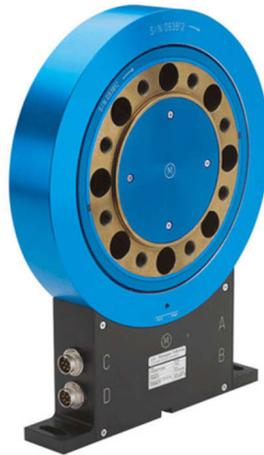


Abbildung 3-18: Drehmomentmessflansch Kistler 4504A

[13]

Der Drehmomentmessflansch besteht aus einem Rotor und einem Stator. Im Rotor befindet sich eine Torsionswelle, die mit Dehnmessstreifen bestückt ist. Die Signale der Dehnmessstreifen in Brückenschaltung werden berührungslos durch Induktion zum Stator weitergegeben.

Drehzahlmessung

Die Drehzahlmessung erfolgt durch einen induktiven Drehzahlgeber (CPS, crankshaft position sensor), der auch im Serienfahrzeug verwendet wird. Die Zahnscheibe mit 24-1 Zähnen ist dabei direkt am Schwungrad angebracht.

Der Sensor besteht aus einem Dauermagneten, der hinter einem Eisenkern mit Spule angebracht ist. Durch die Bewegung des Schwungrades mit der angebrachten Zahnscheibe wird der magnetische Fluss verändert. Diese Flussänderung induziert nun eine Spannung in der Spule. Anhand des Spannungssignals kann die Drehzahl und der Kurbelwellenwinkel bestimmt werden. In Abbildung 3-19 ist ein solcher Spannungsverlauf skizziert.

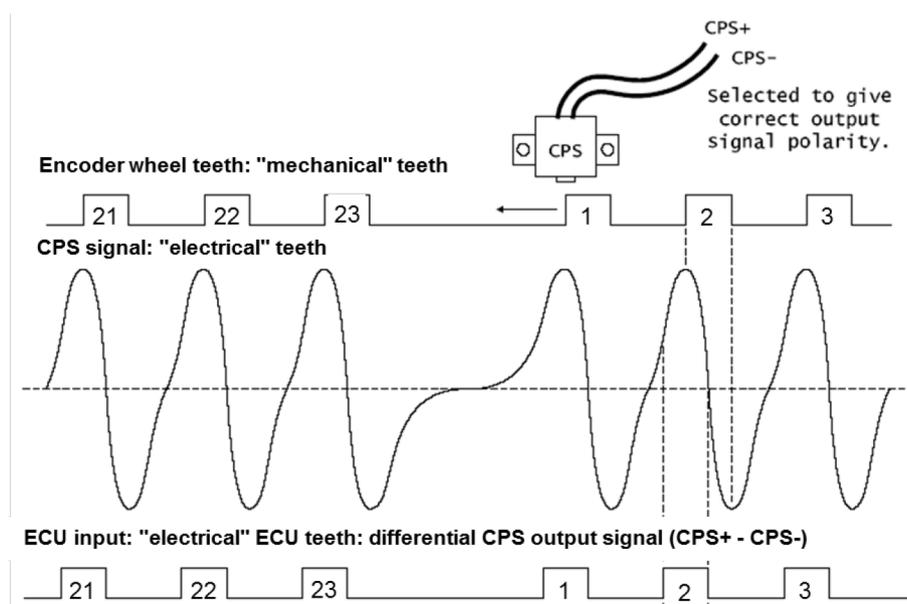


Abbildung 3-19: Signalverlauf des Drehzahlgebers

[10]

Eine große Zahnücke an der Zahnscheibe gibt das Signal für eine volle Umdrehung an.

Kraftstoffverbrauchsmessung

Der Kraftstoffverbrauch wird mit dem Coriolis-Massendurchflussmessgerätes *M14 mini CORI-FLOW™* (Abbildung 3-20) der Firma *Bronkhorst Cori Tech* bestimmt. Dieses Messgerät nutzt den Corioliseffekt um die Kraftstoffmasse zu ermitteln: Dabei fließt der Kraftstoff durch ein geformtes Sensorrohr, das Teil eines Schwingsystems ist. Corioliskräfte, die durch die Masse des Kraftstoffes und der Schwingung im Sensorrohr auftreten, verursachen nun eine Phasenverschiebung in diesem Schwingsystem. Diese Verschiebung wird mittels Sensoren registriert und ist direkt proportional zum Massendurchfluss.



Abbildung 3-20: Kraftstoffverbrauchsmessung *CORI-FLOW M14*

[14]

Temperaturmessung

Zur Temperaturmessung am Motor werden *PT100* Widerstands-Temperaturfühler und *Typ-K* Thermoelemente verwendet.

Dabei wird der *PT100* Temperaturfühler für die Kühlwassertemperatur des Motors und für die Raumluft des Prüfstandes benutzt. Als Messeffekt wird die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes von Platin genutzt.

Zur Messung der Abgastemperatur werden Thermoelemente des Typs *K* verwendet. Hier verwendet man die Thermospannung als Messgröße. Diese entsteht, wenn die Verbindungsstelle von zwei leitenden Materialien erwärmt wird. Mit dieser Thermospannung kann somit auf die Temperatur geschlossen werden.

Thermoelemente des Typs *K* bestehen aus NiCr und Ni und haben einen Temperatureinsatzbereich von 0 bis 1100 °C. Die am Prüfstand verwendeten Thermoelemente stammen aus der Toleranzklasse 1 und haben eine Empfindlichkeit von $\pm 60 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ und einen Messfehler von $\pm 1,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Indiziertechnik

Unter Indizieren versteht man das kurbelwinkelaufgelöste Messen verschiedener Größen.

Der Kurbelwinkel wird mittels eines Inkrementwinkelgebers gemessen. Dabei beträgt die Auflösung 360 Impulse pro Umdrehung.

Für die Zylinderdruckindizierung kommt ein ungekühlter, piezoelektrischer Hochtemperatur-Drucksensor der Firma *Kistler* zum Einsatz. Der Typ *6052B1* besitzt einen Druckbereich von 0 bis 250 bar.

Im Ansaugtrakt ist ein piezoresistiver Miniatur-Niederdrucksensor Typ *4005A* von *Kistler* angebracht, der den Absolutdruck misst. Dieser befindet sich zwischen der Drosselklappe und dem Motor. Es wird das so genannte *Direct Chip Exposure* Messprinzip verwendet. Dabei ist das Messelement dem Messmedium direkt ausgesetzt.

Die Abgasdruckmessung erfolgt über einen piezoresistiven Absolutdrucksensor des Typs *4075B* in Kombination mit dem Kühlwasser-Adapter *753*. Beide Komponenten stammen von der Firma *Kistler*.

Die Messdatenerfassung der schnellen Messdaten ist mithilfe des Gerätes *DEWE 2010* der Firma *Dewetron* erfolgt.

Mithilfe von Stromzangen am Zündkabel und der Injektorleitung sind auch der Zündungswinkel und der Beginn der Einspritzung erfasst und aufgezeichnet worden.

Messung des Verbrennungsluftverhältnisses

Zur Messung des Verbrennungsluftverhältnisses sind am Versuchsträger zwei verschiedene Sensoren zum Einsatz gekommen. Für die Regelung des stöchiometrischen Betriebspunktes durch das Motorsteuergerät ist eine Zweipunkt-Lambda-Sonde (Sprungsonde) zum Einsatz gekommen. Für genauere Information über die Gemischzusammensetzung während der Versuche am Prüfstand ist eine Breitband-Lambda-Sonde benutzt worden.

Zweipunkt-Lambda-Sonde (Sprungsonde)

Die am Motorsteuergerät angeschlossene Lambda-Sonde ist eine Zweipunkt-Sonde. Sie arbeitet nach dem Nernst-Prinzip. Dieses basiert auf einer galvanischen Sauerstoff-Konzentrationszelle mit einem Festkörperelektrolyt. Durch die sprunghafte Änderung des Sauerstoffgehalts im Abgas bei Lambda $\lambda = 1$, tritt an den Grenzflächen der Keramik wegen des unterschiedlichen Sauerstoffgehalts eine Spannung U_S auf. In Abbildung 3-21 ist dieser Spannungsverlauf in Abhängigkeit vom Verbrennungsluftverhältnis λ dargestellt.

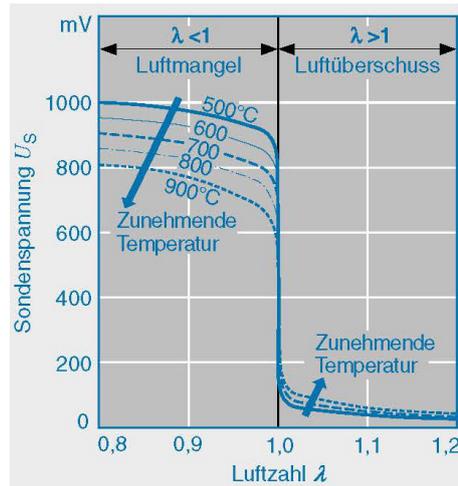


Abbildung 3-21: Spannungskennlinie der Zweipunkt-Lambda-Sonde für verschiedene Arbeitstemperaturen [15]

Anhand der Sonden-Spannung U_s kann das Motorsteuergerät die Einspritzmenge regeln, sodass der Motor sehr genau bei $\lambda = 1$ betrieben wird.

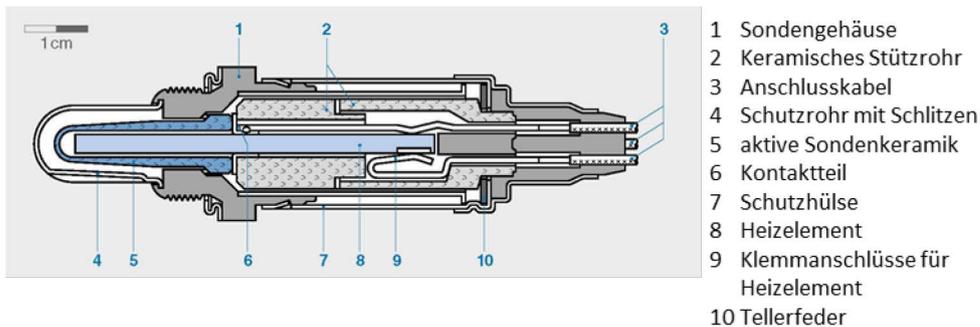


Abbildung 3-22: Aufbau einer Zweipunkt-Lambda-Sonde [15]

Der Aufbau der Zweipunkt-Lambda-Sonde ist in Abbildung 3-22 beschrieben.

Breitband-Lambda-Sonde

Zur Bestimmung des Verbrennungsluftverhältnisses λ (Lambda) am Motorprüfstand wird eine Breitband-Lambda-Sonde eingesetzt. Diese besitzt, im Gegensatz zur Sprung-Sonde, die Fähigkeit in einem weiten Lambda-Bereich zu messen und nicht nur im stöchiometrischen Punkt bei $\lambda = 1$.

Bei der Breitband-Lambda-Sonde kann im Bereich von $\lambda = 0,7$ bis $\lambda = \infty$, mit einer entsprechenden Regelektronik ein stetiges elektronisches Signal, siehe Abbildung 3-23, gemessen werden.

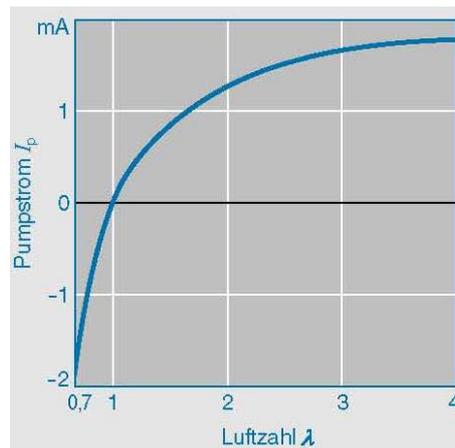


Abbildung 3-23: Pumpstrom I_p einer Breitband-Lambda-Sonde in Abhängigkeit der Luftzahl λ [15]

In Abbildung 3-24 wird der prinzipielle Aufbau einer Breitband-Lambda-Sonde dargestellt.

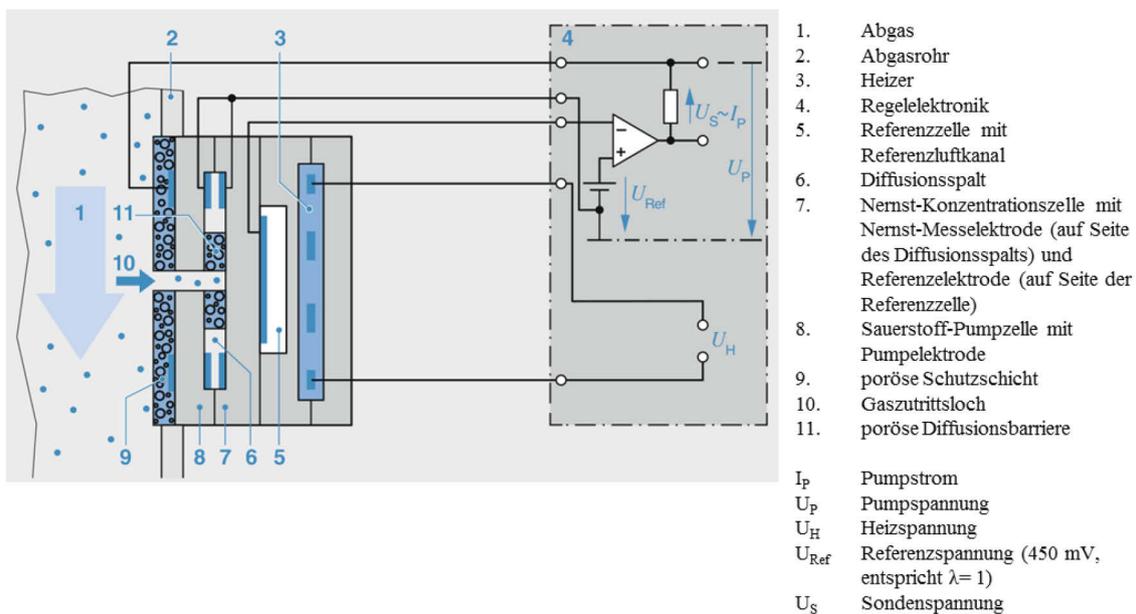


Abbildung 3-24: Planare Breitband-Lambda-Sonde (schematischer Aufbau der Messzelle und Anordnung im Abgasrohr) [15]

Das Steuergerät der Sonde regelt die Spannung U_p mithilfe der Nernst-Konzentrationszelle, sodass im Diffusionsspalt $\lambda = 1$ herrscht. Somit muss bei magerem Abgas die Pumpelektrode Sauerstoff nach außen transportieren. Dies resultiert in einem positiven Pumpstrom. Liegt $\lambda < 1$ vor, ist der Pumpstrom negativ und die Pumpelektrode fördert Sauerstoff in den Diffusionsspalt. Bei $\lambda = 1$ wird kein Sauerstoff transportiert und es fließt kein Pumpstrom. Durch dieses Verhalten ist der Pumpstrom ein Maß für die Luftzahl λ .

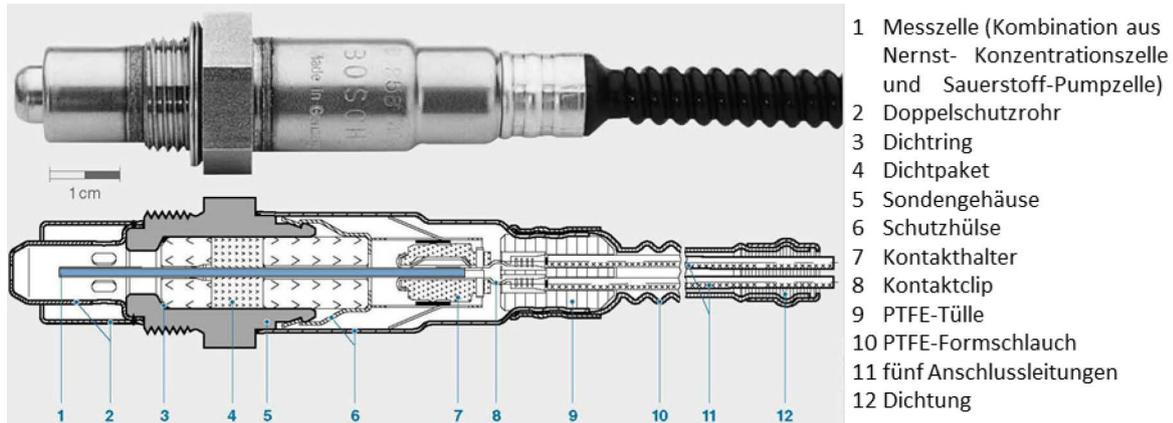


Abbildung 3-25: Planare Breitband-Lambda-Sonde LSU4

[15]

In der Abbildung 3-25 ist die verwendete Breitband-Lambda-Sonde mit Schnittbild abgebildet. Die technischen Daten können aus Tabelle 3-6 entnommen werden.

Tabelle 3-6: Technische Daten der Breitband-Lambda-Sonde

Typ	Bosch LSU 4.9
Gewinde	M18 x 1,5
Anzugsdrehmoment	60 Nm
Temperaturbereich	
Abgastemperatur am Sensorelement	930 °C
Sechskant am Gehäuse	< 570 °C
Kabeldurchführung (Kabelseite)	< 250 °C
Kabel und Schutzhülle	< 250 °C
Stecker	< 150 °C
Elektronische Daten	
Heizer Versorgungsspannung	7,5 V
Heizleistung	7,5 W
Sensorelement	ZrO ₂
Lambda Messbereich	0,65 ... ∞

3.3 Aufbau Zweirad Rollenprüfstand

Der Zweirad-Rollenprüfstand am Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik dient zur Vermessung und Abstimmung von Krafträdern. Es können damit gesetzeskonforme Emissionsmessungen und Untersuchungen zum dynamischen Fahrverhalten durchgeführt werden.

Das Fahrzeug wird für die Messung mit dem Vorderrad fest eingespannt. Das Hinterrad steht auf der Rolle und treibt es an. Die Rolle kann verschiedene Brems- und Antriebsmomente für das Fahrzeug vorgeben. Die technische Daten des Rollenprüfstandes sind in Tabelle 3-7 aufgeführt.

Tabelle 3-7: Technische Daten des Rollenprüfstandes

Rollenprüfstand	AVL Zöllner TS PR 0274
Typ	elektromechanisch
Leistung	42 kW bei 90 km/h
maximale Geschwindigkeit	160 km/h
Rollendurchmesser	20 Zoll
maximale Tragkraft	350 kg

Der Fahrtwind zur Kühlung wird von einem Ventilator vor dem Fahrzeug erzeugt. Dieser Ventilator wird in Abhängigkeit zur Fahrgeschwindigkeit geregelt. In Tabelle 3-8 sind die Daten des Ventilators gelistet.

Tabelle 3-8: Technische Daten des Fahrtwindventilators

Kühlventilator	Witt & Son
maximaler Luftdurchsatz	48000 m ³ /h
Windgeschwindigkeit	± 10 % der Rollengeschwindigkeit
Leistung	18,75 kW

Eine offene CVS-Anlage (Constant Volume Sampling) saugt die vom Motorrad emittierten Abgase ab. Diese werden in der Abgasanalyse des Typs *AMA i60* der Firma *AVL* gemessen.

3.3.1 CVS-Anlage

Die Abgasmessung am Rollenprüfstand wird mithilfe einer CVS-Anlage (Constant Volume Sampling) und eines Abgasanalysators durchgeführt. In Abbildung 3-26 ist ein schematischer Aufbau einer CVS-Anlage abgebildet.

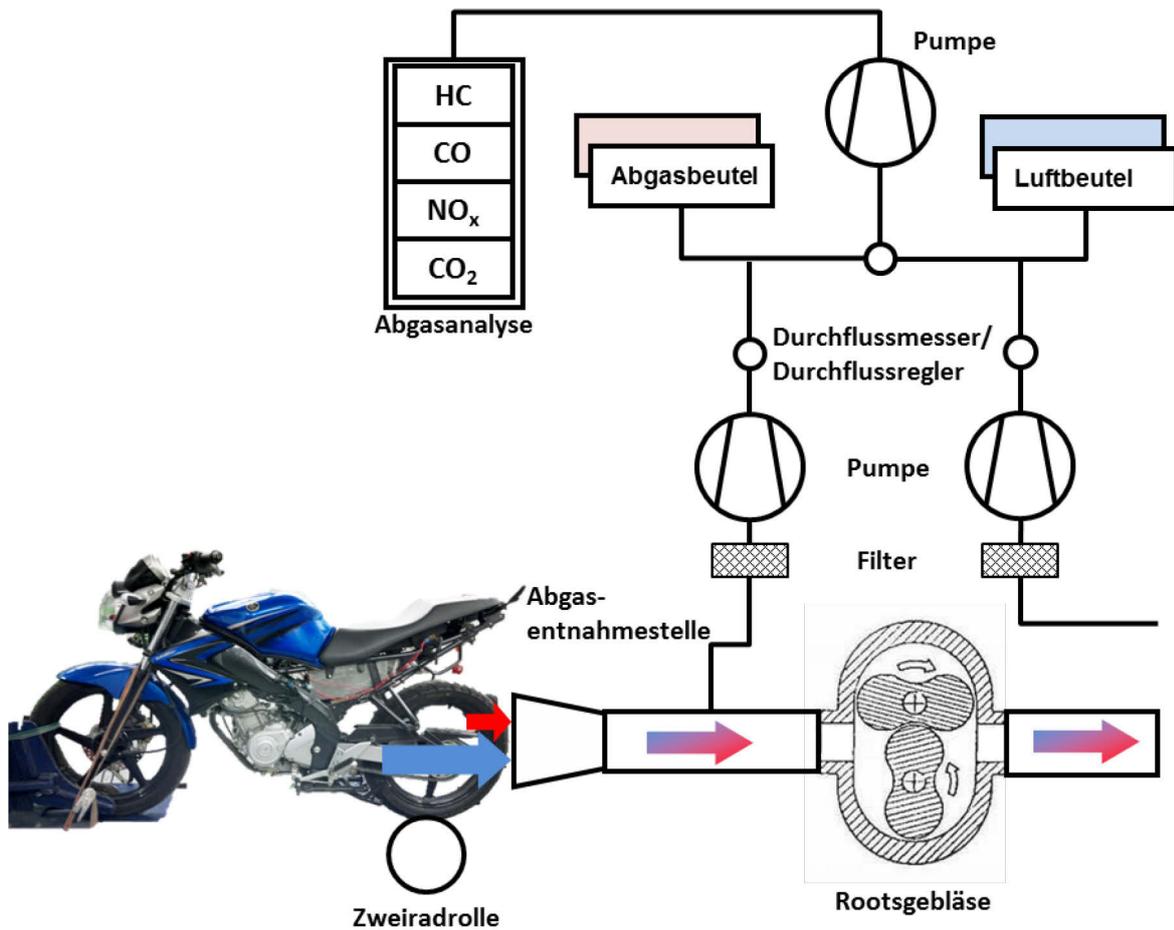


Abbildung 3-26: Schematischer Aufbau einer offenen CVS-Anlage

Das gesamte, vom Fahrzeug ausgestoßene Abgas wird mit einem konstanten Volumenstrom von 4000 l/min abgesaugt. Da es eine offene CVS-Anlage ist, wird auch die Umgebungsluft mitangesaugt und das abgesaugte Abgas verdünnt. Ein Teilstrom dieses verdünnten Abgases geht direkt zum Abgasanalysator, der somit die Entstehung der Abgase während des Zyklus bestimmen kann. Ein weiterer Teilstrom (8 l/min) wird in einem Beutel (Abgasbeutel) gespeichert. In einem weiteren Beutel (Luftbeutel) wird zur gleichen Zeit Umgebungsluft gesammelt. Der Luftbeutel wird zur Bestimmung der Hintergrundkonzentration der Gase benutzt. Für jeden Zyklusteil des World Harmonized Motorcycle Test Cycle (WMTC) wird ein Beutelpaar, bestehend aus einem Abgasbeutel und einem Luftbeutel, verwendet. Durch diese Beutelpaare kann zwischen der Kaltstartphase und der Warmphase unterschieden werden.

Die Beutel werden nach der Rollenmessung analysiert. Die Ergebnisse der Beutelanalyse werden für die gesetzteskonforme Emissionsmessung benötigt.

3.3.2 Abgasanalyse

Die Abgaskomponenten werden mithilfe der Abgasanalyse des Typs *AMA i60* der Firma *AVL* analysiert. In diesem Gerät sind mehrere Analysatoren für die Abgase NO_x , HC, CO und CO_2 verbaut.

Die HC-Messung erfolgt mit zwei Flammenionisationsdetektoren (FID). Einer dieser FIDs detektiert den gesamten Anteil an HC im Abgas, der andere ausschließlich den Methan-Anteil. Für die Euro 4 Gesetzgebung ist nur der Gesamtanteil an HC relevant.

In einem Chemoluminiszenzdetektor (CLD) werden die Stickoxide erfasst. Dabei werden die Konzentration von NO und die Gesamtkonzentration NO_x (NO und NO_2) erfasst. Der NO_2 -Anteil kann als Differenz der Konzentrationen berechnet werden. Weil für die Gesetzgebung nur der Gesamtanteil der NO_x relevant ist wird zwischen NO und NO_2 nicht unterschieden.

CO und CO_2 werden mit einem Infrarotdetektor bestimmt. Die beiden Gase werden durch ihr charakteristisches Frequenzspektrum unterschieden.

3.4 Grundlagen der Einspritzmengenberechnung

Das verwendete Drosselklappenmodul *M3A* der Firma *Synerject* besitzt keinen Sensor zur direkten Luftmassenmessung. Das bedeutet, dass die Motorelektronik durch verschiedene andere Messgrößen die Luftmenge bestimmen muss, damit sie die Einspritzmenge berechnen kann. Diese Messgrößen stammen zum einen aus den im Modul verbauten Sensoren für Druck, Temperatur und der Drosselklappenstellung und zum anderen aus den externen Sensoren für Drehzahl, Kurbelwellenposition und Motortemperatur (vergleiche Kapitel 3.1.4).

Der Ablauf zur Bestimmung der Einspritzmengenberechnung ist in Abbildung 3-27 schematisch dargestellt.

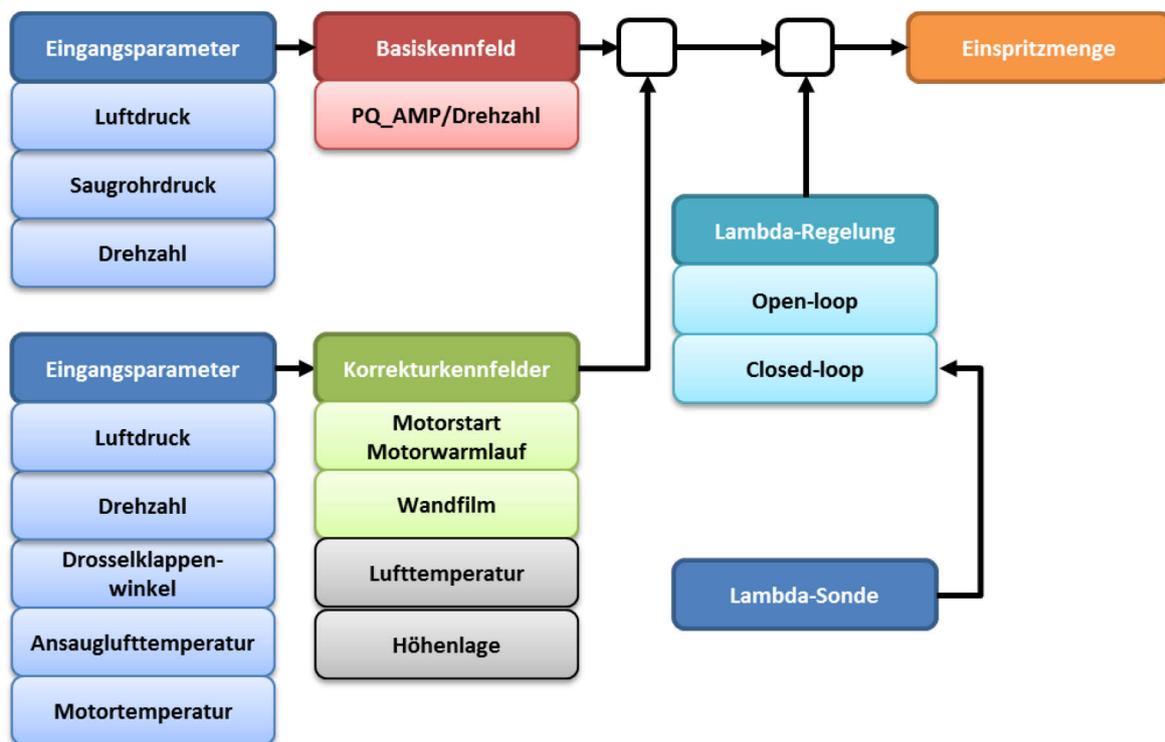


Abbildung 3-27: Schematische Bestimmung der Einspritzmenge im Motorsteuergerät

Die Bestimmung der Luftmasse erfolgt grundsätzlich mithilfe der Parameter Luftdruck, Saugrohrdruck und Drehzahl. Mit diesen Eingangsgrößen und dem zugehörigen Basiskennfeld berechnet das Steuergerät die angesaugte Luftmenge. Mit dieser Luftmenge und dem stöchiometrischen Luftbedarf kann im Anschluss die Einspritzmenge bestimmt werden. Die Erstellung des Basiskennfeldes wird in Kapitel 3.5.1 erklärt.

Diesem Grundwert der Einspritzmenge werden verschiedene Korrekturkennfelder, die weitere Eingangsgrößen und Betriebszustände berücksichtigen, überlagert. Darunter fallen der Motorstart und -warmlauf, die Wandfilmkorrektur, der Einfluss der Lufttemperatur und der Höhenlage.

Die Lambda-Regelung am Schluss dieser Kette korrigiert die Einspritzmenge bei Bedarf mithilfe der Lambda-Sonde auf einen stöchiometrisches Gemisch.

Im Laufe dieser Diplomarbeit ist die Grundbedatung der in Abbildung 3-27 erwähnten Kennfelder und Korrekturparameter an den Versuchsträger angepasst worden.

3.5 Untersuchungen am Motorprüfstand

3.5.1 Applikation des Basiskennfeldes

Das Basiskennfeld mit den Eingangsparametern Luftdruck, Saugrohrdruck und Drehzahl ist das wichtigste Kennfeld des Motorsteuergerätes. Das Steuergerät kann nur dann die richtige Luftmenge berechnen, wenn dieses Kennfeld korrekt auf den Motor abgestimmt ist. Die Abstimmung dieses Kennfeldes wird auch Luftpfadkalibrierung genannt.

Als Luftpfad wird der Weg der Luft durch den Motor verstanden. Das heißt der Weg geht von der Umgebung durch das Ansaugsystem in den Brennraum und von dort durch das Abgassystem zurück in die Umgebung. Jedes Bauteil entlang dieses Weges trägt mit seinen Strömungseigenschaften zur effektiv angesaugten Luftmasse bei. Falls eine Komponente entlang des Luftpfades getauscht wird, muss das Kennfeld überprüft und gegebenenfalls neu kalibriert werden.

Beim Basiskennfeld handelt es sich um eine 18×14 Matrix, welche die Motordrehzahl in U/min und den einheitslosen Druckquotienten PQ_AMP als Stützstellen verwendet. Der Druckquotient PQ_AMP wird aus dem Quotienten von Saugrohrdruck MAP (manifold air pressure) und Umgebungsdruck AMP (ambient pressure) gebildet, siehe Formel 3-1. Dieser Druckquotient dient als Maß für die Motorlast. Der Matrixwert MAF_MAP (mass air flow, manifold air pressure) hat die Einheit mg/Zyklus/mbar.

$$PQ_AMP = \frac{MAP}{AMP} \quad \text{Formel 3-1}$$

Mithilfe dieses Kennfeldes kann das Motorsteuergerät, anhand der Eingangsparameter Drehzahl, Saugrohrdruck, Umgebungsdruck, Ansauglufttemperatur und Motortemperatur, die angesaugte Luftmasse berechnen. Somit kann das Steuergerät die richtige Einspritzmenge bestimmen.

Bestimmung der Kennfeldwerte

Im Nachfolgenden werden die Berechnungsschritte der Kennfeldwerte beschrieben. Die angeführten Rechenschritte sind dabei die gleichen, welche auch vom Motorsteuergerät zur Berechnung der Einspritzmenge durchgeführt werden, allerdings in umgekehrter Reihenfolge.

Die Berechnung ist im Tabellenkalkulationsprogramm *Microsoft Excel* erfolgt. Zuvor sind sie mit dem *Measure Data Analyser (MDA)* aufbereitet und in Form einer einfachen *ASCII*-Textdatei abgespeichert worden.

Zuerst muss aus der Einspritzzeit TI_HOM_1 (injection time homogeneous) der Kraftstoffmassenfluss MFF (mass fuel flow) berechnet werden. Die Berechnung erfolgt mit der Durchflusskonstante $C_FAC_MFF_TI_STND_1$ (constant factor, mass fuel flow, injection time, standard). Die Durchflusskonstante hat die Einheit ms/mg. Sie gibt an

wieviel Kraftstoff je Zeiteinheit durch den Injektor fließt. Die Formel 3-2 gibt die Berechnung von MFF an.

$$MFF = \frac{TI_HOM_1}{C_FAC_MFF_TI_STND_1} \quad \text{Formel 3-2}$$

Aus dem Kraftstoffmassenfluss MFF wird in weiterer Folge, mithilfe des Lambda-Wertes und dem stöchiometrischen Luftverhältnis $L_{st} = \frac{1}{C_MFF_FAC}$, der angesaugte Luftmassenstrom berechnet, siehe Formel 3-3.

$$MAF = \frac{MFF \cdot LAMBDA}{C_MFF_FAC} \quad \text{Formel 3-3}$$

Auf den Luftmassenstrom MAF wird anschließend der Korrekturwert MAF_COR_TIA_CYL (mass air flow correction, intake air temperature into the cylinder) angewendet, der die tatsächlich im Zylinder angesaugte Luft bestimmt, siehe Formel 3-4.

$$MAF_COR = \frac{MAF}{MAF_COR_TIA_CYL} \quad \text{Formel 3-4}$$

Dieser Korrekturwert ist von der Kühlwassertemperatur TCO (coolant temperature) und der Temperatur der Ansaugluft TIA (intake air temperature) abhängig. Er berücksichtigt die Temperaturänderung der Ansaugluft, infolge der Kraftstoffzufuhr durch den Injektor. Dieses Korrekturkennfeld ist vom Steuergerätehersteller *Synerject* übernommen worden.

Als letzter Schritt wird der korrigierte Luftmassenstrom MAF_COR durch den Umgebungsdruck AMP dividiert (Formel 3-5).

$$MAF_MAP = \frac{MAF_COR}{AMP} \quad \text{Formel 3-5}$$

Durch diese Berechnung kann jedem Druckquotienten ein MAF_MAP-Wert zugeordnet werden. Dieser kann auch grafisch dargestellt werden, siehe Abbildung 3-29 und Abbildung 3-30.

Durch die *Excel*-Funktion *Trend* kann jetzt, mithilfe der berechneten Daten, für jeden Stützpunkt im Motorkennfeld IP_MAF_BAS_MAP_N_PQ_AMP_COR (interpolation table) ein MAF_MAP-Wert interpoliert werden. Die *Trend*-Funktion benutzt dazu Polynomfunktionen. Für das Kennfeld ist ein Polynom dritter Ordnung verwendet worden.

Messparameter und Rahmenbedingungen für den Versuch

Der Versuch zur Kennfelderstellung ist am Motorprüfstand durchgeführt worden. Die im vorangegangenen Kapitel beschriebene Kennfeldberechnung macht ersichtlich, welche Parameter beim Versuch aufgezeichnet werden müssen. Diese sind in Tabelle 3-9 zusammengefasst.

Tabelle 3-9: Messvariablen für Basiskennfeld

Variable	Bezeichnung	Einheit
PQ_AMP	Druckquotient (ratio control of manifold air pressure / intake manifold pressure)	-
TPS	Drosselklappenwinkel (throttle position)	°
n	Drehzahl	U/min
TI_HOM_1	Einspritzzeit (injection time homogeneous)	ms
AMP	Luftdruck (ambient air pressure)	mbar
TIA	Ansauglufttemperatur (intake manifold temperature)	°C
Lambda	Lambda	-

Die Messparameter sind in der Applikationssoftware *INCA* in einen Datenrekorder aufgezeichnet und gespeichert worden.

Um Fehler zu minimieren und die Reproduzierbarkeit der Messungen zu gewährleisten, müssen folgende Bedingungen erfüllt sein:

- möglichst konstante Motortemperatur
- möglichst konstanter Luftdruck im Messraum
- möglichst konstante Lufttemperatur im Messraum
- deaktivierter Leerlaufregler des Drosselklappenmoduls

Die Motortemperatur ist im Versuch mithilfe einer Kühlwasserregelung bei 85 °C (± 3 °C) gehalten worden. Schließlich müssen der Luftdruck und die Lufttemperatur auf konstantem Niveau gehalten werden, um so einen Einfluss der Korrekturfelder für Temperatur und Höhenlage ausschließen zu können. Von äußerster Wichtigkeit ist, dass der Leerlaufregler deaktiviert ist. Dieser fördert ansonsten bei gering geöffneter Drosselklappe durch ein Bypassventil zusätzliche Luft zum Motor und verfälscht dadurch die Messergebnisse.

Der Leerlaufregler lässt sich im Motorsteuergerät mit der Variable `ISA_MODE_BAS` (idle speed actuator) steuern. Mit dem Wert `NC_ABV_MODE_DISABLED` wird der Leerlaufregler ausgeschaltet.

Versuchsablauf Einzelmessungen

In diesem Abschnitt wird die Kennfelderstellung anhand von Einzelmessungen erklärt.

In Abbildung 3-28 werden die einzelnen Messpunkte des Versuchs abgebildet. Der Bereich unter 4125 U/min ist, aufgrund der verwendeten Leistungsbremse, nicht messbar (rot markiert). Die Bremse kann in diesem Drehzahlbereich, bedingt durch die Übersetzung des Getriebes, nicht genügend Bremsleistung aufbringen. Auch bei Werten unter 0,5 des Druckquotienten (PQ_AMP) lässt sich die Drehzahl kaum auf einem konstanten Wert halten (blau markiert). Messungen im Bereich über 9750 U/min sind aus Festigkeitsgründen des Ventiltriebes nicht durchführbar. Aus diesem Grund kommen in diesen Bereichen extrapolierte Werte zum Einsatz, die später auf dem Rollenprüfstand korrigiert werden.

		Drehzahl [U/min]																	
		0	1000	1400	1500	2500	3500	4125	4750	5375	6000	6625	7250	7875	8500	9125	9750	10375	11000
pq_amp [-]	0,200																		
	0,280																		
	0,340																		
	0,390																		
	0,430							001											
	0,517							002	006	011	016	021	026	031	036	041	046		
	0,576																		
	0,635								007	012	017	022	027	032	037	042	047		
	0,695								003										
	0,754								008	013	018	023	028	033	038	043	048		
	0,813																		
	0,872								004	009	014	019	024	029	034	039	044	049	
	0,991																		
	1,050																		
	Volllast								005	010	015	020	025	030	035	040	045	050	

Abbildung 3-28: Einzelmesspunkte der Basiskennfelderstellung

Anhand des Drehzahlpunktes von 4125 U/min und beginnend mit Messpunkt 001 soll nun der Ablauf der Messungen beschrieben werden.

Zuerst wird der betriebswarme Motor, mithilfe der Leistungsbremse auf die vorgegebene Drehzahl von 4125 U/min gebracht. Danach wird die Drosselklappe soweit wie möglich geschlossen, sodass die Drehzahl noch konstant gehalten werden kann. In diesem Fall ergibt sich ein Druckquotient (PQ_AMP) von ca 0,43. Bei diesen Einstellungen wird die Einspritzzeit (TI_HOM_1) manuell so eingestellt, dass sich im Motor, laut Lambda-Messung, eine stöchiometrische Verbrennung bei $\lambda = 1$ einstellt. Dieser Betriebspunkt wird, mithilfe des Datenrekorders in *INCA* aufgezeichnet. Nach Beenden der Aufzeichnung wird die Drosselklappe weiter geöffnet bis der nächste Druckquotient-Wert laut Messplan erreicht worden ist. Bei diesem Lastpunkt wird die Einspritzzeit wieder angepasst und der Betriebspunkt in weiterer Folge aufgezeichnet.

Mit diesem Verfahren sind nach und nach die 50 Lastpunkte laut Messplan, vermessen und aufgezeichnet worden. In Abbildung 3-29 sind die Kennfeldverläufe für Messung und Rechnung bei 4125 U/min dargestellt. Die rote Linie zeigt die Werte aus der Messung und die blaue Linie spiegelt den Verlauf der Polynomfunktion wieder. Der Verlauf bei kleinen Druckquotienten muss manuell nachbearbeitet werden, da Werte kleiner-gleich Null, wie sie die Polynomfunktion wiedergibt, nicht möglich sind.

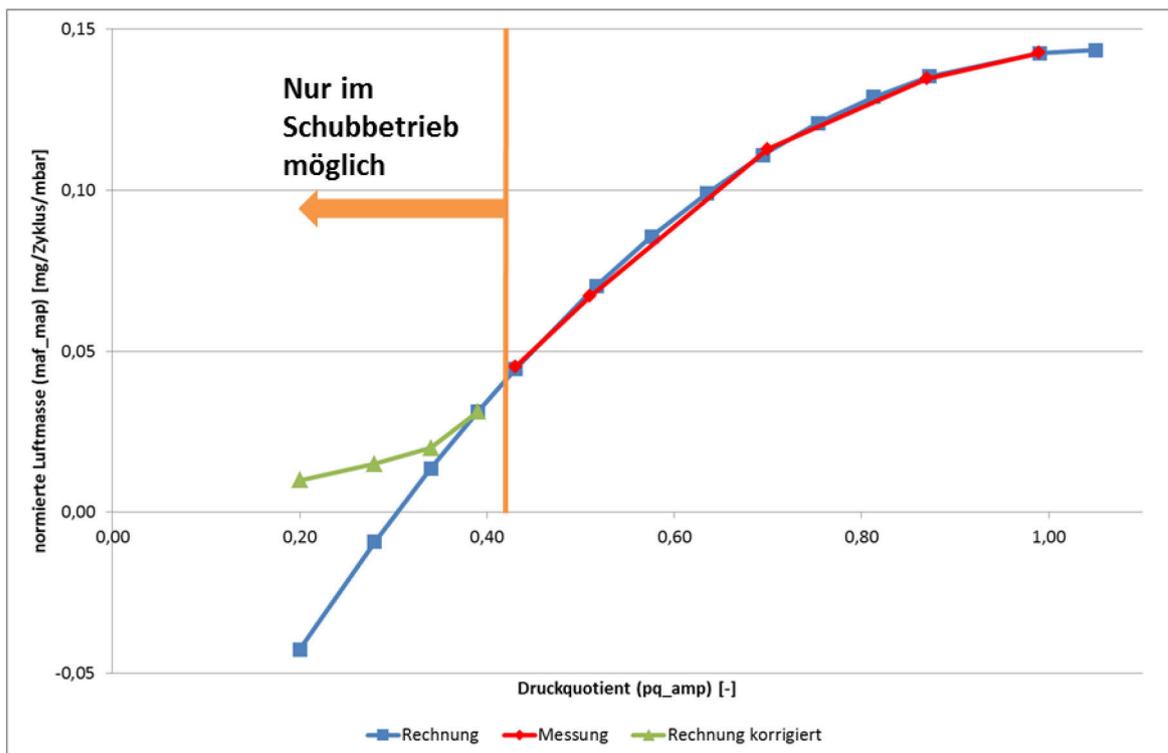


Abbildung 3-29: Vergleich der Kennfeldwerte im Basiskennfeld von Messung zur Rechnung bei Einzelmessungs-Methode (4125 U/min)

Infolge der Messergebnisse konnte ein grobes Basiskennfeld erstellt werden. Dieses Kennfeld ist im Anschluss in das Motorsteuergerät übertragen worden. Im nächsten Schritt soll dieses Kennfeld verbessert werden.

Versuchsablauf mit Lambdaregelung

Um die Basiskennfelder, die durch Einzelmessungen erzeugt worden sind, zu verbessern, wird in diesem Abschnitt eine Methode genutzt, die eine genauere Bedatung zulässt. Bei dieser Vorgehensweise wird die Lambdaregelung des Motorsteuergerätes benutzt.

Der Versuchsablauf mit der Lambdaregelung ist sehr ähnlich zu der Einzelmessungsmethode. Es werden die gleichen Drehzahlstützstellen, wie in Abbildung 3-28 zu sehen, benutzt. Der Unterschied besteht darin, dass nicht mehr die einzelnen Lastpunkte (Druckquotient PQ_AMP) zu jeder Drehzahl angefahren werden, sondern stattdessen ein ganzer Bereich durchfahren wird. Dies wird durch eine kontinuierliche Messung, bei sich langsam öffnender Drosselklappe, realisiert. Das Öffnen der Drosselklappe wird vom Prüfstandsrechner durchgeführt. Dabei ist die Zeit von der Startposition (circa 20% offen) bis zur komplett offenen Drosselklappe mit 180 Sekunden definiert worden.

Während dieses Vorgangs berechnet das Motorsteuergerät, mithilfe des vorher erstellten Kennfeldes und der Lambdaregelung, die notwendige Bestromungsdauer des Injektors selbst. Die manuelle Vorwahl der Einspritzmenge entfällt

Im Anschluss sind die Ergebnisse gefiltert worden, indem alle Messpunkte die außerhalb eines definierten Lambdabereichs ($\lambda = 1 \pm 0,01$) liegen, von der Berechnung ausgenommen worden sind.

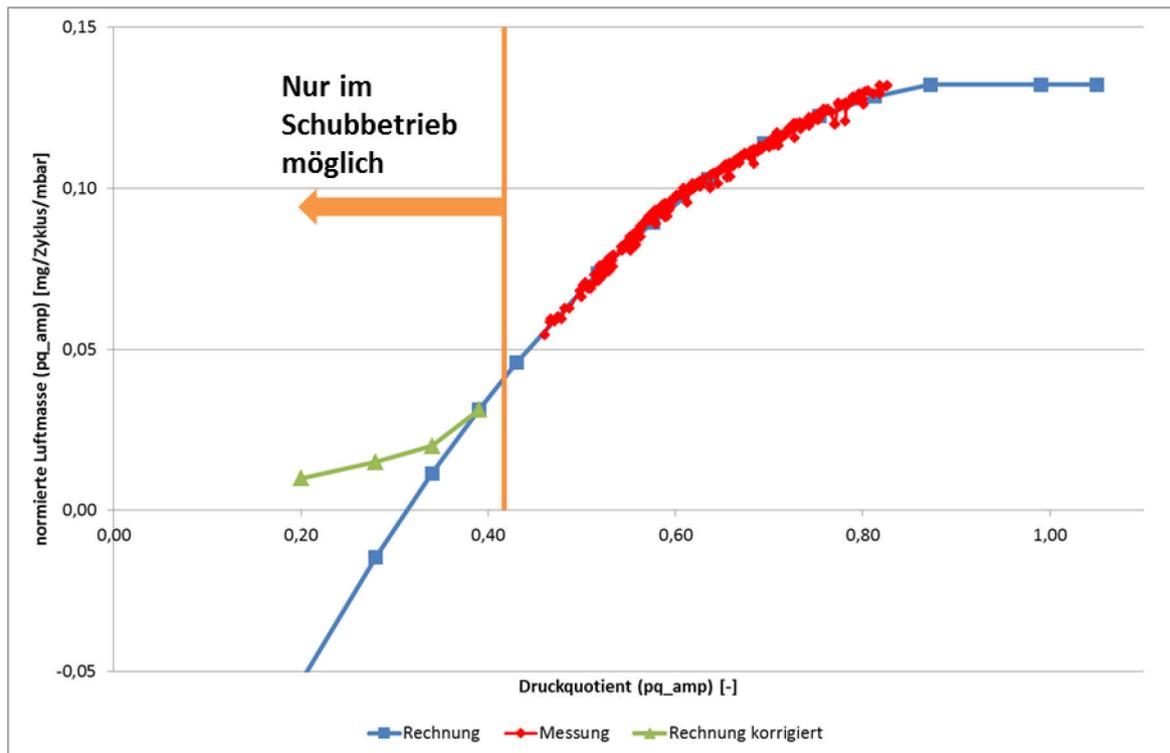


Abbildung 3-30: Vergleich der Kennfeldwerte im Basiskennfeld von Messung zur Rechnung bei Messung mit Lambda-Regelung (4125 U/min)

In Abbildung 3-30 ist wieder ein Vergleich bei 4125 U/min, zwischen den Werten aus der Messung und den Werten einer Polynomfunktion dritter Ordnung, zu sehen. Auch hier müssen die Werte bei kleinen Druckquotienten korrigiert werden, da Werte kleiner-gleich Null, wie sie die Polynomfunktion wiedergibt, nicht möglich sind.

Überprüfung der Kennfeldapplikation

Die berechneten Kennfeldwerte sind im Anschluss der Berechnung überprüft worden. Dazu sind die Kennfeldwerte in das Motorsteuergerät übertragen und durch Abfahren mehrerer Betriebspunkte kontrolliert worden. Hierfür ist der Motor beim Luftverhältnis $\lambda = 1$ betrieben worden. Zu dieser Überprüfung ist die Lambda-Regelung deaktiviert worden.

3.5.2 Lambdasondenposition

Die Lambda-Regelung ist, wie schon erwähnt, ein wichtiger Bestandteil der Abgasnachbehandlung am Otto-Motor. Diese Abgasnachbehandlung wird mithilfe eines Drei-Wege-Katalysators durchgeführt. Sein Einsatz ist notwendig, um die strenge Abgasgesetzgebung einhalten zu können (vergleiche Kapitel 2.3).

Der Katalysator setzt zur optimalen Funktionsweise einen Motorbetrieb bei $\lambda = 1$ voraus (vergleiche Kapitel 2.2.5). Der Betrieb bei $\lambda = 1$ wird mithilfe der Lambda-Regelung und der dazugehörigen Lambda-Sonde erreicht.

Die Lambda-Sonde gibt erst ab einer gewissen Betriebstemperatur ein Messsignal zur Auswertung an die Lambda-Regelung weiter. Diese Temperatur liegt normalerweise bei

über 350 °C. Aus diesem Grund ist eine Lambda-Regelung direkt nach einem Kaltstart nicht möglich.

Es gibt verschiedene Ansätze, um die Betriebstemperatur der Lambda-Sonde schnell zu erreichen. Durch den Einsatz einer elektrisch beheizten Lambda-Sonde kann die Betriebstemperatur innerhalb von 20 bis 30 Sekunden erreicht werden. Dieser Lösungsansatz ist jedoch aus Kostengründen bei diesem Entwicklungsprojekt nicht möglich.

Eine weitere Möglichkeit ist ein spezielles Motorwarmlauf-Programm. Mit diesem kann die Abgastemperatur nach dem Starten maximiert werden, sodass die Sonde schnell aufgeheizt wird. Ein solches Warmlaufprogramm kann mit einer Verstellung des Zündzeitpunktes in Richtung spät oder durch eine späte Einspritzung (bei Direkteinspritzung möglich) realisiert werden.

Dieser Vorgang würde auch einen frühen Ligh-off des Katalysators unterstützen. Allerdings ist ein solches Warmlaufprogramm mit der verwendeten Motorsteuerung nur begrenzt möglich. Mithilfe des Leerlaufreglers ist es möglich durch Erhöhen der geförderten Luftmasse ein Verstellen der Zündung Richtung spät zu veranlassen. Durch die höhere Luftmasse wird mehr Kraftstoff eingespritzt und somit mehr Energie in den Brennraum gebracht. Bei früher Zündung würde dies ein Hochdrehen des Motors bedeuten. Der Leerlaufregler stellt jedoch die Zündung in Richtung spät um die vorgegebene Leerlaufdrehzahl zu halten. Durch die späte Zündung wird ein größerer Teil der eingebrachten Energie in Abgaswärme umgesetzt. Dies führt zu höheren Verbräuchen im Leerlauf.

Da ein erhöhter Verbrauch im Leerlauf unerwünscht ist, verbleibt als einzige Möglichkeit, die Lambda-Sonde optimal im Auspufftrakt zu positionieren. Dabei ist zu beachten, dass die maximale Betriebstemperatur der Sonde bei hoher Motorlast nicht überschritten werden darf, um die Haltbarkeit der Sonde nicht zu verkürzen.

Messung des Temperaturverlaufs

Durch die Bestimmung des Temperaturverlaufs im Auspuff kann die beste Position für die Lambda-Sonde bestimmt werden. Hierzu sind insgesamt acht Temperaturmessstellen in verschiedenen Abständen zum Auslassflansch angebracht worden, siehe Abbildung 3-31. Für diese Messung sind Thermoelemente des Typs *K* verwendet worden. Während der Temperaturmessung ist eine spezielle Lambda-Sonde mit integrierten Temperaturfühlern verwendet worden (Temperaturmessstelle T_L). Durch den Einsatz dieser speziellen Lambda-Sonde ist die Messung der Sondentemperatur an der Sondenspitze, am Sechskant und an der Sondenkappe möglich. Bei der hier beschriebenen Messung ist die Temperatur der Sondenspitze verwendet worden.

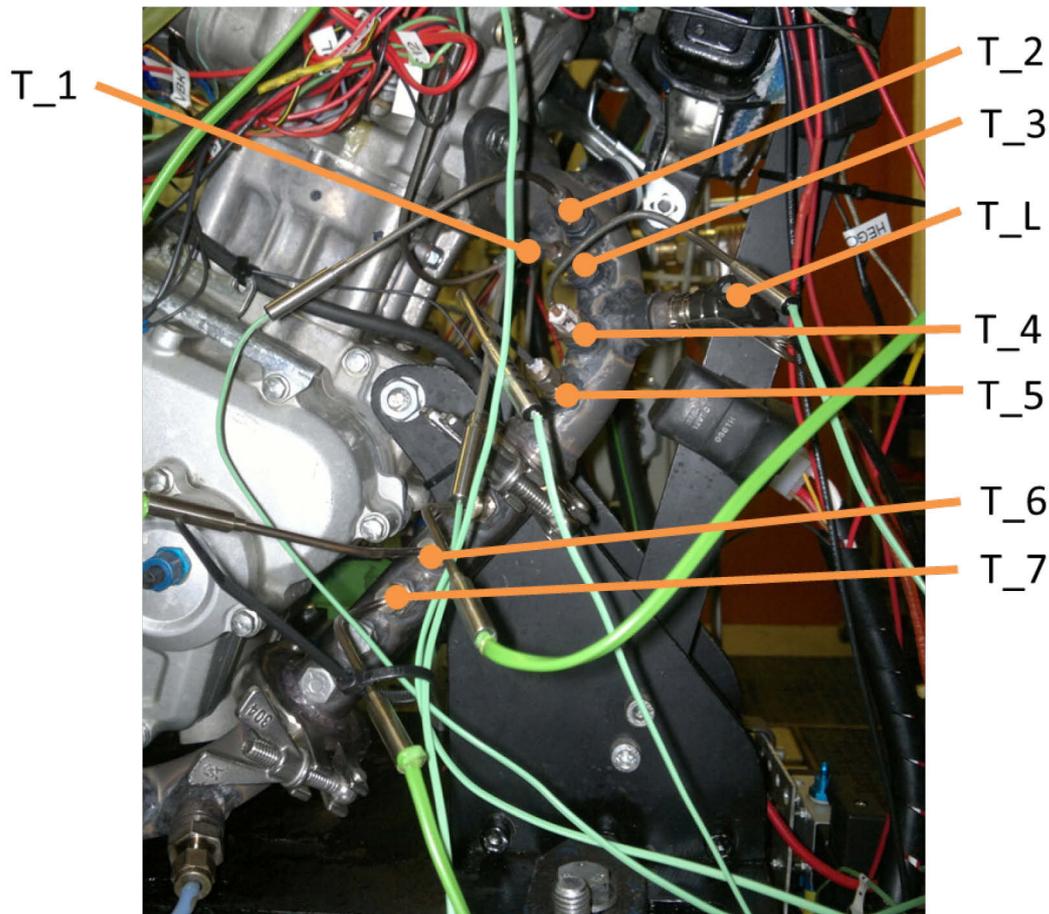


Abbildung 3-31: Messstellen zur Messung des Temperaturverlaufs im Auspuff

Die Messstellen befinden sich in den Abständen 50 mm, 70 mm, 95 mm, 125 mm, 150 mm, 200 mm und 245 mm zum Auslass. Die Lambda-Sonde mit dem Temperaturfühler ist in einem Abstand von 115 mm zum Auslass positioniert worden.

Die Warmlaufmessung ist bei Leerlauf mit circa 1400 U/min durchgeführt worden. Dabei sind die Temperaturen aller acht Messstellen kontinuierlich mit 1 Hz aufgezeichnet worden.

Nach der Warmlaufmessung sind weitere Test bezüglich des Abgas-Temperaturverhaltens bei unterschiedlichen Betriebszuständen durchgeführt worden. Einflüsse der Parameter Verbrennungsluftverhältnis und Zündzeitpunkt sind untersucht worden um die maximal erreichbare Abgastemperatur festzustellen.

Abgastemperatur im Leerlauf

In Abbildung 3-32 ist der Temperaturverlauf im Auspuff während des Warmlaufes bei Leerlaufdrehzahl dargestellt.

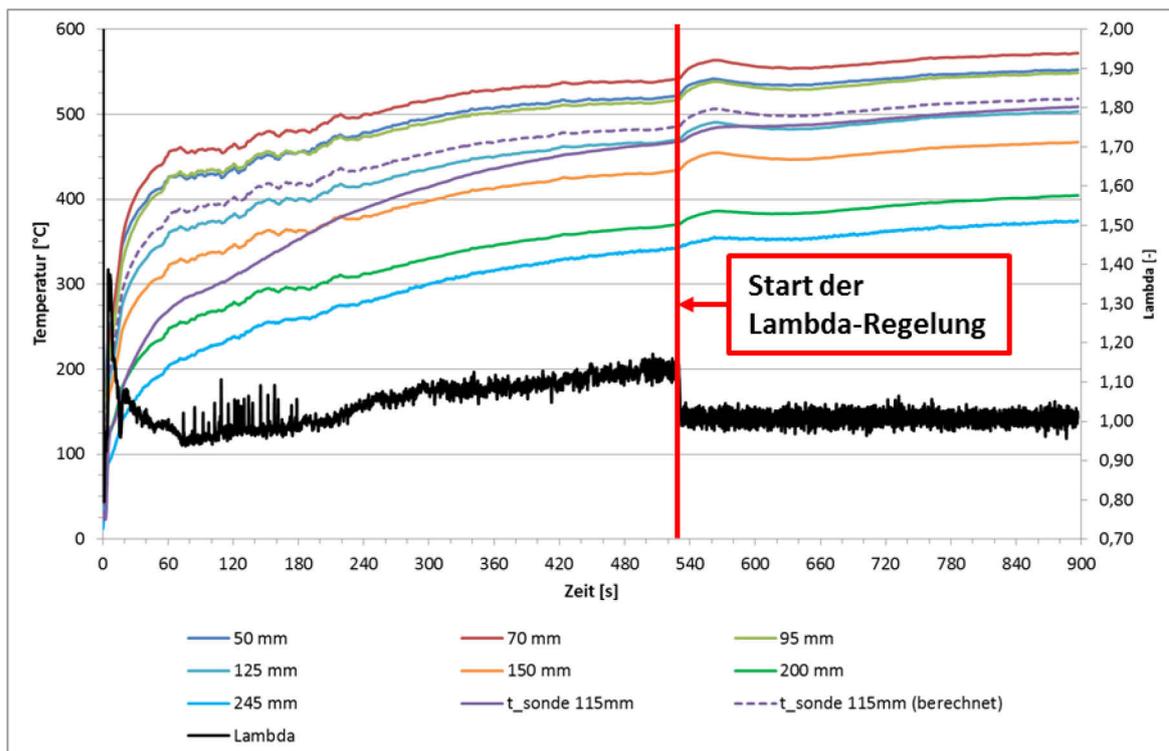


Abbildung 3-32: Abgastemperatur beim Warmlauf im Leerlauf

Im Diagramm sind die Messergebnisse der einzelnen Messstellen als durchgezogene Linie dargestellt. Der Start der Lambda-Regelung ist mit einer roten senkrechten Linie markiert. Die schwarze Linie zeigt das von der Breitband-Lambda-Sonde gemessene Luftverhältnis.

Auffallend ist, dass die Temperatur die an der Lambdasonde gemessen wird (violette durchgezogene Linie), viel langsamer ansteigt als die anderen Temperaturen. Die violett gestrichelte Linie zeigt die erwartete Temperatur an der Position der Lambda-Sonde an. Diese Temperatur ist mit den Werten der Messstellen 95 mm und 125 mm interpoliert worden.

Der langsamere Anstieg der gemessenen Temperatur an der Lambda-Sonde ist mit den größeren Abmessungen und der höheren Masse zu erklären. Ein Temperaturelement nimmt durch die kleinere Masse viel schneller die Temperatur des Messmediums an.

Der Motor wird in den ersten 180 Sekunden mit einem fetten Verbrennungsluftverhältnis betrieben. Nach den 180 Sekunden driftet es in den mageren Bereich ab. Grund dafür ist, dass der Warmlauf noch nicht an den Motor angepasst ist.

Der stärkere Temperaturanstieg nach dem Start der Lambda-Regelung ist mit einem verstellen der Zündung in Richtung spät zu erklären. Weil die Lambda-Regelung ab diesem Punkt das Verbrennungsluftverhältnis auf $\lambda = 1$ regelt, wird mehr Kraftstoff in den Brennraum eingebracht. Die Motorsteuerung verhindert durch die späte Zündung ein steigen der Motordrehzahl. Der darauf folgende Rückgang der Temperatur wird durch das Öffnen des Thermostates im Kühlkreislauf verursacht. Durch die Zirkulation des Wassers wird der Motor kühler und die Abgastemperatur sinkt leicht.

Im Diagramm ist zu erkennen, dass die Temperatur bei 70 mm (rote Linie) am schnellsten ansteigt. Falls hier die maximal mögliche Abgastemperatur unter der maximal zulässigen Dauertemperatur der Sonde liegt, wäre sie die zu bevorzugende Position für die Lambda-Sonde.

Einfluss des Zündwinkels auf die Abgastemperatur

Die Variation des Zündzeitpunktes ist bei einer Leerlaufdrehzahl von 1400 U/min durchgeführt worden. Der Verstellbereich hat dabei von einer Frühzündung bei -10°KW bis zu einer Spätzündung von $+10^\circ\text{KW}$ gereicht. Die Schrittweite ist mit $2,5^\circ\text{KW}$ gewählt worden. In Abbildung 3-33 ist das Ergebnis der Zündwinkelvariation abgebildet.

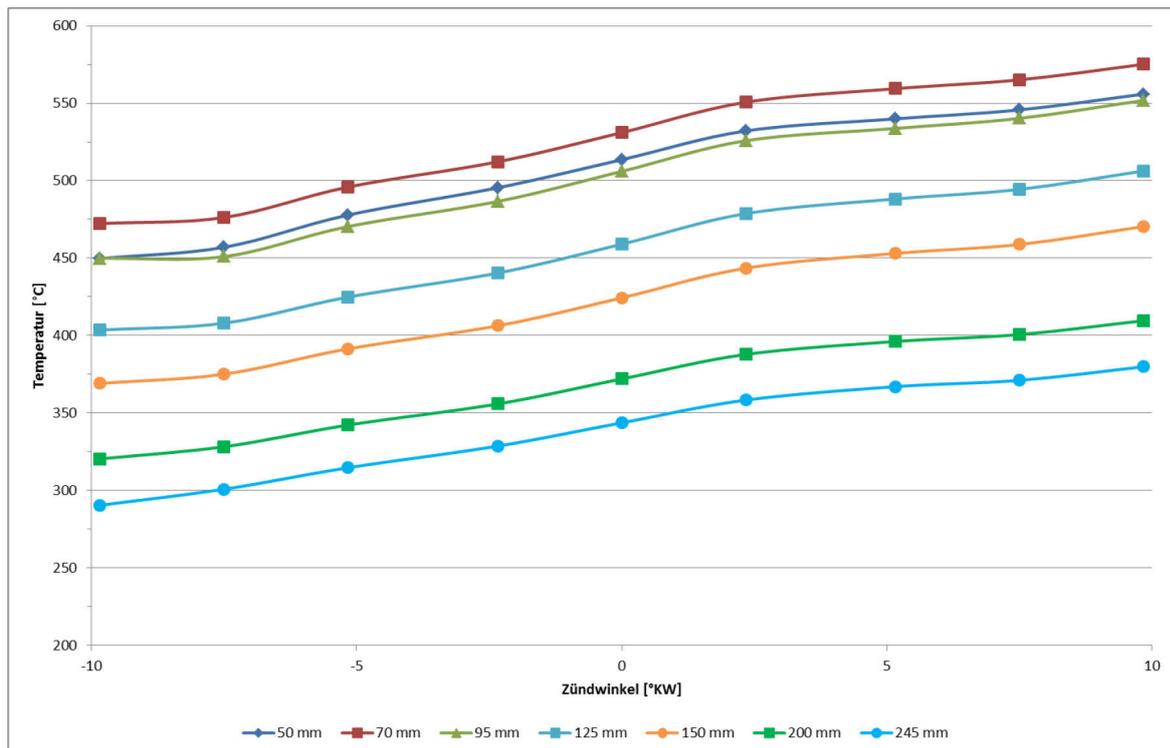


Abbildung 3-33: Abhängigkeit der Abgastemperatur vom Zündwinkel und vom Abstand zum Auslass (Leerlauf)

Im Diagramm ist zu erkennen, dass die Abgastemperatur bei früher Zündung wesentlich geringer ist, als bei später Zündung. Das bedeutet, dass bei früher Zündung die Verbrennungslage wesentlich günstiger liegt. Bei der späten Zündung liegt die Verbrennung näher beim Auslasstrakt und somit wird die Abgasenthalpie erhöht. Dadurch steigt die Abgastemperatur.

Abhängigkeit der Abgastemperaturen vom Luftverhältnis

Der Einfluss des Verbrennungsluftverhältnisses λ bei Leerlaufdrehzahl (1400 U/min) auf die Abgastemperatur ist im Bereich von $\lambda = 0,9$ bis $\lambda = 1,1$ in Schritten von 0,05 bestimmt worden. Bei dem Lastpunkt mit der höchsten Abgastemperatur ist der Einfluss von Lambda im Bereich $\lambda = 0,9$ bis $\lambda = 1,0$ ermittelt worden. Eine Messung bei $\lambda > 1$ ist zum Motorschutz (zu hohe thermische Belastung) nicht durchgeführt worden.

Der Einfluss des Luftverhältnisses auf die Abgastemperatur ist bei zwei Lastpunkten untersucht worden. Abbildung 3-34 zeigt den Temperaturverlauf im Leerlauf und Abbildung 3-35 bei 8600 U/min und Vollast.

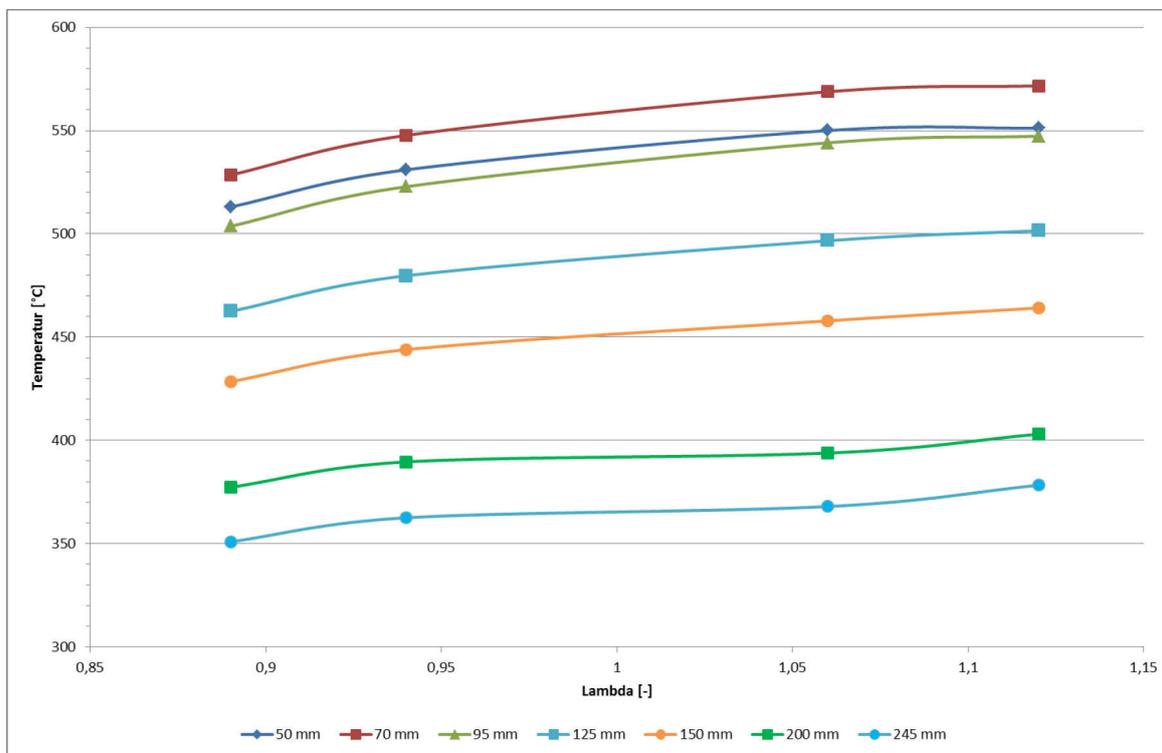


Abbildung 3-34: Abgastemperatur bei Variation des Verbrennungsluftverhältnisses λ im Leerlauf, in Abhängigkeit des Abstandes zum Auslass

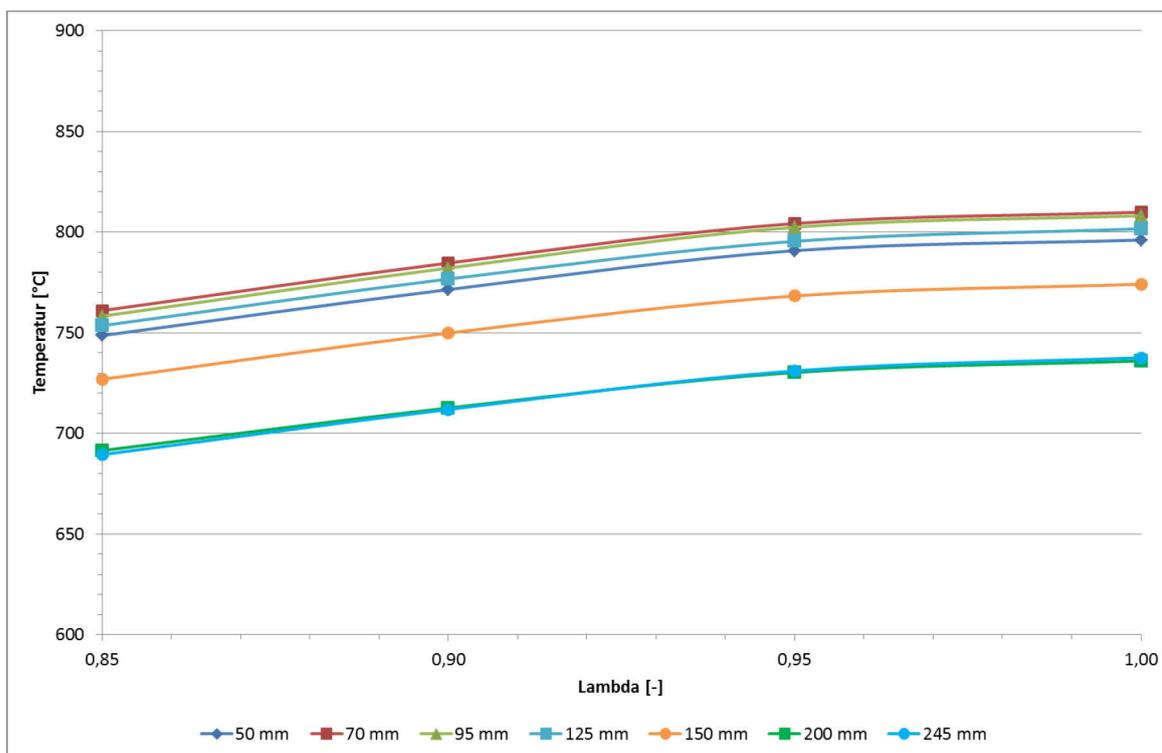


Abbildung 3-35: Abgastemperatur bei Variation der Verbrennungsluftverhältnisses λ bei Vollast und 8600 U/min, in Abhängigkeit des Abstandes zum Auslass

Bei den beiden Abbildungen ist zu sehen, dass die Abgastemperatur mit fallendem Luftverhältnis abnimmt. Dies wird durch eine bessere Kühlung (Innenkühlung) durch den Kraftstoff hervorgerufen. Der Gradient des Temperaturanstieges ist dabei bei niedrigem Verbrennungsluftverhältnis höher als bei hohem Verbrennungsluftverhältnis.

Bestimmung der Lambda-Sonden-Position

In Abbildung 3-36 ist der Verlauf der Temperatur bei 8600 U/min und Volllast zu sehen.

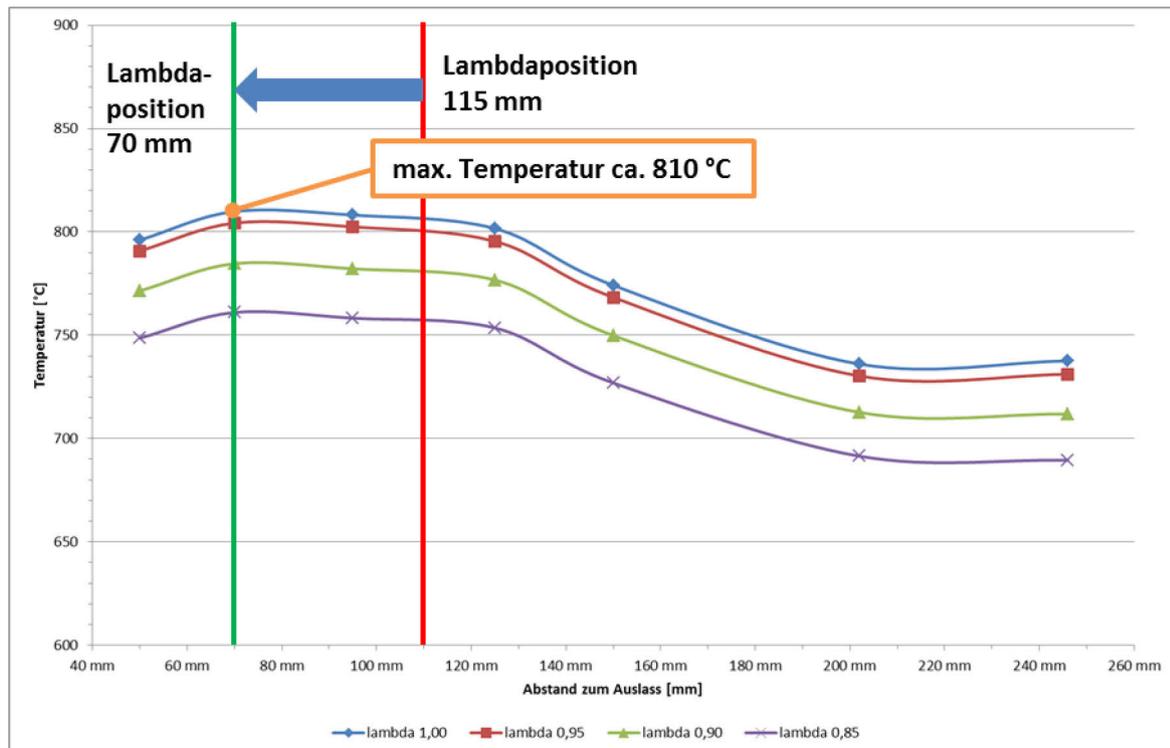


Abbildung 3-36: Maximale Abgastemperatur in Abhängigkeit des Abstandes zum Auslass (Volllast bei 8600 U/min)

Hier ist zu erkennen, dass die maximale Temperatur des Abgases bei 810 °C liegt. Das bedeutet die Temperatur liegt immer unter der maximal zulässigen Dauertemperatur von 850 °C der Lambda-Sonde.

Wie aus der Abbildung 3-32 und Abbildung 3-36 hervorgeht ist die optimale Position für die Lambda-Sonde bei 70 mm. An dieser Position ist die Aufheizzeit am geringsten und zugleich wird die maximale Dauertemperatur der Sonde nicht überschritten.

Einfluss der Lambda-Sondenposition im Testzyklus *WMTC*

Die Auswirkungen der veränderten Lambda-Sonden-Position im ersten Teil des *WMTC* Testzyklus sind in Abbildung 3-37 und Abbildung 3-38 gezeigt. Die Messungen sind jeweils mit einem beschichteten Katalysator durchgeführt worden. Da der relevante Bereich jedoch vor dem Light-off des Katalysators liegt, lassen sich trotzdem Tendenzen erkennen.

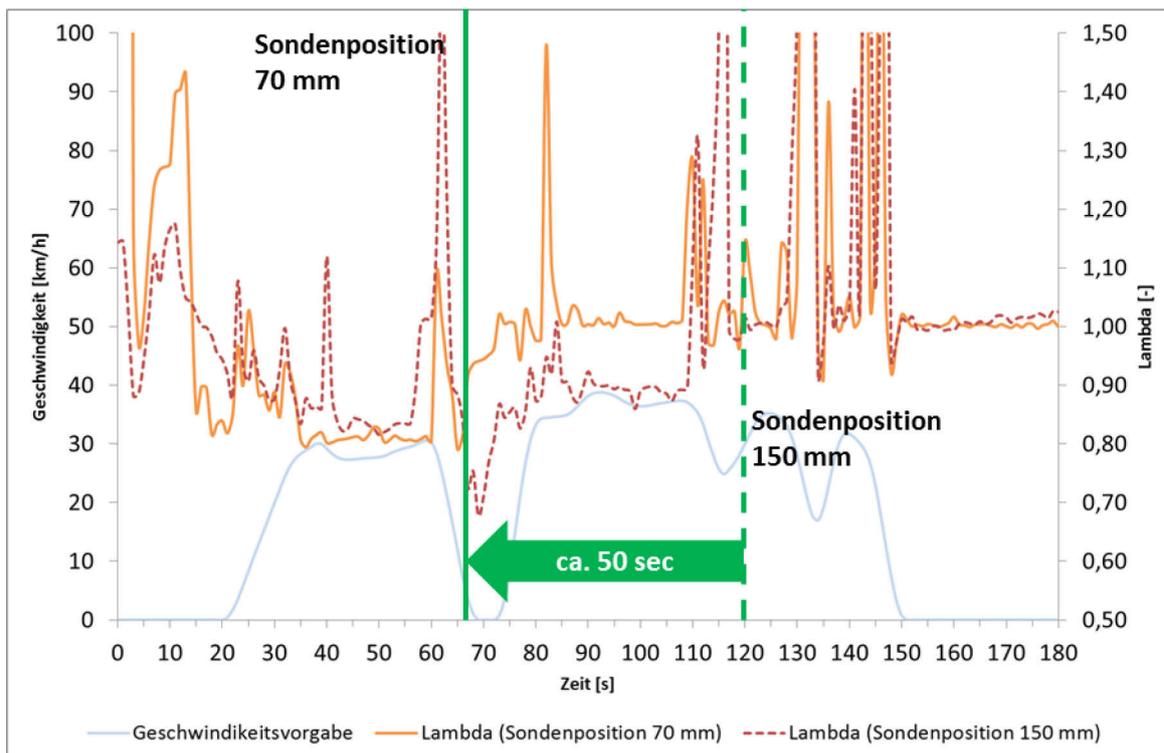


Abbildung 3-37: Auswirkungen der Sondenposition auf den Beginn der Lambdaeregelung im Teil 1 des WMTC (0 bis 180 Sekunden)

Durch die Versetzung der Lambda-Sonde näher zum Auslass ist eine circa 50 Sekunden früher einsetzende Lambda-Regelung erzielt worden.

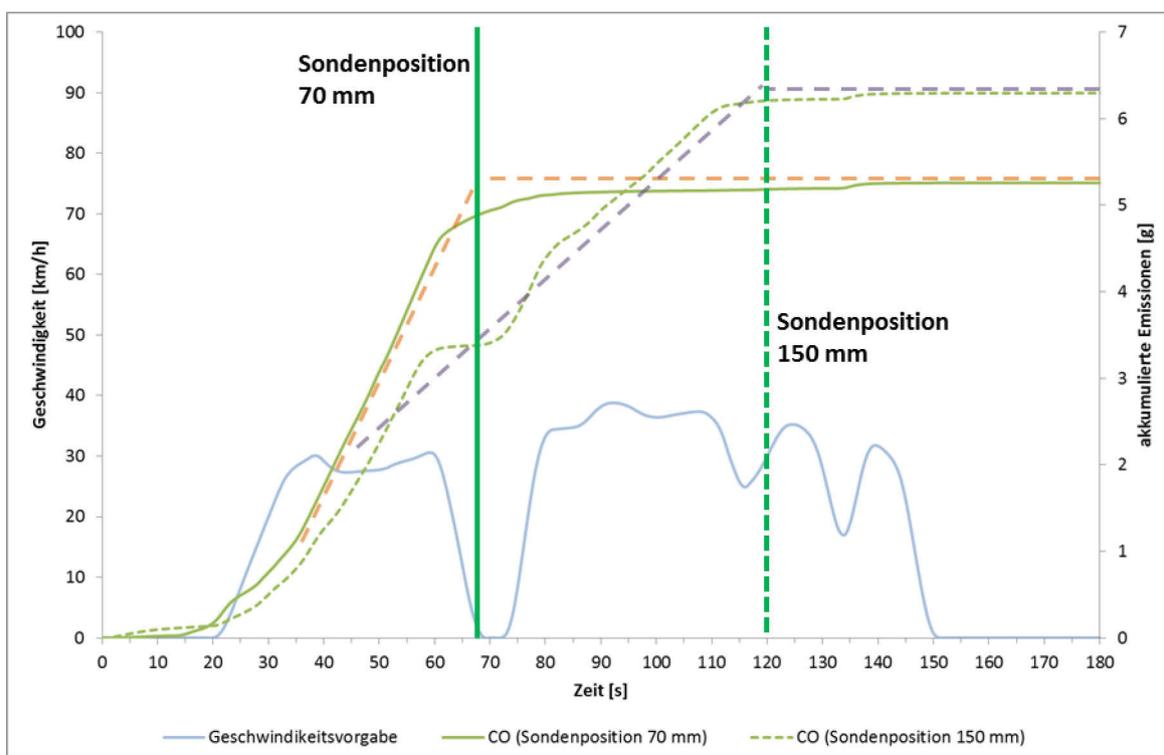


Abbildung 3-38: Auswirkung der Sondenpostion auf die CO-Emissionen im Teil 1 des WMTC (0 bis 180 Sekunden)

In Abbildung 3-38 wird der CO-Ausstoß der beiden Lambda-Sonden-Positionen dargestellt. Hier sind die Punkte bei dem eine Abflachung des Emissionsausstoßes

stattfindet ersichtlich (orange und violett gestrichelte Linien). Dieser tritt nahezu zeitgleich mit dem Start der Lambda-Regelung zusammen. Der leicht unterschiedliche CO Anstieg zwischen den beiden Messungen liegt in der etwas unterschiedlichen Fahrweise und den Unregelmäßigkeiten nach dem Start. Diese sind auch in Abbildung 3-37 am unregelmäßigen Verlauf des Verbrennungsluftverhältnis zu sehen.

Bei den HC-Emissionen (Abbildung 3-39) zeigt sich auch ein Abflachen des Emissionsverlaufes. Dieser ist jedoch nicht so stark ausgeprägt, wie bei den CO-Emissionen. Hier sind auch leicht unterschiedliche Steigungen im HC-Verlauf zu erkennen. Auch diese sind durch die nicht idente Fahrweise begründet.

Die geänderte Sondenposition hat kaum Einfluss auf die NO_x -Emissionen.

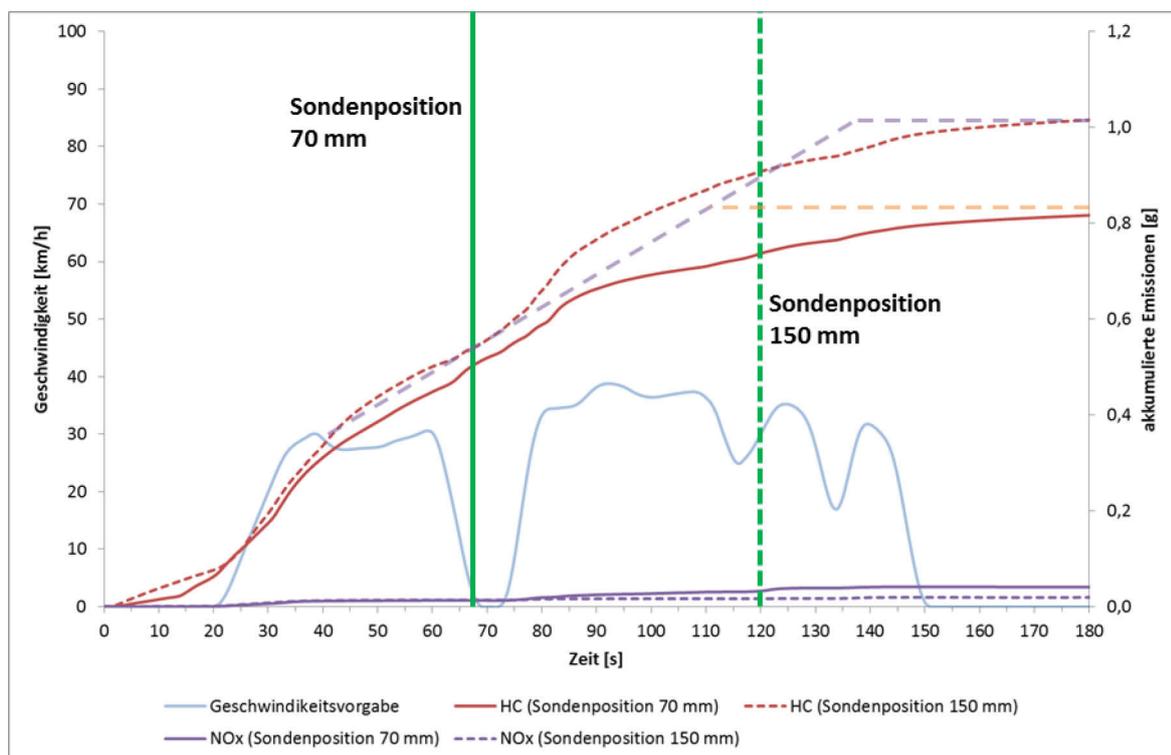


Abbildung 3-39: Auswirkung der Sondenposition auf die HC- und NO_x -Emissionen im Teil 1 des WMTC (0 bis 180 Sekunden)

3.6 Untersuchungen am Rollenprüfstand

Die nachfolgenden Untersuchungen sind am Rollenprüfstand durchgeführt worden. Mit dem Rollenprüfstand kann das transiente Verhalten des Versuchsträgers unter realitätsnahen Bedingungen und damit besser untersucht werden als am Motorprüfstand.

3.6.1 Wandfilmkompensation

Als Wandfilm wird eine Kraftstoffablagerung im Saugrohr verstanden. Wandfilmbildung tritt vor allem bei niedrigen Temperaturen (Kaltstart) und hohen Drücken auf.

In diesem Abschnitt der Diplomarbeit wird die Wandfilmbildung bei Lastwechselfvorgängen untersucht.

Bei Lastwechsel wirkt sich die Wandfilmbildung negativ aus, siehe Abbildung 3-40 und Abbildung 3-41. Durch das schnelle Öffnen der Drosselklappe steigt der Druck im Saugrohr rasch an. Dadurch schlägt sich vermehrt Kraftstoff am Saugrohr nieder und das Luftverhältnis steigt. Das führt zu einem Abmagern des Motors. Das Motorsteuergerät und die Lambdaregelung gleichen das Luftverhältnis erst mit Verzögerung aus.

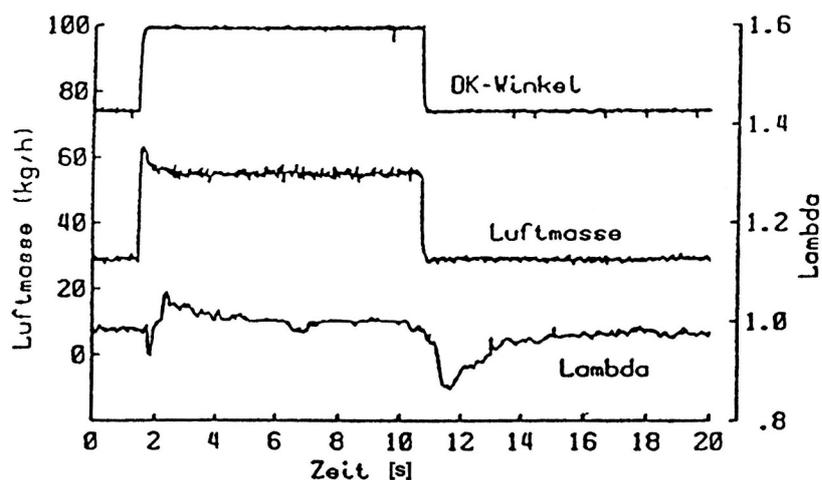


Abbildung 3-40: Änderung des Luftverhältnisses λ im Falle einer Füllungserfassung durch Messung des Luftmassenstroms [2]

Die Abweichung in den mageren Lambda-Bereich führt zu höheren NO_x -Emissionen. Beim raschen Schließen der Drosselklappe tritt der umgekehrte Effekt auf. Durch das fette Gemisch erhöhen sich die CO und HC-Emissionen.

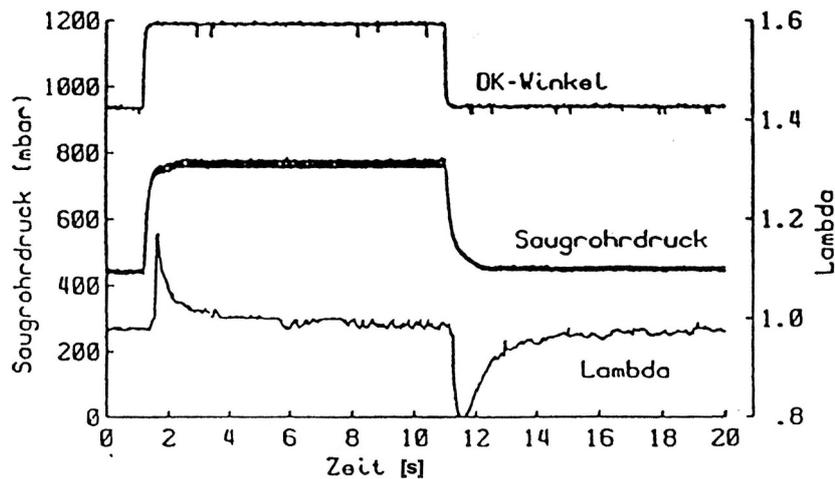


Abbildung 3-41: Änderung des Luftverhältnisses λ im Falle einer Füllungserfassung durch Messung des Saugrohrdrucks [2]

Die Wandfilmkompensation soll den Aufbau beziehungsweise Abbau eines Kraftstofffilms an der Saugrohrinnenseite ausgleichen.

Die Software des Prototypen-Motorsteuergerätes sieht zwei Wege der Wandfilmkompensation vor. Zum einen eine schnelle transiente Berechnung, unter Zuhilfenahme des Korrekturwerts `MFF_ADD_FAST_WF` (MFF mass fuel flow, WF wallfilm). Diese berücksichtigt die Zu- beziehungsweise Abnahme des Luftmassenstroms direkt über die Änderung der Drosselklappenstellung, mittels der Variable `MAF_THR_GRD` (mass air flow gradient at throttle). Zum anderen eine langsame Berechnung der Variable `MFF_ADD_SLOW_WF`, welche die Änderung der Grundkraftstoffmasse `MFF_BAS` (basic mass fuel flow) berücksichtigt. Diese beiden Korrekturwerte werden zum Gesamtkorrekturwert der Wandfilmkompensation `MFF_ADD_WF` addiert. Dieser Wert wird in der Berechnung der Gesamteinspritzmenge berücksichtigt.

In dieser Arbeit ist nur der schnelle Berechnungsweg der Wandfilmkompensation appliziert worden. Die Kennfelder zur langsamen Berechnung sind unverändert geblieben.

Funktionsweise der schnellen Wandfilmkompensation

Das zu applizierende Kennfeld ist eine 8×8 Matrix mit den Eingabeparametern Drehzahl in U/min und Luftmassengradient `MAF_THR_GRD` (mass air flow gradient at throttle) in mg/Zyklus. Der Matrixwert selbst hat ebenfalls die Einheit mg/Zyklus. Das Kennfeld wird in der Variable `IP_MFF_FAST_WF_N_64_MAF_GRD` gespeichert.

Der Luftmassengradient `MAF_THR_GRD` wird wie in Formel 3-6 beschrieben bestimmt.

$$MAF_THR_GRD = MAF_THR_n - MAF_THR_{n-1} \quad \text{Formel 3-6}$$

Der Wert für die Luftmasse `MAF_THR` (mass air flow at throttle) stammt aus dem Kennfeld `IP_MAF_THR_BAS_N_TPS_MAF_THR`. Dieses ist ähnlich zu dem Basiskennfeld `IP_MAF_BAS_MAP_N_PQ_AMP_COR`, welches in Kapitel 3.5.1 behandelt wurde. Als Eingangsparameter wird anstatt des Druckquotienten `PQ_AMP` die

Drosselklappenstellung TPS (throttle position) benutzt. Die Erstellung des Drosselklappenkennfeldes läuft ident wie beim Kennfeld in Kapitel 3.5.1 ab.

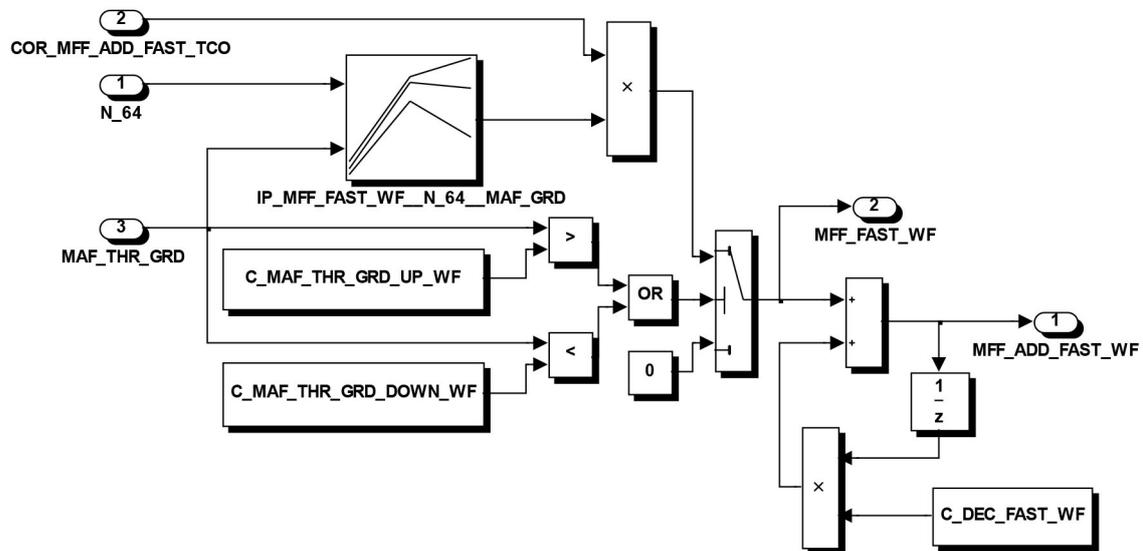


Abbildung 3-42: Flussdiagramm für schnelle Wandfilmkompensation

[16]

Das Flussdiagramm in Abbildung 3-42 zeigt den Ablauf zur zyklischen Berechnung des schnellen Wandfilmkorrekturwertes $MFF_ADD_FAST_WF$. Durch die Eingangsparameter Drehzahl und Luftmassengradient wird der Kennfeldwert der Matrix $IP_MFF_FAST_WF_N_64_MAF_GRD$ bestimmt und mit Hilfe eines Korrekturfaktors für die Motortemperatur ($COR_MFF_ADD_FAST_TCO$) multipliziert. Dieser Wert wird in der Variable MFF_FAST_WF gespeichert. Durch einen Vergleich des Luftmassengradienten MAF_THR_GRD mit zwei Schwellenwerten wird entschieden, ob eine Wandfilmkorrektur durchgeführt werden soll oder nicht. Der obere Schwellenwert wird mit der Variable $C_MAF_THR_GRD_UP_WF$ angegeben. Der untere Schwellenwert mit der Variable $C_MAF_THR_GRD_DOWN_WF$. Beim Öffnen der Drosselklappe kommt der obere Schwellenwert $C_MAF_THR_GRD_UP_WF$ zum Tragen. Beim Schließen der Drosselklappe begrenzt hingegen der untere Schwellenwert $C_MAF_THR_GRD_DOWN_WF$. Die dimensionslose Abklingkonstante $C_DEC_FAST_WF$ (constant for fast wallfilm decay) sorgt für die definierte Rücknahme der schnellen Wandfilmkorrektur nach Formel 3-7.

$$\begin{aligned}
 MFF_ADD_FAST_WF_n &= \\
 &= MFF_ADD_FAST_WF_{n-1} \cdot C_DEC_FAST_WF \\
 &+ MFF_FAST_WF
 \end{aligned}$$

Formel 3-7

Messablauf und Applizierung

Die Messungen für die Wandfilmkorrektur ausgehend vom Leerlauf des Motors durchgeführt worden. Dabei sind die folgenden Parameter aufgezeichnet worden: die Drehzahl n , der Luftmassengradient MAF_THR_GRD und die Luftzahl λ . Die Parameter sind zeitgleich grafisch in der Applikationssoftware *INCA* dargestellt worden.

Während der Aufzeichnungen ist die Drosselklappe mit unterschiedlicher Geschwindigkeit geöffnet und geschlossen worden. Die Werte im Korrekturkennfeld `IP_MFF_FAST_WF_N_64_MAF_GRD` sind dann nach jedem Durchgang angepasst worden. In einem ersten Schritt ist somit das Abmagern des Motors beim Öffnen der Drosselklappe verhindert worden. Gleichzeitig ist so das Anfetten des Motors beim Schließen der Drosselklappe unterbunden worden. In einem zweiten Schritt ist eine leichte Anfettung beim Öffnen der Drosselklappe realisiert worden, um so ein besseres Ansprechverhalten bei Beschleunigungsvorgängen zu erhalten.

3.6.2 Motorstart und Motorwarmlauf

Um den Ablauf beim Motorstart und während des Motorwarmlaufs zu applizieren, ist es notwendig, die Vorgänge im Steuergerät in dieser Betriebsphase genauer zu untersuchen. In Abbildung 3-43 ist der Ablauf vom Start bis hin zum normalen Betrieb des Motors abgebildet.

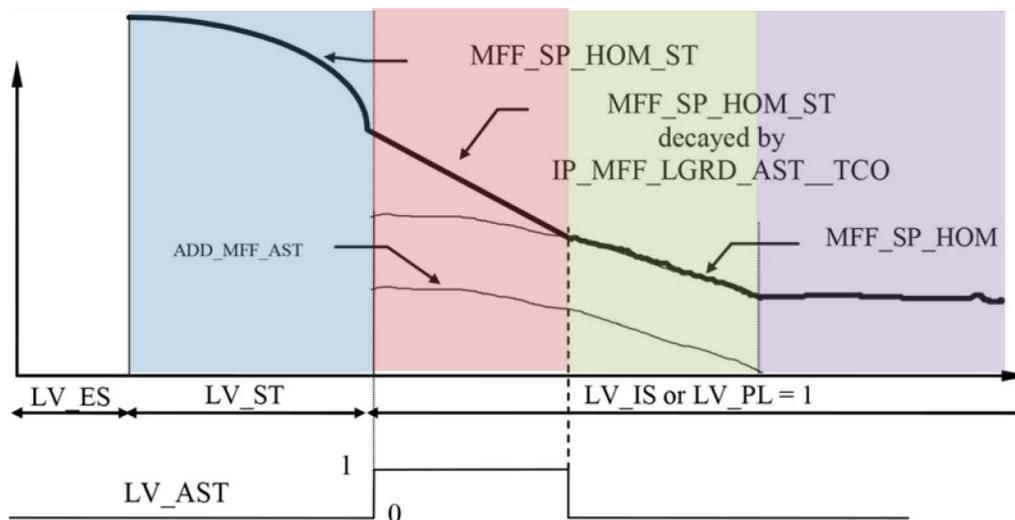


Abbildung 3-43: Flussdiagramm zur Berechnung der Einspritzmenge bei Motorstart und Warmlauf [16]

Beim Einschalten der Zündung wird der Motorbetriebsstatus `LV_ES` (logical variable engine stopped) auf den Wert eins gesetzt. Zum selben Zeitpunkt wird der Status von `LV_AST` (Logical Variable After Start) auf null gesetzt (weiß markierter Bereich in Abbildung 3-43).

Durch Betätigen des Startschalters wird eine bestimmte Kraftstoffmenge `MFF_SP_HOM_ST` (mass fuel flow set point homogeneous for start conditions) in den Ansaugtrakt injiziert. Diese Kraftstoffmenge, angegeben in mg/Zyklus, soll einen zuverlässigen Start des Motors unter allen Umgebungsbedingungen sicherstellen. Zeitgleich mit der Einspritzung wird auch der Starter angesprochen, der den Motor antreibt. Durch das Detektieren der Motordrehzahl wird der Wert `LV_ES` auf null und gleichzeitig der Wert `LV_ST` (logical variable motor start) auf eins gesetzt (blau markiert).

Die Kraftstoffmenge `MFF_SP_HOM_ST` setzt sich aus zwei Werten zusammen (Formel 3-8).

$$MFF_SP_HOM_ST = MFF_CST \cdot FAC_ST_REST$$

Formel 3-8

Der erste ist die Start-Kraftstoffmenge MFF_CST in mg/Zyklus und der zweite ist der dimensionslose Neustartfaktor FAC_ST_REST (re-start correction factor). MFF_CST wird mit einem Kennfeld bestimmt, welches die Eingangsparameter Motortemperatur TCO (coolant temperature) und die Drehzahl besitzt. FAC_ST_REST ist nur von der Motortemperatur TCO abhängig.

Sobald das Motorsteuergerät den Motorstart erkannt hat, wird der Modus LV_AST (logical value after start) aktiviert. In diesem Modus wird die zuvor genannte Einspritzmenge $MFF_SP_HOM_ST$ mit dem motortemperaturabhängigen Faktor $IP_MFF_LGRD_AST_TCO$ (injection time change limitation after-start) reduziert, siehe die rote Markierung in Abbildung 3-43. Durch diesen Vorgang wird ein Übergang zur last- und drehzahlgeregelten Einspritzmengenberechnung geschaffen. Nach dem Übergang wird die Variable LV_AST wieder auf null gesetzt.

In die Einspritzmengenberechnung mit Last- und Drehzahlregelung fließt anfangs noch der Faktor ADD_MFF_AST (Add Mass Fuel Flow After Start) ein (grün markierter Bereich). Dieser beeinflusst die Zyklen 0 bis 2000 und ist von der Motortemperatur TCO (coolant temperature) und von der Anzahl der Zyklen CYC_CAST (cycle counter during start and after start), die der Motor seit Motorstart durchlaufen hat, abhängig.

Ist der Einfluss des Faktors ADD_MFF_AST abgeklungen, fließt nur mehr ein Warmlaufkorrekturfaktor in die Einspritzmengenberechnung ein. Dieser Einfluss findet bis zu einer vordefinierten Motortemperatur (hier 80 °C, betriebswarmer Motor) statt (violett markierter Bereich). Dabei ist der Warmlaufkorrekturfaktor von der Motorstarttemperatur TCO_ST (Coolant Temperature Start), der aktuellen Motortemperatur TCO (Coolant Temperature), dem Mittelwert der angesaugten Luftmasse MAF_MV (Mass Air Flow) und der Drehzahl abhängig.

Funktionsweise der Warmlaufkorrektur im Motorsteuergerät

Die Warmlaufkorrektur, wie sie von der Firma *Synerject* im Motorsteuergerät vorgesehen worden ist, setzt sich grundsätzlich aus drei Parametern zusammen. Der erste Faktor ist der Warmlaufkorrekturwert MFF_WUP_COR (Warm-up correction factor for Mass Fuel Flow), der die erhöhte Kraftstoffmenge während des Warmlaufens berücksichtigt. Der zweite Faktor ist der Wert $LAMB_BAS_WUP_COR$ (Basic lambda warm-up correction). Mit diesem kann eine Verschiebung des Lambdapunkts während der Warmlaufphase definiert werden. Diese Verschiebung wird relativ zum Lambdawert beim betriebswarmen Motor angegeben. Die dritte Variable $LAMB_WUP_TOL$ (Lambda Warmup Tolerance) gibt die Begrenzung des Lambdawertes an.

Die beiden Korrekturfaktoren MFF_WUP_COR und $LAMB_BAS_WUP_COR$ werden jeweils aus zwei Kennfeldern bestimmt. In Abbildung 3-44 ist die Zusammensetzung dargestellt. Hier ist auch zu sehen, dass jeweils zwei der Kennfelder von den gleichen Eingabeparametern beeinflusst werden.

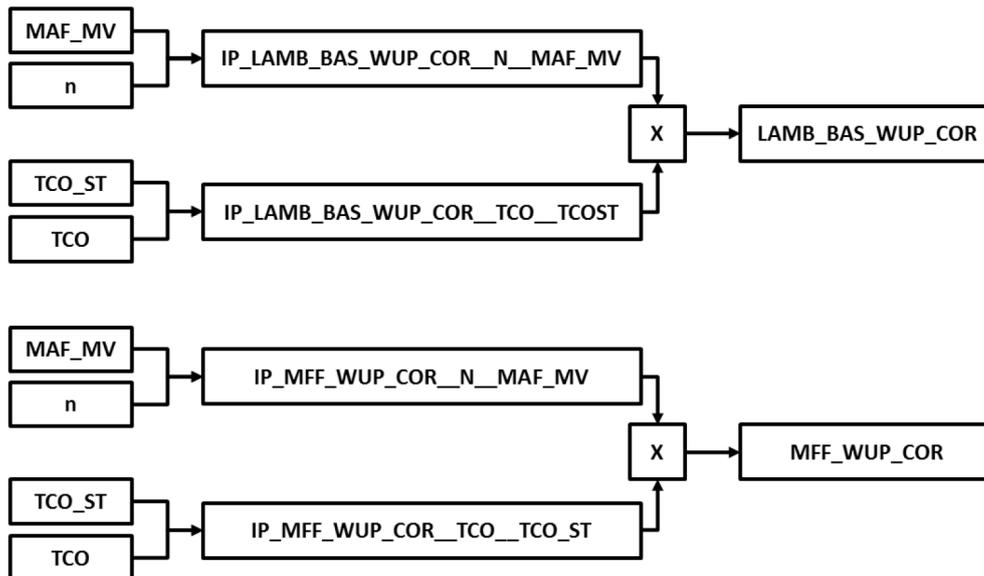


Abbildung 3-44: Zusammensetzung der Warmlaufkorrektur und Lambdaverschiebung

Die Kennfelder $IP_LAMB_BAS_WUP_COR_N_MAF_MV$ und $IP_MFF_WUP_COR_N_MAF_MV$ sind vom Mittelwert der angesaugten Luftmasse MAF_MV (mass air flow mean value) und der Drehzahl n abhängig.

Die Kennfelder $IP_LAMB_BAS_WUP_COR_TCO_TCOST$ und $IP_MFF_WUP_COR_TCO_TCO_ST$ sind von der Motorstarttemperatur TCO_ST (coolant temperature at engine start) und der aktuellen Motortemperatur TCO (coolant temperature) abhängig.

Messablauf

Die Messungen des Warmlaufs sind bei Leerlauf durchgeführt worden. Dabei lagen die Starttemperaturen zu Beginn der Messungen bei circa $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ (entspricht der Raumtemperatur im Prüfraum). Zusätzlich sind zwei Messabläufe in der Kältekammer des Instituts durchgeführt worden. Dafür ist die Umgebungstemperatur auf $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ abgesenkt worden.

Während des Warmlaufes sind die in Tabelle 3-10 aufgeführten Variablen gemessen worden.

Tabelle 3-10: Messvariablen für Motorwarmlauf

Variable	Bezeichnung	Einheit
MFF_BAS	Basiskraftstoffmenge für homogene Verbrennung	mg/Zyklus
LAMB_SP	Lambdabetriebspunkt	-
MFF_WUP_COR	Warmlaufkorrektur	-
TI_LAM_COR	Lambdakorrektur	%
ADD_MFF_AST	Wandfilmkorrektur	-
MFF_SP_HOM_ENG	Berechnete Basiskraftstoffmenge	mg/Zyklus

Berechnung des Warmlaufkorrekturfaktors

Aus den aufgezeichneten Daten ist im Anschluss der Sollwert des Warmlaufkorrekturwertes MFF_WUP_COR , mithilfe der Formel 3-9, berechnet worden.

$$MFF_WUP_COR_{Soll} = \frac{MFF_SP_HOM_ENG}{MFF_BAS \left(\frac{1}{LAMB_SP} + TI_LAM_COR \right)} - ADD_MFF_AST - 1 \quad \text{Formel 3-9}$$

Da sich MFF_WUP_COR mit der Zeit ändert, ist ein Mittelwert für einen definierten Bereich ermittelt worden. Dieser Bereich erstreckt sich vom Zeitpunkt, bei dem LV_AST wieder auf null gesetzt worden ist, bis zum Regelbeginn der Lambdasonde.

Wie vorher erwähnt worden ist, wird MFF_WUP_COR aus zwei Kennfeldern berechnet und ist somit selbst nicht direkt in einem Kennfeld hinterlegt. In einem ersten Schritt ist das Kennfeld $IP_LAMB_BAS_WUP_COR_N_MAF_MV$, dass die Abhängigkeit der Drehzahl und der mittleren Luftmasse berücksichtigt, konstant gesetzt worden. Das heißt, es sind die Werte der Basisbedatung benutzt worden. In einem zweiten Schritt ist das Kennfeld, dass die Motorstarttemperatur und die aktuelle Motortemperatur als Parameter hat, angepasst worden.

Dazu sind bei den Stützstellen der Motortemperatur TCO (coolant temperature), im Bereich von $\pm 2^\circ\text{C}$, Mittelwerte aus dem Sollwert und dem Istwert von MFF_WUP_COR gebildet worden. Diese Mittelwerte sind anschließend mit der Formel 3-10 ins Verhältnis $C_{m,i}$ gesetzt worden.

$$C_{m,i} = \frac{MFF_WUP_COR_{m,soll}}{MFF_WUP_COR_{m,ist}} \quad \text{Formel 3-10}$$

Die Stützstellen im Kennfeld $IP_LAMB_BAS_WUP_COR_TCO_TCOST$ sind nun mit diesem Faktor $C_{m,i}$ multipliziert worden. Durch diesen Vorgang ist das Kennfeld an den Motor angepasst worden. Dabei ist immer zu beachten, dass diese Anpassung nur bei derjenigen Motorstarttemperatur TCO_ST (coolant temperature start) angewendet werden darf, die der realen Starttemperatur am Prüfstand entspricht.

Es wäre auch möglich gewesen, den Wert mithilfe des Kennfeldes $IP_LAMB_BAS_WUP_COR_N_MAF_MV$ zu berechnen. Dennoch ist der Ansatz mit dem Verhältnis $C_{m,i}$ gewählt worden, weil sich dieser in der Auswertungssoftware *MDA* (measure data analyzer) besser automatisieren lässt.

Danach sind die neuen Einstellungen am Rollenprüfstand überprüft worden. Dabei hat sich herausgestellt, dass das vom Hersteller vordefinierte Kennfeld für Drehzahl und Luftmasse ($IP_LAMB_BAS_WUP_COR_N_MAF_MV$) bereits gut mit dem realen Motorverhalten übereingestimmt hat.

Applikation der Einspritzmenge nach Motorstart

Abschließend ist der Bereich, der durch ADD_MFF_AST beeinflusst wird, angepasst worden. Da der Motor in dieser Phase, aufgrund von ADD_MFF_AST im fetten Bereich $\lambda < 1$ betrieben worden ist, sind viele HC- und CO-Emissionen entstanden, die der Katalysator nicht oxidieren konnte.

Um den HC- und CO-Ausstoß zu verringern, ist der Einflussbereich von ADD_MFF_AST von circa 2000 Zyklen auf 1400 Zyklen reduziert worden. Es ist dabei auch die Einspritzmenge, die durch diesen Parameter beeinflusst wird, reduziert worden.

Überprüfungen am Rollenprüfstand und in der Kältekammer haben keine negativen Einflüsse auf das Startverhalten des Motors gezeigt. Durch den mageren Betrieb im Vergleich zum nicht angepassten Kennfeld, sind so weniger HC-Emissionen emittiert worden.

Einfluss der Warmlaufkorrektur

In Abbildung 3-45 ist der Verlauf des Verbrennungsluftverhältnisses für die ersten 180 Sekunden im ersten Teil des WMTC abgebildet. Dabei sind die Werte des nicht korrigierten und des korrigierten Warmlaufes gegenübergestellt. Der korrigierte Warmlauf ist mit einer orangen durchgezogenen Linie markiert. Der nicht korrigierte Warmlauf hingegen mit einer roten gestrichelten Linie. Beide Messungen sind mit einem beschichteten Katalysator durchgeführt worden. Da sich der relevante Bereich jedoch vor dem Light-off des Katalysators befindet, können trotzdem Tendenzen abgelesen werden.

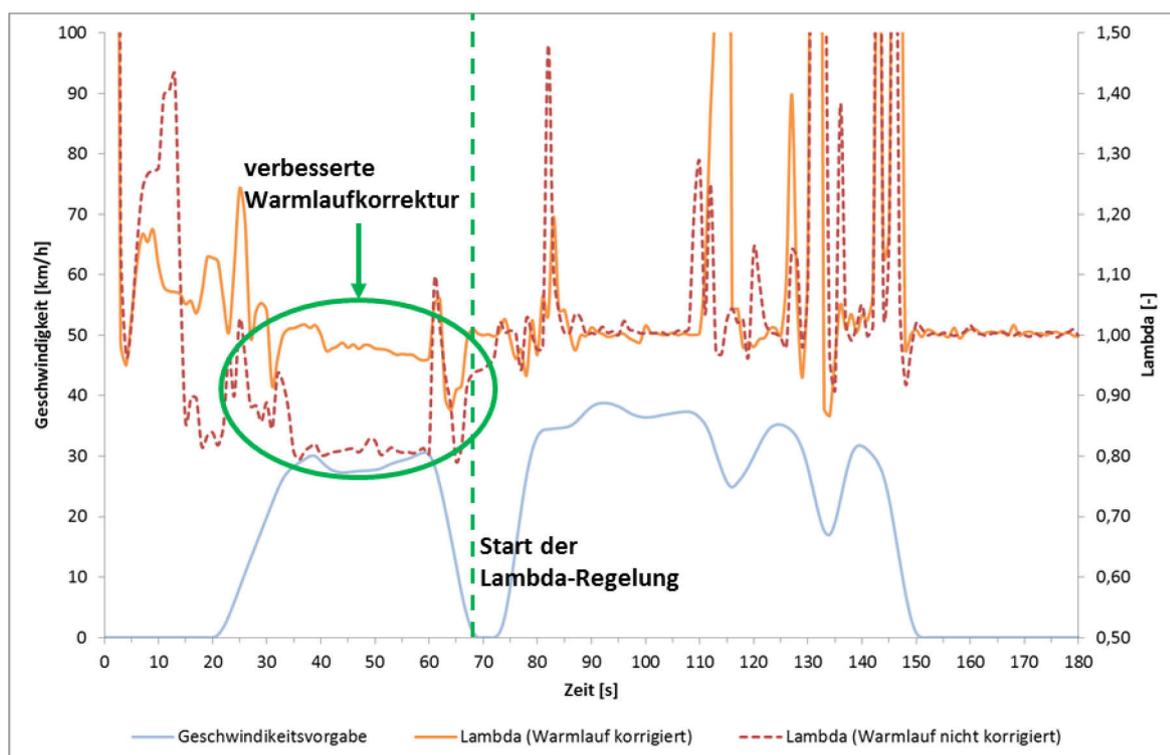


Abbildung 3-45: Auswirkung der Warmlaufkorrektur auf den Lambdabetriebspunkt im Teil 1 des WMTC (0 bis 180 Sekunden)

Im Bereich zwischen ungefähr 20 und 65 Sekunden ist das Luftverhältnis stark angehoben worden. Kurz nach dem Motorstart befindet sich der Motor im mageren Lambda-Bereich. Er wird jedoch bei der ersten Beschleunigungsphase in den fetten Bereich versetzt. Ab dem Start der Lambda-Regelung bei circa 65 Sekunden sind keine nennenswerten Unterschiede, die auf die Warmlaufkorrektur zurückzuführen wären, festzustellen.

In Abbildung 3-46 sind die Auswirkungen des Warmlaufes auf die CO-Emissionen, im ersten Teil des *WMTC* dargestellt. Der Emissionsverlauf ist hierbei akkumuliert aufgetragen.

Hier ist der stark unterschiedliche Anstieg der CO-Emissionen zu sehen (orange und violett gestrichelte Linie zeigen Tendenz). Durch den Betrieb des Motors mit einem Verbrennungsluftverhältnis von nahe $\lambda = 1$ (korrigierter Warmlauf) ist der Ausstoß von CO stark gesunken. Ab ungefähr 68 Sekunden tritt die Lambda-Regelung in Kraft. Ab diesem Zeitpunkt sind keine Unterschiede, die auf den Warmlauf zurück zuführen sind, erkennbar.

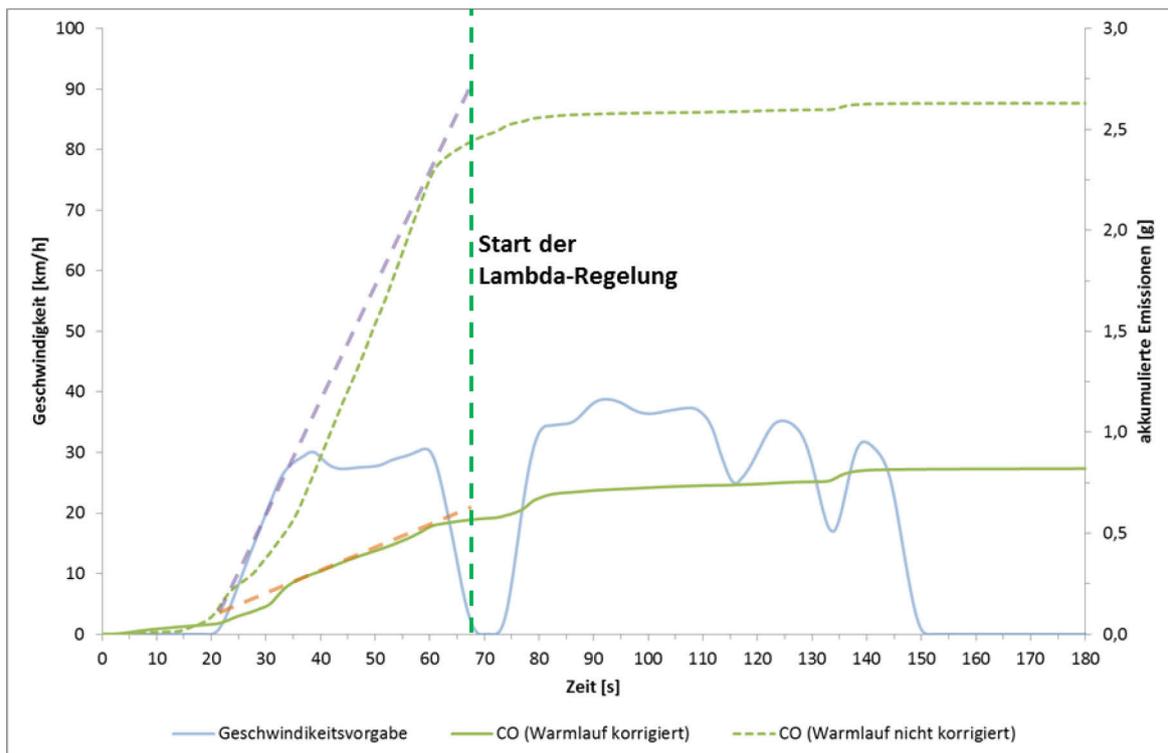


Abbildung 3-46: Auswirkung der Warmlaufkorrektur auf die CO-Emissionen im Teil 1 des WMTC (0 bis 180 Sekunden)

Abbildung 3-47 zeigt die akkumulierten Emissionsverläufe von HC und NO_x . Während bei NO_x kaum Unterschiede zu erkennen sind, zeigt sich bei HC eine Verbesserung durch den korrigierten Warmlauf. Bis zum Einsetzen der Lambda-Regelung werden bei korrigiertem Warmlauf etwas weniger HC emittiert, dies zeigt sich durch die geringere Steigung des HC-Emissionsverlaufes. Ab dem Start der Lambda-Regelung sind keine Unterschiede zwischen korrigierten und unkorrigierten Warmlauf zu erkennen.

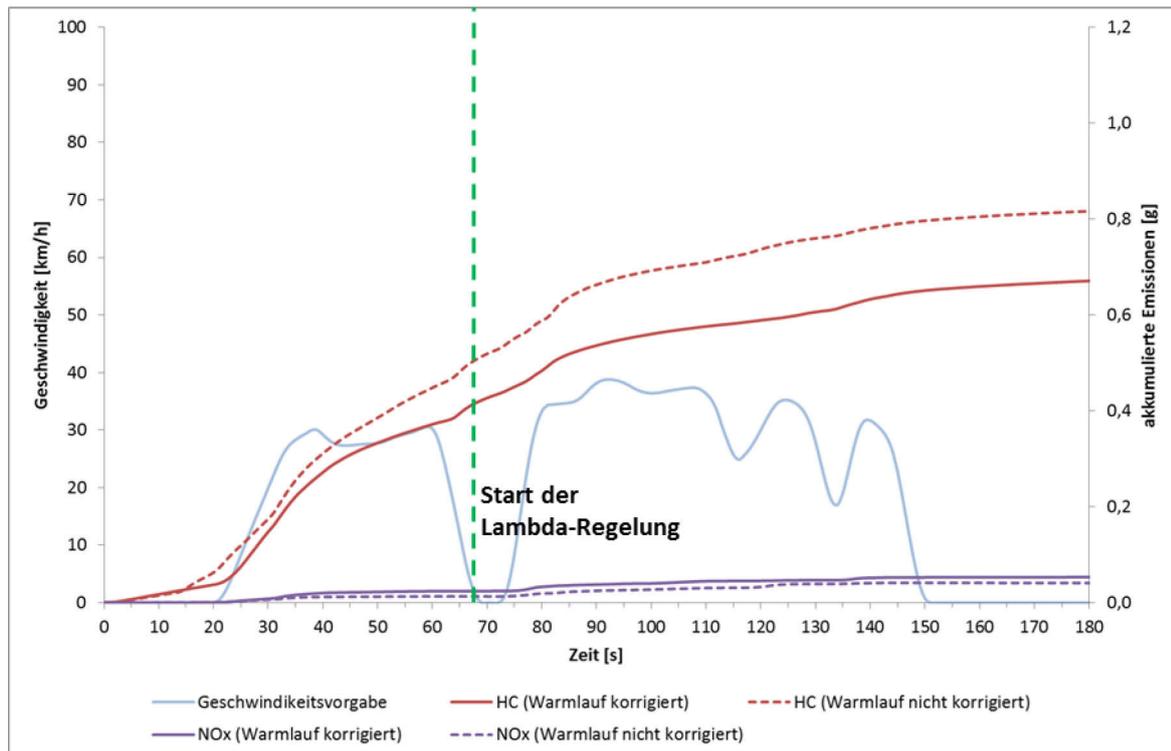


Abbildung 3-47: Auswirkung der Warmlaufkorrektur auf die HC- und NO_x-Emissionen im Teil 1 des WMTC (0 bis 180 Sekunden)

3.7 Katalysatoren

Durch innermotorische Methoden ist es kaum möglich, die Rohemissionen von HC, CO und NO_x auf das Niveau der erlaubten europäischen Grenzwerte zu reduzieren. Es ist somit ein Abgasnachbehandlungssystem zu verwenden. Beim Ottomotor wird dies durch einen Drei-Wege-Katalysator realisiert.

In Tabelle 3-11 sind die unterschiedlichen Drei-Wege-Katalysatoren, die in dieser Diplomarbeit untersucht worden sind, aufgeführt. Es sind alle Katalysatoren, sowie der unbeschichtete Metallträger, vom deutschen Hersteller *Heraeus* zur Verfügung gestellt worden.

Tabelle 3-11: Übersicht der vermessenen Drei-Wege-Katalysatoren

Charge	Typ	Abmessungen	Zellenanzahl	Washcoat
-	Metallwabe unbeschichtet	Ø 45 x 90 mm	400 cpsi	-
13 1320	25,0 g/ft ³ PT:RH/1:1	Ø 45 x 90 mm	400 cpsi	
13 1717	37,5 g/ft ³ PT:RH/1:1	Ø 45 x 90 mm	400 cpsi	13 1320 + 50%
13 1718	33,0 g/ft ³ PT:RH/1:1	Ø 45 x 90 mm	400 cpsi	13 1488 (100 g/l)

Der Katalysator 13 1320 besitzt laut Firma *Heraeus* einen Standard Washcoat für Anwendungen mit Drei-Wege-Katalysator. Im Katalysator 13 1717 kommt eine Wabe mit 50 % mehr Washcoat zum Einsatz. Dies bedeutet eine höhere Konzentration von Edelmetallen und somit einen größeren Sauerstoffspeicher. Der Typ 13 1718 besitzt andere Washcoat-Komponenten und der Anteil an Edelmetallen ist etwas höher als beim Modell 13 1320.

Da diese Katalysatoren komplett fabrikneu gewesen sind, sind sie einer Einlaufphase unterzogen worden. Katalysatoren müssen eine gewisse Alterung (vergleiche Kapitel 2.2.5) erfahren haben, damit stabile Messergebnisse von Messung zu Messung gewährleistet werden können. Die Einlaufphase ist mit vier *WMTC*-Zyklen (*World Harmonized Motorcycle Test Cycle*) definiert worden. Die Messdaten des fünften Zyklusdurchgangs sind für die Auswertung herangezogen worden.

Um die Katalysatoren während der Applikationsarbeiten nicht zu beschädigen, ist ein unbeschichteter Rohling in den gleichen Abmaßen und mit gleicher Zellenanzahl verwendet worden. Dieser erzeugt den gleichen Abgasgedruck wie die beschichteten Katalysatoren und garantiert dadurch gleiche Bedingungen im Auspuff.

4 Ergebnisse der Abgasemissionsmessungen

In Abbildung 4-1 sind die Ergebnisse der Rollenmessung für den unbeschichteten Katalysator (Rohemissionen) abgebildet. Dabei sind die einzelnen Abgaskomponenten akkumuliert und auf den Euro 4 Grenzwert normiert dargestellt. Dieser Darstellung zeigt zu welchem Zeitpunkt der Emissionsgrenzwert für die jeweilige Abgaskomponente überschritten wird.

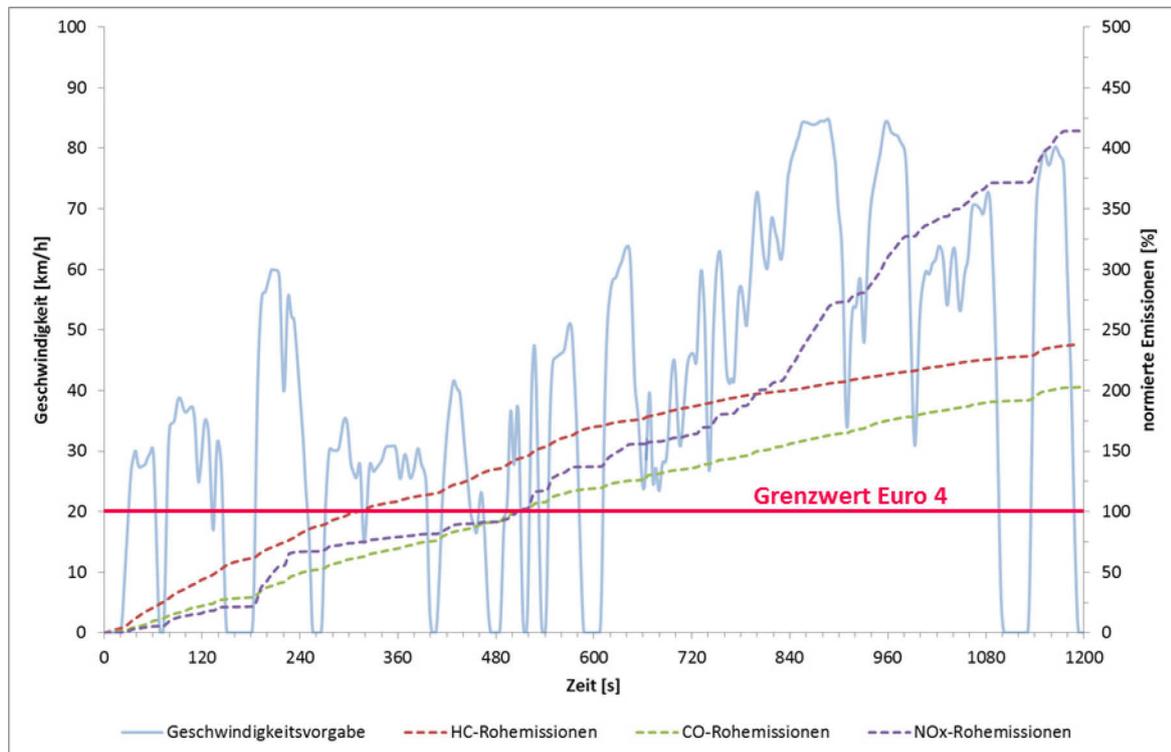


Abbildung 4-1: Normierte Roh-Emissionen (Grenzwerte Euro 4) beim WMTC 2.1

In der Abbildung ist zu erkennen, dass beim Versuchsträger die Euro 4 Grenzwerte ohne Katalysator nicht eingehalten werden können. Im gesamten Testzyklus werden die Grenzwerte für HC um 138%, für CO um 102 % und für NO_x um 314 % überschritten. Weiters ist zu erkennen das die Grenzwerte bereits im ersten Teil des Zyklus erreicht werden. Die HC-Emissionen steigen über den gesamten Zyklus annähernd konstant an. Die CO und NO_x-Anteile steigen vor allem im zweiten Teil des Testzyklus an. Der CO-Anstieg ist durch den fetteren Betrieb des Motors in den Beschleunigungsphasen zu erklären. Durch den Betrieb unter $\lambda = 1$ steht zu wenig Sauerstoff zur vollständigen Verbrennung zur Verfügung. Der NO_x-Ausstoß erhöht sich durch die höhere Motorlast und die höhere Drehzahl. Durch die hohe Motorlast werden mehr NO_x pro Zyklus produziert. Durch die höhere Drehzahl steigt auch der Abgasstrom an, den die offene CVS-Anlage absaugt. Somit wird auch das Verhältnis des angesaugten Gasstromes verändert.

4.1 Ergebnisse des Katalysators 13 1320

In Abbildung 4-2 sind die Ergebnisse der Rollenmessung für den Katalysator 13 1320 abgebildet.

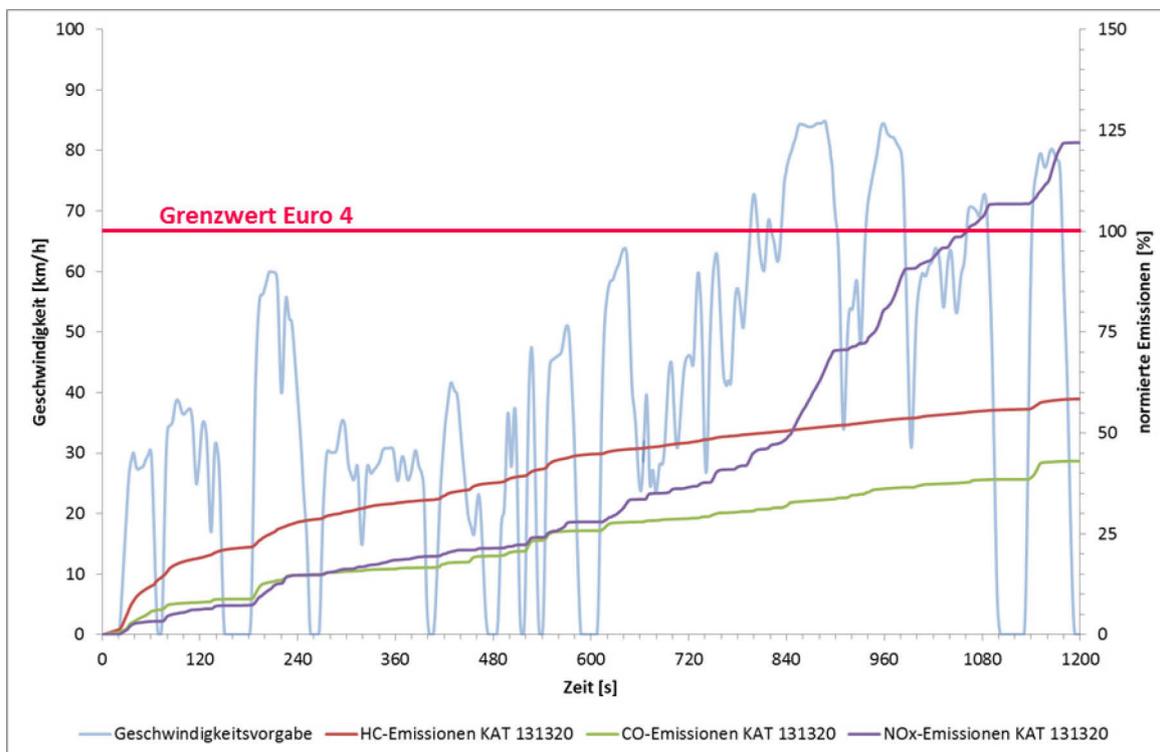


Abbildung 4-2: Normierte Emissionen (Grenzwerte Euro 4) beim WMTC 2.1 mit Katalysator 13 1320

Mit diesem Katalysator können die Grenzwerte für HC und CO eingehalten werden. Die Endwerte für HC liegen 42 % und für CO 57 % unter dem vorgeschriebenen Grenzwert. NO_x liegt jedoch 22 % über dem Grenzwert.

Ein großer Teil der emittierten HC-Emissionen (10 % vom Grenzwert) entstehen in den ersten 40 Sekunden. In diesem Bereich hat der Katalysator die Light-off Temperatur noch nicht erreicht und die HC-Emissionen werden nahezu unkonvertiert ausgestoßen. In den restlichen 1140 Sekunden werden 48 % des Grenzwertes emittiert. Bei den Beschleunigungsphasen werden aufgrund des fetteren Verbrennungsluftverhältnisses höhere HC-Konzentrationen ausgestoßen. Dies ist im Diagramm an den Knickpunkten der roten Linie zu erkennen.

Bis zum Light-off der Abgaskomponente CO (bei ungefähr 50 Sekunden) werden circa 6 % des Grenzwertes ausgestoßen. Auch bei CO sieht man höhere Ausstöße in den Beschleunigungsphasen. Gleich wie bei HC ist hier das fettere Verbrennungsluftverhältnis, dass zu einer unvollständigen Verbrennung führt, verantwortlich.

Bei NO_x zeigt sich eine anderes Bild als bei HC und CO. NO_x wird vor allem bei hohen Motorlasten und hoher Drehzahl emittiert. Dies ist im zweiten Teil des Testzyklus erkennbar. Im zweiten Teil des WMTC werden 94 % des Grenzwertes ausgestoßen, während im ersten Teil nur 28 % emittiert werden.

In Abbildung 4-3 bis Abbildung 4-5 sind die Konvertierungsraten für die Abgaskomponenten HC, CO und NO_x dargestellt. Die Konvertierungsrate für jede einzelne Komponente ergibt sich aus dem Verhältnis der Rohabgase zur Konzentration bei Verwendung eines Katalysators. Zum Verlauf der Konvertierungsrate ist auch der jeweilige Mittelwert der Konvertierungsrate vom Light-off bis zum Zyklusende angegeben.

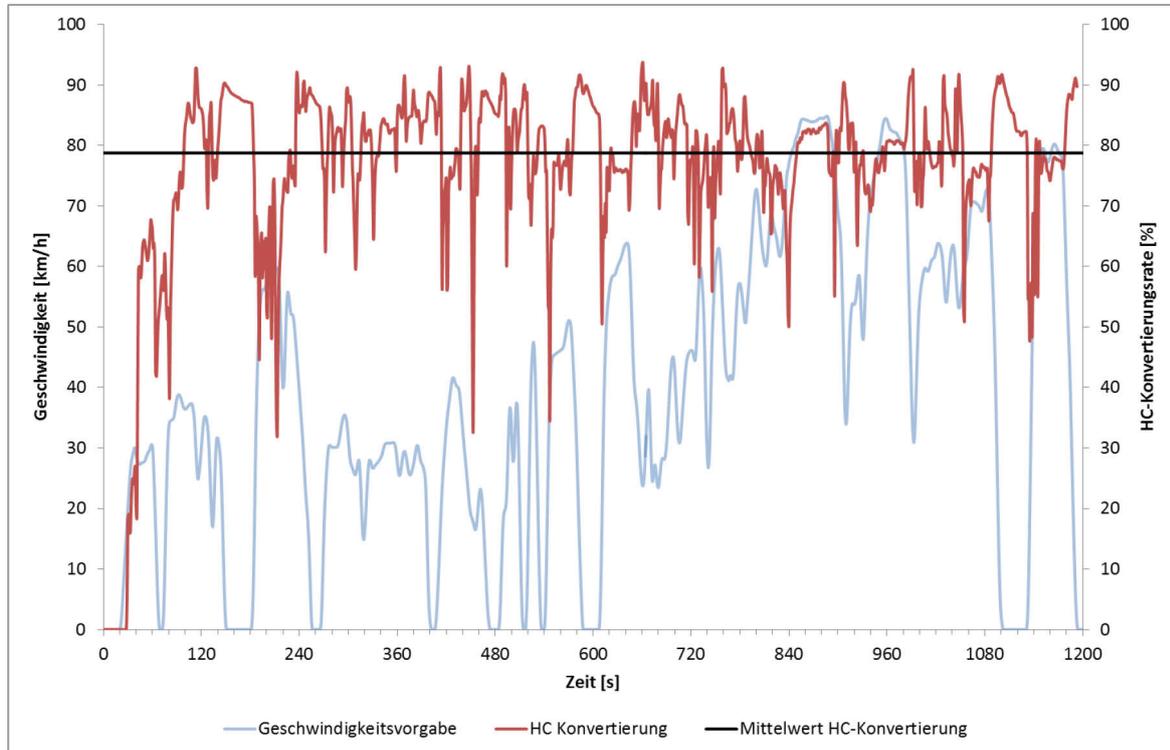


Abbildung 4-3: Konvertierungsrate von HC des Katalysator 13 1320 beim WMTC 2.1

In Abbildung 4-3 ist die Konvertierungsrate für HC dargestellt. Die Light-off Temperatur wird hier bei ungefähr 40 Sekunden erreicht. Der Light-off ist mit Erreichen einer Konvertierungsrate von 50 % definiert (vergleiche Kapitel 2.2.5). Bis zum Erreichen der Light-off-Temperatur werden die Emissionen nahezu unkonvertiert emittiert. Nach dem Light-off wird eine durchschnittliche Konvertierungsrate von 78 % erreicht.

In Abbildung 4-4 ist die Konvertierungsrate von CO zu sehen. Bei der Abgaskomponente CO findet der Light-off bei 50 Sekunden statt. Danach liegt die mittlere Konvertierungsrate bei 86 %

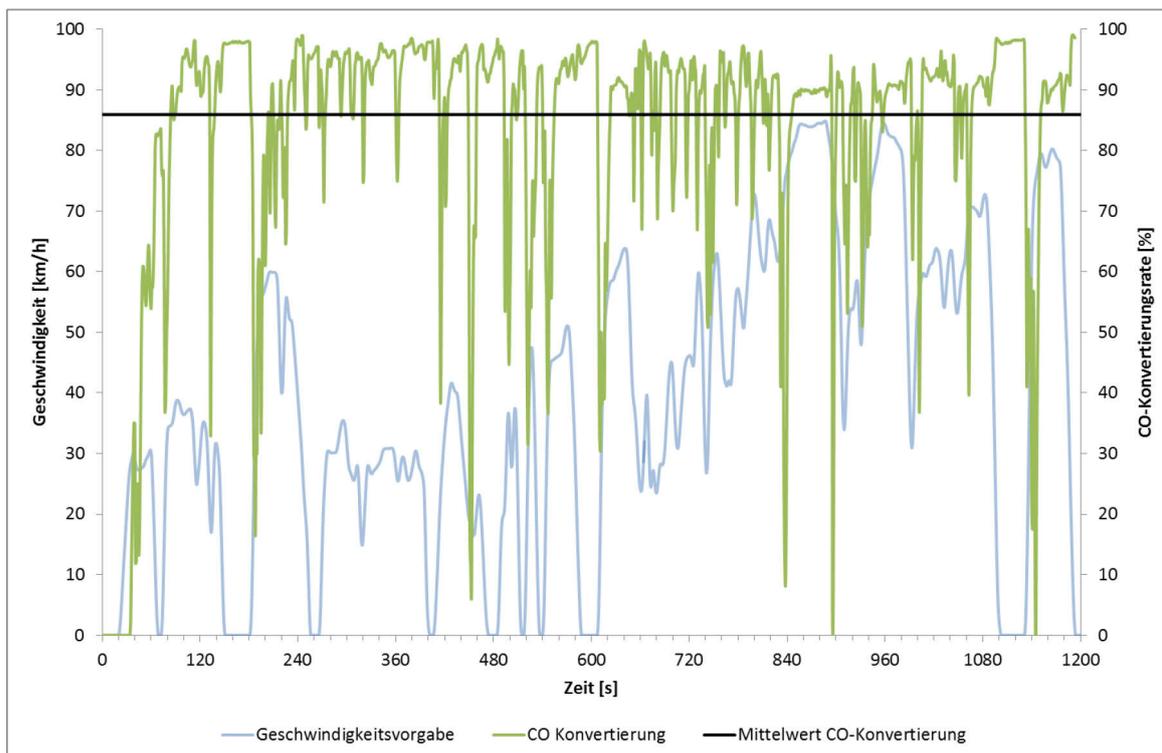


Abbildung 4-4: Konvertierungsrate von CO des Katalysator 13 1320 beim WMTC 2.1

Bei den NO_x -Emissionen können nach dem Light-off Konvertierungsraten von durchschnittlich 71 % erreicht werden, siehe Abbildung 4-5. Der Light-off findet für diese Abgaskomponente bei 42 Sekunden statt.

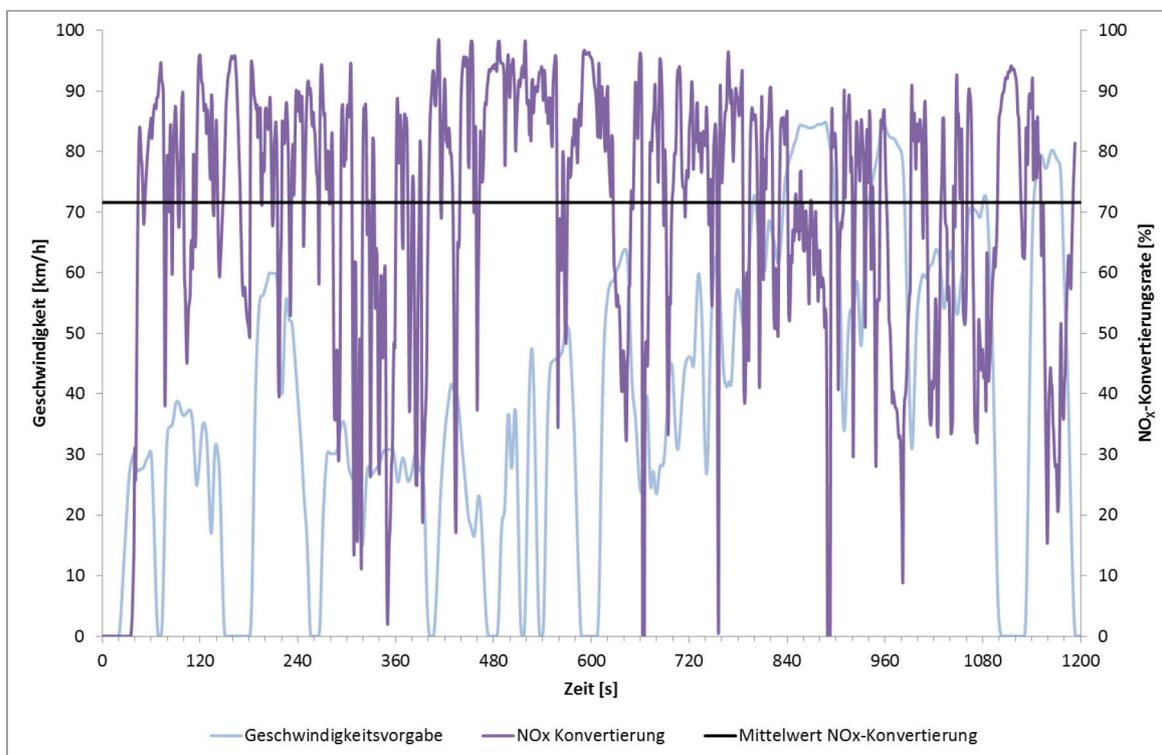


Abbildung 4-5: Konvertierungsrate von NO_x des Katalysator 13 1320 beim WMTC 2.1

4.2 Ergebnisse des Katalysators 13 1717

In Abbildung 4-6 sind die Ergebnisse der Abgasemissionsmessung des Katalysators 13 1717 abgebildet.

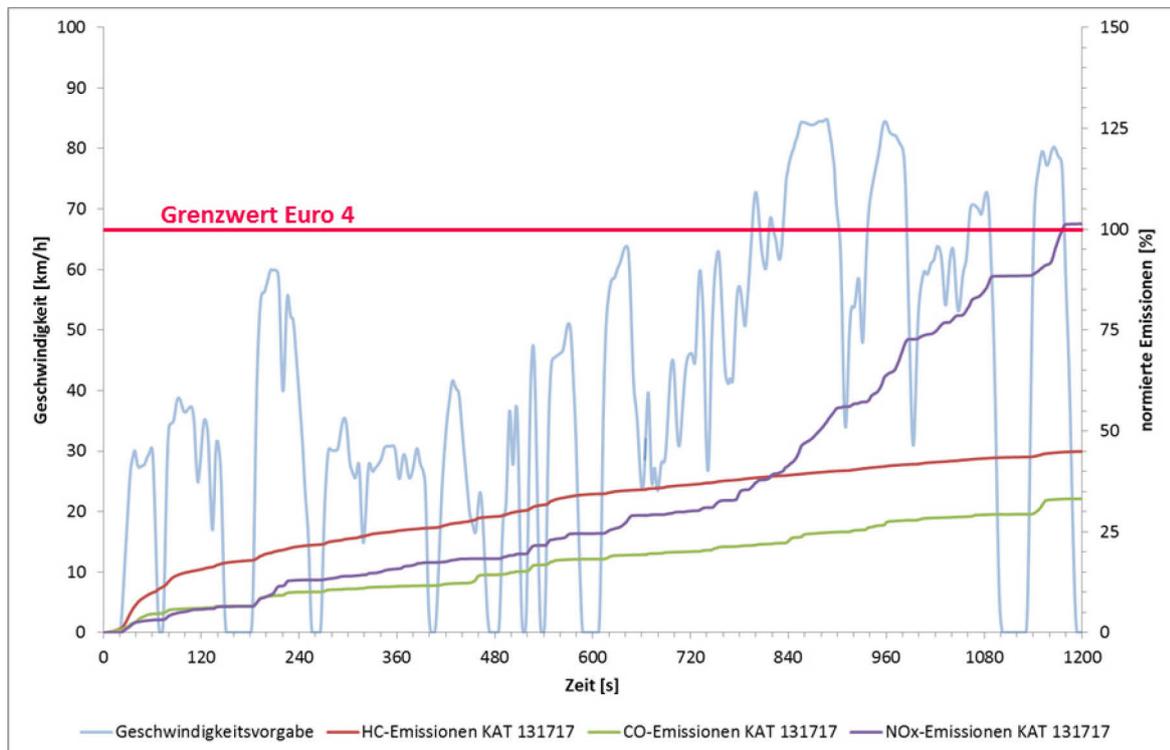


Abbildung 4-6: Normierte Emissionen (Grenzwerte Euro 4) beim WMTC 2.1 mit Katalysator 13 1717

Wie zu sehen ist können auch mit diesem Katalysator die Grenzwerte für HC und CO eingehalten werden. Die Grenzwerte werden um 55 % für HC und um 47 % für CO unterschritten. Der NO_x -Grenzwert wird mit diesem Katalysator knapp nicht erreicht. Der Endwert übersteigt den Grenzwert um 1 %.

Durch den größeren Washcoat und die höhere Edelmetallkonzentration kann dieser Katalysator mehr Sauerstoff speichern. Dies wirkt sich positiv auf die Konvertierung von HC und CO aus. Somit sind niedrigere Endwerte der Emissionen, als bei Katalysator 13 1320 möglich. Die Eigenschaften der Beschichtung zeigen auch bei NO_x Verbesserungen. Hier werden im Vergleich circa 20 % vom Grenzwert weniger emittiert.

Die Unterschiede beim Washcoat und der Beschichtung zeigen sich auch bei den Konvertierungsraten, die in Abbildung 4-7 bis Abbildung 4-9 zu sehen sind.

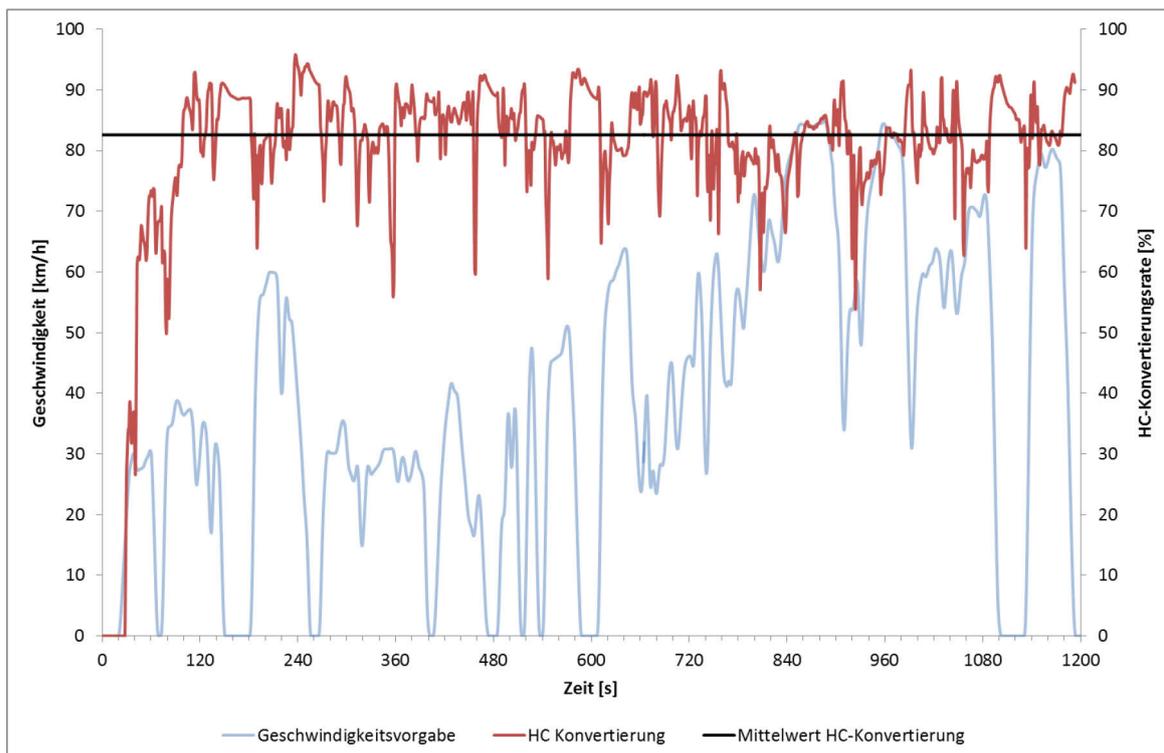


Abbildung 4-7: Konvertierungsrate von HC des Katalysator 13 1317 beim WMTC 2.1

Die Light-off Temperatur für HC ist, wie beim Katalysator 13 1320, bei circa 40 Sekunden erreicht. Es wird jedoch eine mittlere Konvertierungsrate von 83 % nach dem Light-off erzielt. Dadurch kann der geringere Endwert geschaffen werden.

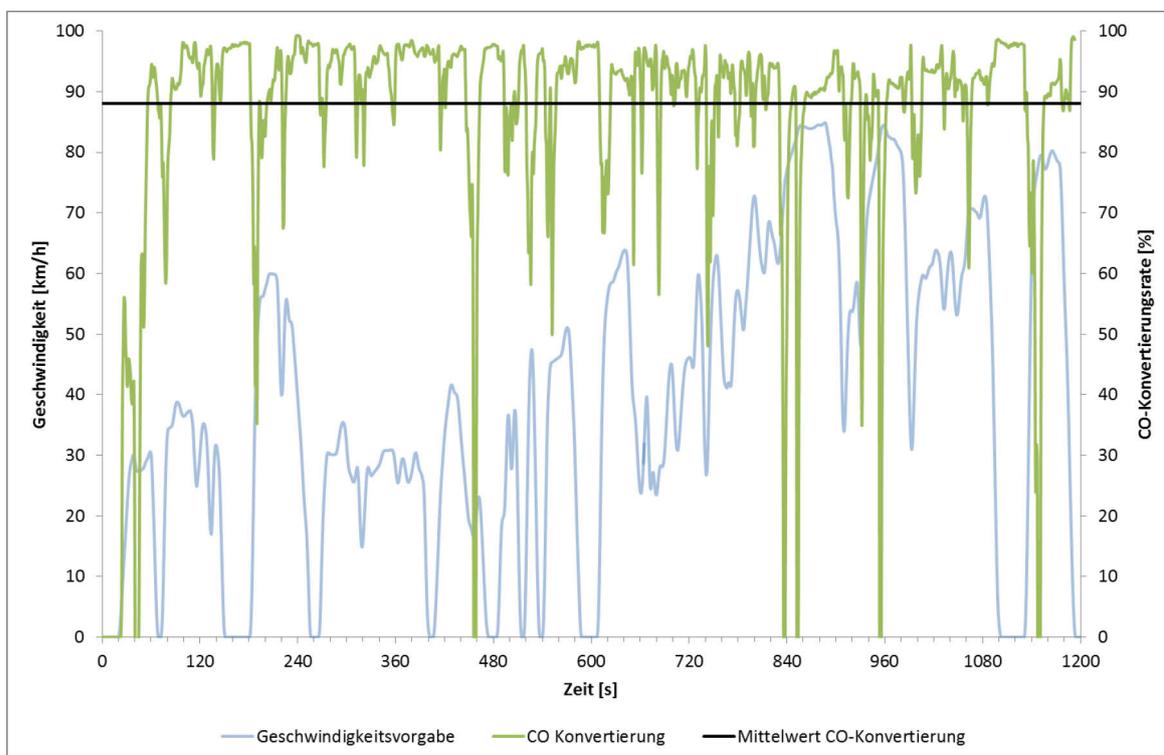


Abbildung 4-8: Konvertierungsrate von CO des Katalysator 13 1317 beim WMTC 2.1

Die Konvertierungsrate von CO zeigt in Abbildung 4-8 einen Light-off bei 25 Sekunden. Die ermittelte durchschnittliche Konvertierungsrate beträgt 88 %. Durch den frühen

Light-off zeigt sich eine Verbesserung der CO-Konzentration im ersten Zyklusteil. Es werden ungefähr 7 % vom Grenzwert weniger CO emittiert. Durch die höhere Konvertierungsrate wird auch der Ausstoß im zweiten Teil vermindert.

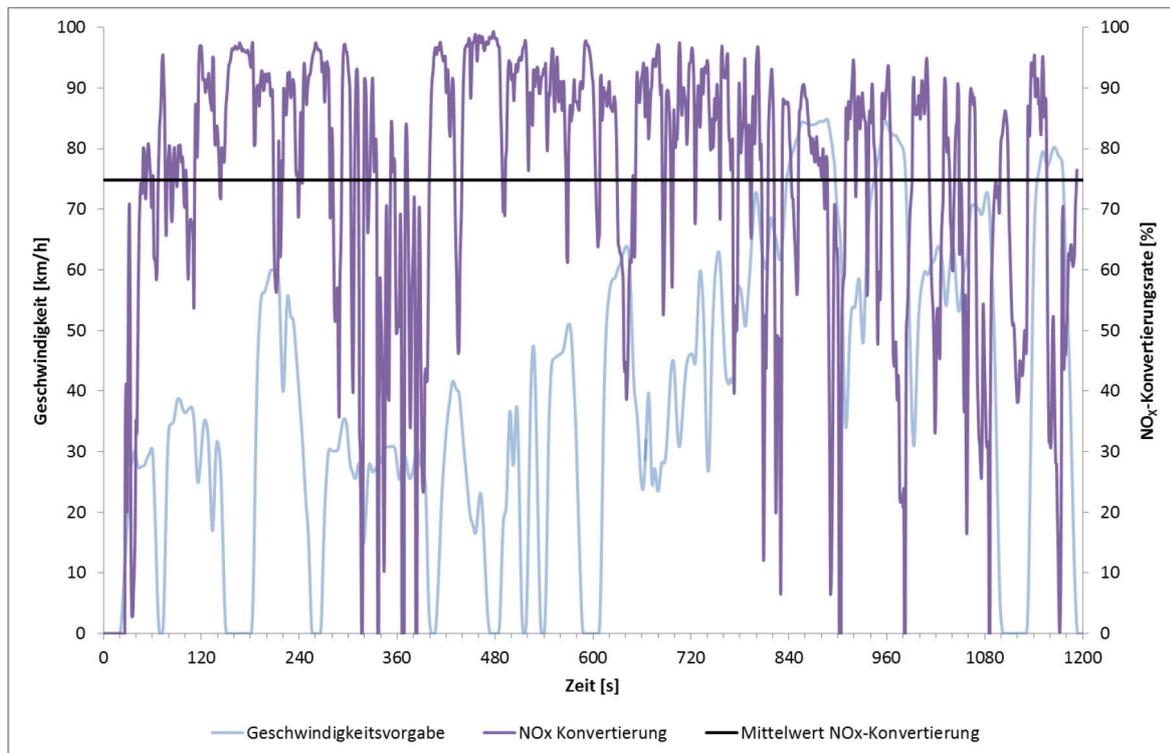


Abbildung 4-9: Konvertierungsrate von NO_x des Katalysator 13 1317 beim WMTC 2.1

Auch bei der Komponente NO_x tritt ein früherer Light-off ein. Dieser liegt bei 30 Sekunden. Durch den größeren Washcoat und die andere Beschichtung kann eine etwas höhere Konvertierungsrate realisiert werden. Diese liegt bei 75 %. Durch diese Eigenschaften werden vor allem im zweiten Zyklusteil weniger NO_x emittiert.

4.3 Ergebnisse des Katalysators 13 1718

Die Abbildung 4-10 spiegelt die Ergebnisse für den Katalysator 13 1718 wieder.

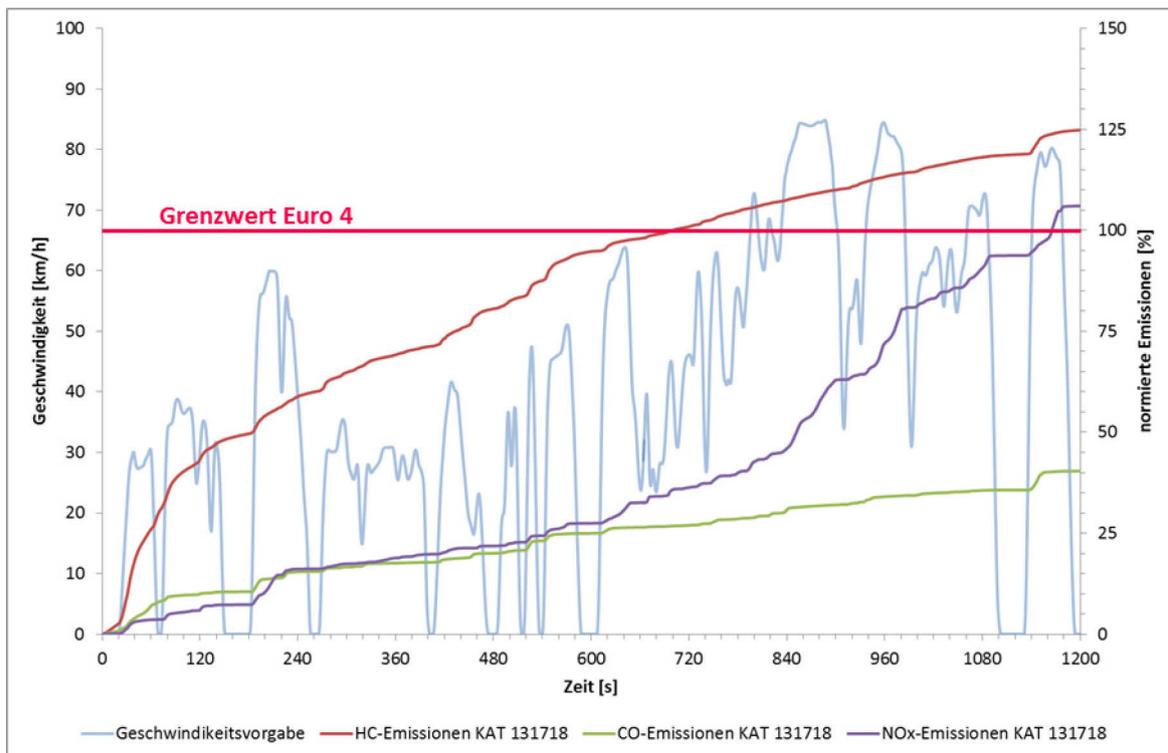


Abbildung 4-10: Normierte Emissionen (Grenzwerte Euro 4) beim WMTC 2.1 mit Katalysator 13 1718

In dem Diagramm ist zu sehen das die Endwerte der einzelnen Abgaskomponenten zwischen den Ergebnissen von Katalysator 13 1320 und 13 1717 liegen. Die HC und CO Grenzwerte werden um 45 % beziehungsweise 60 % unterschritten und sind somit etwas besser als beim Katalysator 13 1320. Die NO_x-Konzentration übersteigt den Grenzwert um 6 %.

Die Einordnung zwischen den beiden vorangegangenen Katalysatoren spiegelt sich auch bei den Konvertierungsraten wieder.

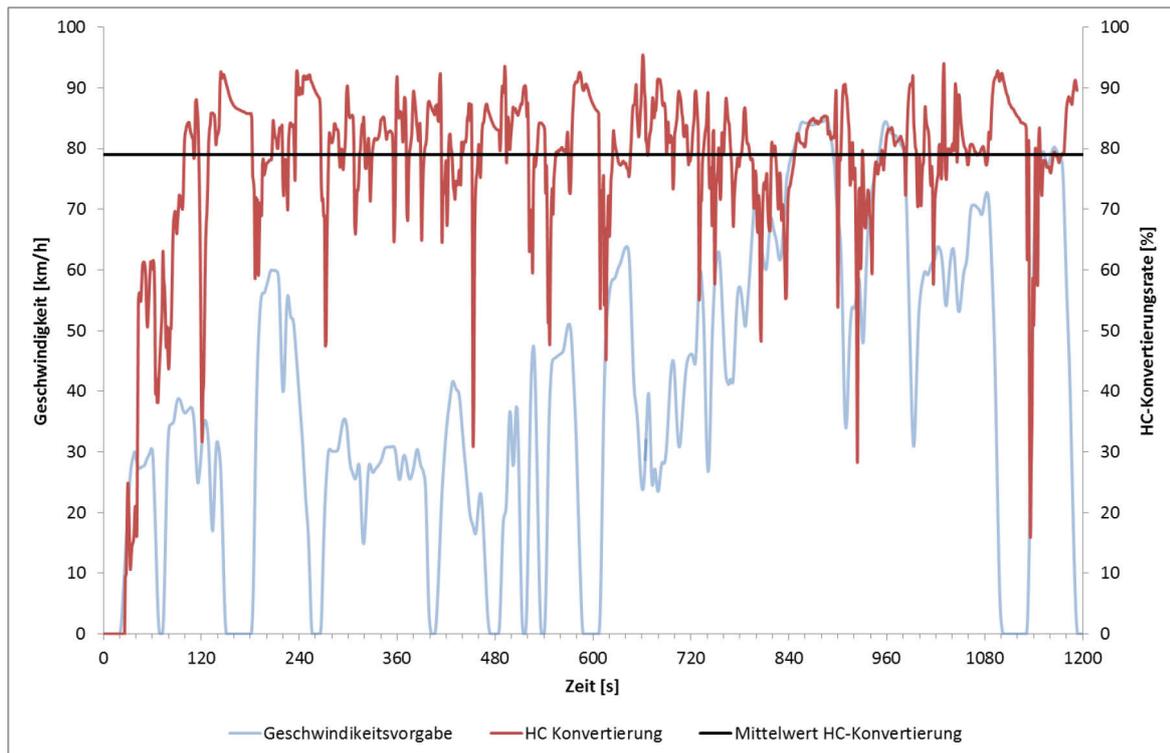


Abbildung 4-11: Konvertierungsrate von HC des Katalysator 13 1718 beim WMTC 2.1

Abbildung 4-12 zeigt die Konvertierungsrate für HC beim Katalysator 13 1318. Der Light-off wird zur gleichen Zeit (bei circa 40 Sekunden), wie bei Katalysator 13 1320 und 13 1717, erreicht. Die mittlere Konvertierungsrate ist um 1 %-Punkt besser als Katalysator 13 1320 und erreicht somit 79 %.

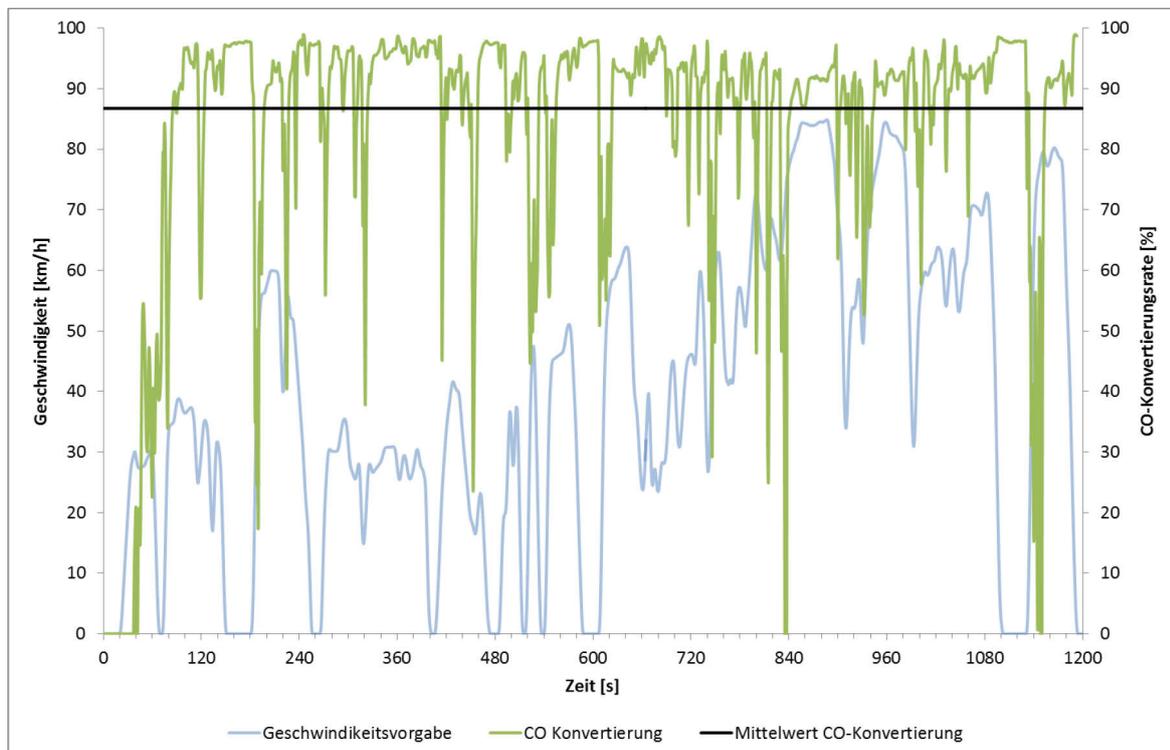


Abbildung 4-12: Konvertierungsrate von CO des Katalysator 13 1718 beim WMTC 2.1

Bei den CO-Emissionen zeigt sich ein ähnliches Bild, wie bei den HC-Emissionen. Der Light-off ist zeitgleich mit Katalysator 13 1320 (50 Sekunden) und die mittlere Konvertierungsrate erreicht 87 %. Dadurch werden etwas bessere Endwerte beim Zyklus erreicht.

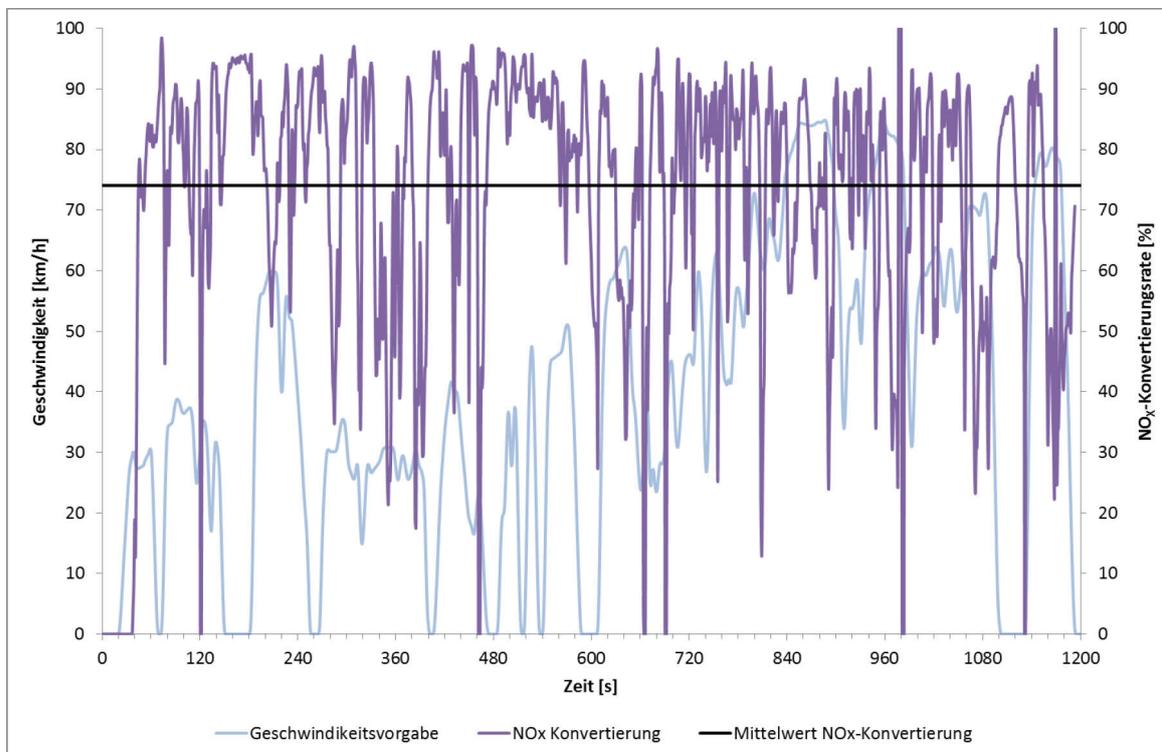


Abbildung 4-13: Konvertierungsrate von NO_x des Katalysator 13 1718 beim WMTC 2.1

Durch die anderen Washcoat-Komponenten und die höhere Edelmetallkonzentration kann der Katalysator 13 1718 die Abgaskomponente NO_x besser konvertieren als Katalysator 13 1320. Der Light-off ist im Vergleich etwas später (bei 44 Sekunden), jedoch wird eine durchschnittliche Konvertierungsrate von 74 % erreicht. Die hohe Konvertierungsrate ermöglicht eine Verbesserung der NO_x-Emissionen im Vergleich zu Katalysator 13 1320. Durch den späten Light-off ist der Endwert jedoch schlechter als bei Katalysator 13 1717.

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

In Tabelle 4-1 sind die Ergebnisse der Abgasmessungen in g/km, getrennt für den ersten und zweiten Teil des *WMTC 2.1*, aufgeführt.

Tabelle 4-1: Emissionen beim Teil 1 und Teil 2 des WMTC 2.1

Konfiguration	Emissionen WMTC 2.1 Teil 1 [g/km]				Emissionen WMTC 2.1 Teil 2 [g/km]			
	HC	CO	NO _x	CO ₂	HC	CO	NO _x	CO ₂
Rohemissionen	1,293	2,720	0,247	52,721	0,516	1,902	0,499	41,643
Kat 13 1320	0,340	0,588	0,050	59,426	0,104	0,392	0,169	47,614
Kat 13 1717	0,261	0,416	0,044	56,354	0,080	0,340	0,138	44,580
Kat 13 1718	0,322	0,569	0,049	58,237	0,102	0,351	0,141	43,576

Anhand der Tabelle ist gut zu erkennen, wie sich die Emissionen in den beiden Teilen des Testzyklus unterscheiden. In Tabelle 4-2 sind die oben gezeigten Grenzwerte auf die

Grenzwerte der Euro 4 Abgasgesetzgebung normiert. Hierfür ist auch die Gewichtung der beiden Teile berücksichtigt worden.

Tabelle 4-2: Normierter Emissionsausstoß (Grenzwert Euro 4) bei Teil 1 und 2 beim WMTC 2.1 (Gewichtung berücksichtigt)

Konfiguration	normierte Emissionen WMTC 2.1 Teil 1 [% EU4]			normierte Emissionen WMTC2.1 Teil 2 [% EU4]		
	HC	CO	NO _x	HC	CO	NO _x
	Rohemissionen	170,18	119,30	137,23	67,87	83,42
131320	44,76	25,80	27,94	13,66	17,21	93,99
131717	34,37	18,25	24,58	10,52	14,92	76,71
131718	42,41	24,97	27,47	13,40	15,39	78,54

Hieraus erkennt man, dass der Großteil der HC-Emissionen durchgehend bei allen Konfigurationen im ersten Teil entstehen. Bei den Rohemissionen wird der Grenzwert im ersten Teil des Zyklus bereits überschritten.

Der Ausstoß an CO-Emissionen tritt vor allem beim Motorstart auf. Nach dem Light-off für die CO-Abgaskomponente steigt der Ausstoß von CO relativ konstant an.

Der Ausstoß an NO_x findet überwiegend im zweiten Zyklusteil statt. Durch die höhere Motorlast und die höhere Drehzahl werden hier bis zu dreimal soviel NO_x emittiert.

In Tabelle 4-3 sind die Ergebnisse des ersten und zweiten Teils mit einer 50:50 Gewichtung addiert worden. Dies sind die gesetzlich gültigen Werte des Emissionstests.

Tabelle 4-3: Emissions Endwerte beim WMTC 2.1

Konfiguration	Emissionen WMTC 2.1 gesamt [g/km]			
	HC	CO	NO _x	CO ₂
Rohemissionen	0,905	2,311	0,373	47,182
Kat 13 1320	0,222	0,490	0,110	53,520
Kat 13 1717	0,171	0,378	0,091	50,467
Kat 13 1718	0,212	0,460	0,095	50,906

Die Endergebnisse der Emissionstests sind in Abbildung 4-14 grafisch gegenübergestellt. Dabei sind die Emissionen auf den Euro 4 Grenzwert normiert.

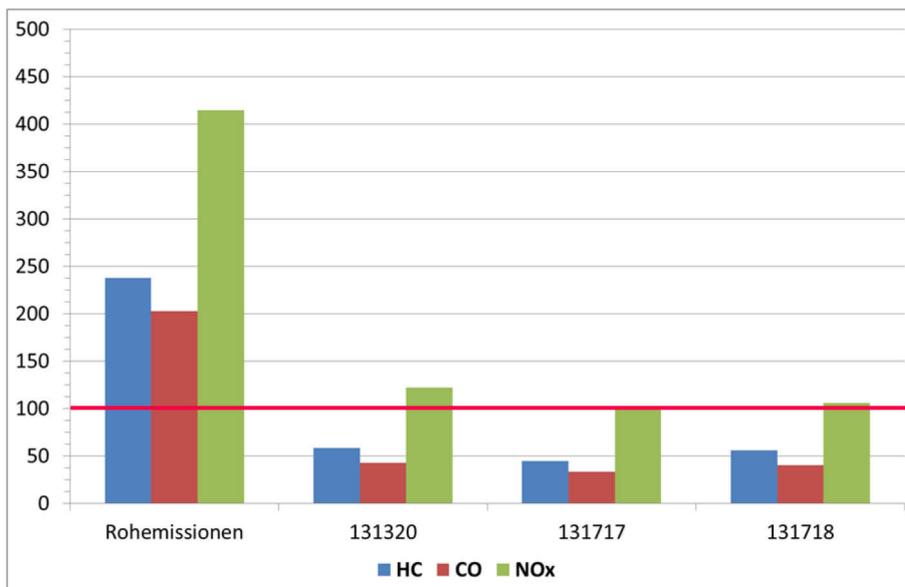


Abbildung 4-14: Vergleich der normierte Emissionen (Grenzwerte Euro 4) beim WMTC 2.1

Berücksichtigt man die geforderten Dauerhaltbarkeit der *Euro 4* Norm kann der Abgasgrenzwerte für NO_x nicht eingehalten werden. Die Verschlechterungsfaktoren, die die gesetzlich vorgeschriebene Dauerhaltbarkeit berücksichtigen, betragen bei HC und NO_x 1,2 (vergleiche Kapitel 2.3.3). Das bedeutet, dass für die Homologation die Grenzwerte um circa 17% unterschritten werden müssen. Der Verschlechterungsfaktor bei CO beträgt 1,3. Dies bedeutet, dass der Grenzwert um circa 23 % unterschritten werden muss. Die Grenzwerte für HC werden, trotz Berücksichtigung der Verschlechterungsfaktoren, um 30 % bis 46 % und die für CO um 44 % bis 57 % unterschritten. Das bedeutet, dass sogar eine gewisse Serienstreuung abgedeckt werden kann. Unter Berücksichtigung des Verschlechterungsfaktors bei NO_x wird der Grenzwert um 22 % bis 46 % überschritten. In Abbildung 4-15 sind die normierten Emissionen mit Berücksichtigung der Verschlechterungsfaktoren dargestellt.

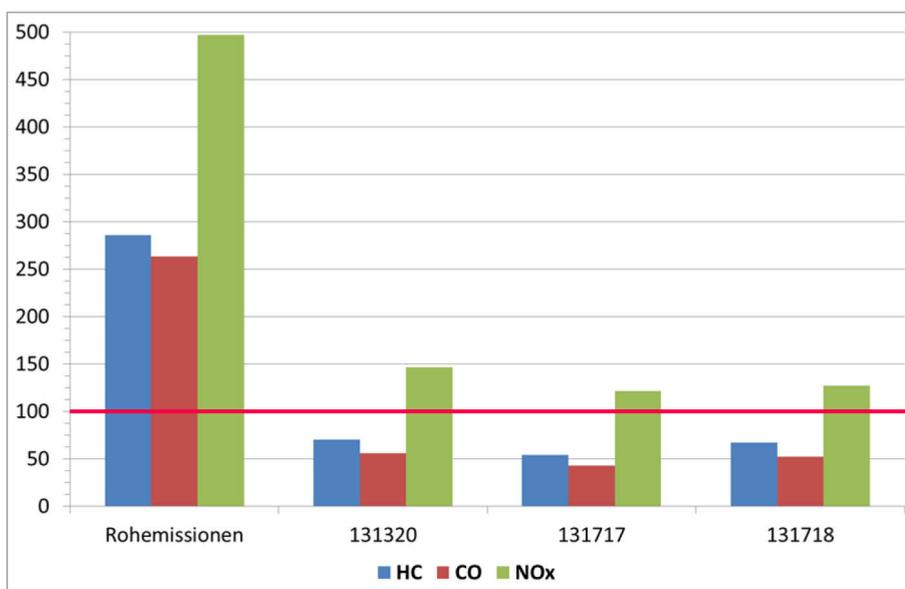


Abbildung 4-15: Vergleich der normierte Emissionen (Grenzwerte Euro 4) beim WMTC 2.1 unter Berücksichtigung der gesetzlichen Verschlechterungsfaktoren für die Dauerhaltbarkeit

Aus der Analyse geht hervor, dass der Katalysator 13 1717 das beste Konvertierungsverhalten aller drei Abgaskomponenten aufweist. Somit besitzt dieser Katalysator das größte Potenzial zum Erreichen der Abgasvorschrift. Durch ein etwas fetteres Verbrennungsluftverhältnis im Bereich hoher Motorlasten können die NO_x-Emissionen gesenkt werden. Dadurch werden zwar mehr CO und HC emittiert, jedoch besteht hier noch ein größerer Spielbereich hinsichtlich des Grenzwertes.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Im Zuge dieser Diplomarbeit ist ein 150 cm³ Viertakt Motorradmotor hinsichtlich der kommenden *Euro 4* Abgasgesetzgebung untersucht und optimiert worden. Das Fahrzeug beziehungsweise der Motor ist dazu auf die verwendeten Prototypenkomponenten der Einspritzung, des Abgassystems und des Motorsteuergerätes umgerüstet worden.

Im ersten Schritt ist das Basiskennfeld an die Charakteristik des Motors angepasst worden, dadurch kann das Steuergerät anhand seiner Sensoren für jeden Lastpunkt die richtige Einspritzmenge bestimmen.

Die für den Einsatz eines Drei-Wege-Katalysators wichtige Lambda-Regelung ist verbessert worden. Dies ist durch eine optimierte Lambda-Sonden Position im Abgassystem realisiert worden.

Um die Fahrbarkeit des Fahrzeuges zu verbessern, ist die Wandfilmkompensation angepasst worden.

Des Weiteren sind der Motorstart und Warmlauf hinsichtlich geringer Emissionen verändert worden. Dabei ist auch auf einen guten Motorstart bei kalten Umgebungsbedingungen geachtet worden.

Diese Anpassungen am Motorsteuergerät haben die Grundlage für die anschließenden Abgasemissionstests am Rollenprüfstand gebildet. Bei den Emissionsmessungen sind die Auswirkungen unterschiedlicher Drei-Wege-Katalysatoren im *World Harmonized Motorcycle Test Cycle (WMTC)* untersucht worden. Trotz der Optimierungen im Motorsteuergerät sind die Emissionsgrenzwerte nur bei einem Katalysator knapp erreicht worden. Dabei sind die gesetzlichen Verschlechterungsfaktoren für die Dauerhaltbarkeit jedoch noch nicht berücksichtigt worden.

Durch die Auswertung der Emissionsmessungen am Rollenprüfstand ist zu erkennen, dass die meisten HC- und CO-Emissionen im ersten Teil des WMTC entstehen. Hier gibt es ein Verbesserungspotenzial beim Kaltstart beziehungsweise Motorwarmlauf. Durch eine Position des Katalysators, die näher am Auslass liegt, kann ein früherer Light-off herbeigeführt werden. Auch der Einsatz eines Vor-Katalysators wäre denkbar. Die Reduzierung der NO_x kann mit einer Closed-Loop / Open-Loop Regelstrategie bei hoher Motorlast erreicht werden.

6 Anhang

6.1 Installationsempfehlungen der Prototypenkomponenten

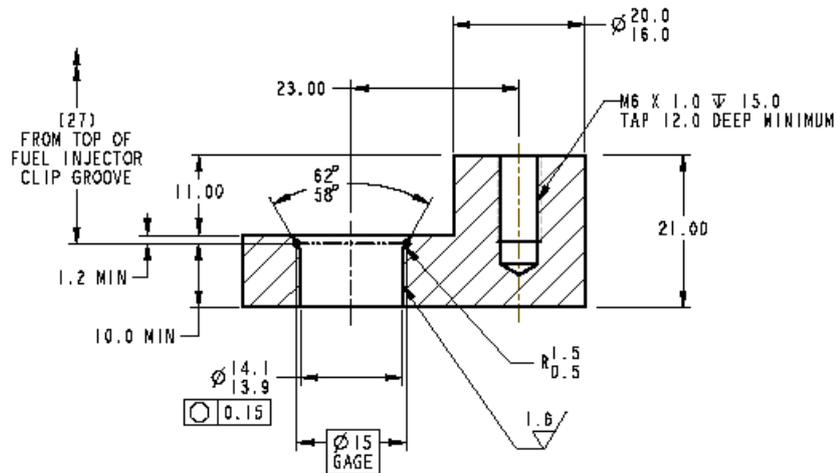


Abbildung 6-1: Abmessungen der Injektoraufnahme

[10]

1	NC	CPS-	NC	SGND	NC	NC	INJ	HEGO HEAT
2	NC	CPS+	ECT	HEGO SENS	NC	NC	F PUMP RLY	NC
3	CAN HIGH	NC	NC	NC	NC	MIL	NC	IGN
4	CAN LOW	KLINE	NC	NC	NC	VBD	VBK	PGND
	A	B	C	D	E	F	G	H

	Grounds
	Supplies
	Logic or Freq inputs
	VR Freq inputs
	Freq outputs
	Analog inputs
	Logic or Analog inputs
	Communications lines
	1A outputs
	ATM36 outputs
	ignition

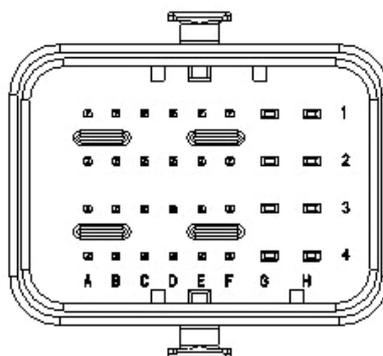


Abbildung 6-2: Verkabelung am Stecker des Motorsteuergerätes M3A

[10]

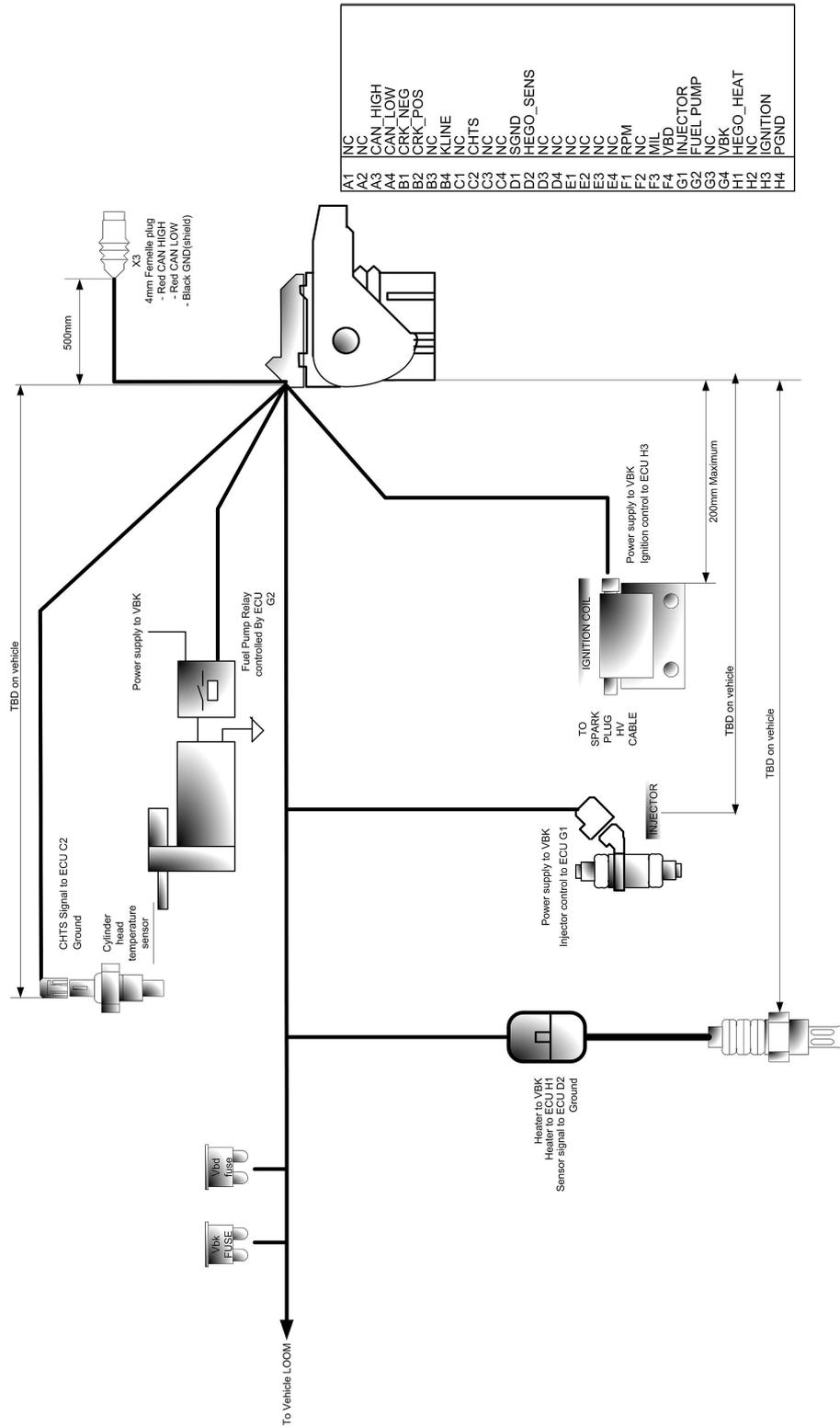


Abbildung 6-3: Kabelbaum für das M3A-Modul

[10]

6.2 Abgassystem

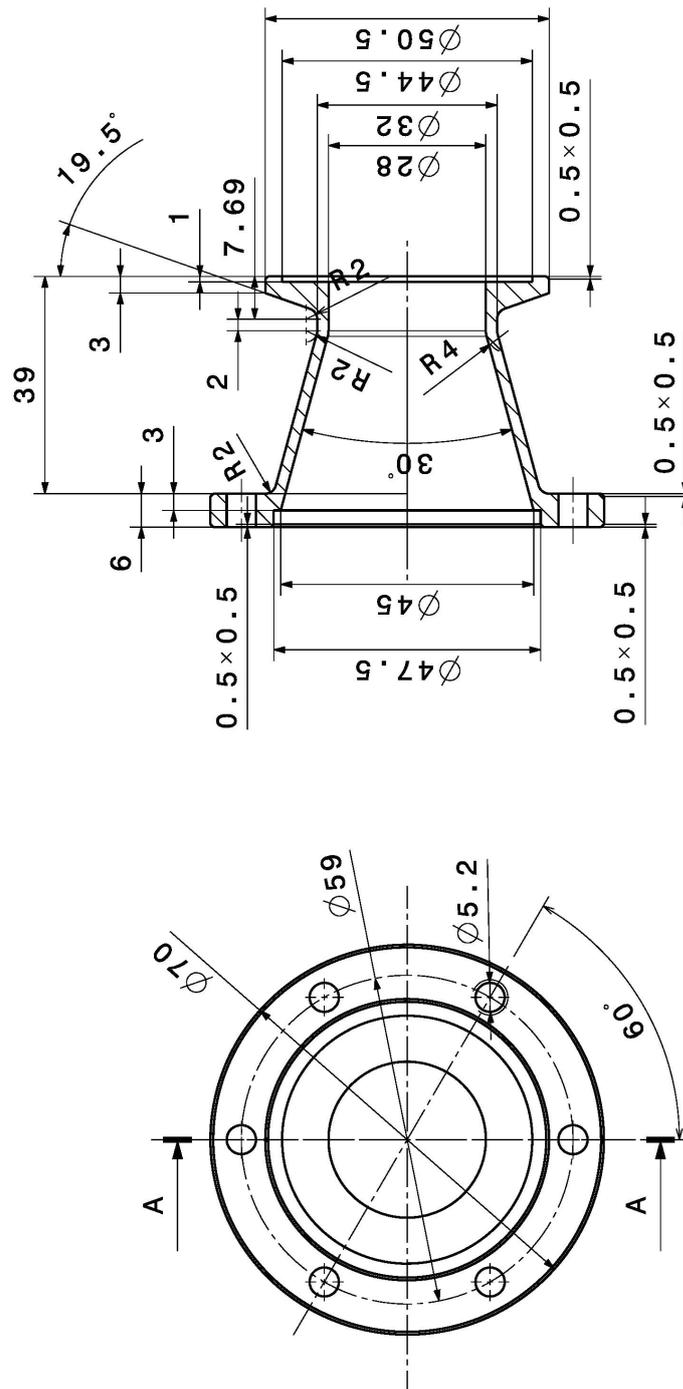


Abbildung 6-4: Katalysatorwechselsystem mit TriClamp-Konus

Verzeichnisse

Formelzeichen, Indices und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

AMP	mbar	Umgebungsdruck (ambient air pressure)
H_G	MJ/m ³	Gemischheizwert
H_u	kJ/kg	spezifischer Heizwert (früher: unterer Heizwert)
I	A	Stromstärke
I_P	A	Pumpstrom
L	kmol L/kmol B oder kg L/kg B	Luftmenge
m	kg oder mol	Masse
MAF	mg/Zyklus	Luftmassenstrom (mass air flow)
MAP	mbar	Saugrohrdruck (manifold air pressure)
M_d	Nm	Drehmoment
MFF	mg/Zyklus	Kraftstoffmassenfluss (mass fuel flow)
n	min ⁻¹	Drehzahl
P	(k)W	Leistung
p_i	bar	indizierter Mitteldruck
PQ_AMP	-	Druckquotient
Q_B	J	Brennstoffmenge
R	Ω	elektrischer Widerstand
R	J/(kg·K)	spezifische Gaskonstante
TCO	°C	Motortemperatur (coolant temperature)
TI	ms	Einspritzzeit (injection time)
TIA	°C	Ansauglufttemperatur
TPS	°	Drosselklappenwinkel
U	V	elektrische Spannung
U_H	V	Heizspannung
U_P	V	Pumpspannung
U_S	V	Sondenspannung
V	m ³	Volumen
W	J	Arbeit
z	-	Anzahl

Griechische Formelzeichen

ε	-	Leistungszahl; Verdichtungsverhältnis
ρ	kg/m ³	Dichte
$\Phi = 1/\lambda$	-	Equivalence Ratio
η	-	Wirkungsgrad
$\eta_e; \eta_i$	-	effektiver; innerer Wirkungsgrad
η_m	-	mechanischer Wirkungsgrad
λ	-	Luftverhältnis, Luftzahl
v_i	-	Molanteil der Komponente i

Operatoren und Bezeichnungen

d vollständiges Differential

Weitere Indices und Abkürzungen

1D	eindimensional
3D	dreidimensional
ABV	Luftbypassventil (air bypass valve)

AST	Nach Motorstart (after start)
AV	Auslassventil
B	Brennstoff; Bildung
BAS	Basis
c	Kompression
C	Konstante
CFD	Computational Fluid Dynamics
chem.	chemisch
CI	Selbstzündung
CLD	Chemoluminiszenzdetektor
COR	Korrigiert
CPS	Kurbelwellenpositionssensor (crankshaft position sensor)
CVS	Constant Volume Sampling
CYC	Zyklus (cycle)
CYL	Zylinder
DEC	abklingen (decay)
DI	Direct Injection (Direkteinspritzung bzw. Direkteinblasung)
DIN	Deutsches Institut für Normung
e	effektiv
ECT/CHTS	Motortemperaturfühler (engine temperature sensor)
ECU	Motorsteuergerät (engine control unit)
elektr.	elektrisch
EV	Einlassventil
FAC	Faktor (factor)
FID	Flammenionisationsdetektor
FP	Kraftstoffpumpe (fuel pump)
G	Gemisch
GRD	Gradient
h	Hubraum (des Zylinders)
HEGO	Lambdasonde (heat exhaust gas oxygen)
HOM	homogen
i	Laufvariable (1, 2, ..., k), innere
IGN	Zündung (ignition)
INJ	Einspritzung (injection)
IP	Tabelle mit Interpolation
ISA	Leerlaufregler (idle speed actuator)
ISO	International Organization for Standardization
ist	Istwert
LAMB	Lambda
LAMB_SP	Lambdasollpunkt (lambda setpoint)
m	mittel; molar
M	Stoßpartner (chem.)
max	maximal
MDA	Measure Data Analyzer
min	minimal
MV	Durchschnitt (mean value)
MVEG)	Motor Vehicle Emissions Group (Europäische Kommission
NEDC	New European Driving Cycle
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
OT	oberer Totpunkt
PGND	elektr. Masse (power ground)
PI	Fremdzündung

Ref	Referenz
REST	re-start
SGND	Signalmasse (signal ground)
soll	Sollwert
STND	Standard
TCOST	Motorstarttemperatur (coolant temperature start)
THR	Drosselklappe (throttle)
UT	Unterer Totpunkt
VBD	Dauerplus
VBK	geschaltetes Plus
WF	Wandfilm (wall film)
WMTC	World Harmonized Motorcycle Test Cycle
WUP	Warmlauf (warm up)

Abbildungsverzeichnis

ABBILDUNG 2-1:	ARBEITSPROZESS DES VIERTAKTMOTORS.....	2
ABBILDUNG 2-2:	PRINZIPIELLES ABGASVERHALTEN EINES OTTOMOTORS IN ABHÄNGIGKEIT DES LUFTVERHÄLTNISSES.....	7
ABBILDUNG 2-3:	ABHÄNGIGKEIT DER OZONKONZENTRATION VON NO _x UND HC EMISSIONEN	10
ABBILDUNG 2-4:	KONVERTIERUNGSRATEN ÜBER λ	11
ABBILDUNG 2-5:	KANÄLE EINES UNBESCHICHTETEN WABENKATALYSATORS (LINKS) UND EINES BESCHICHTETEN EINZELKANALS (RECHTS)	12
ABBILDUNG 2-6:	WASHCOAT	12
ABBILDUNG 2-7:	SCHEMA EINES FRISCHEN KATALYSATOR (LINKS) UND DER EDELMETALLSINTERUNG (RECHTS)	13
ABBILDUNG 2-8:	SCHEMA DER TRÄGERMATERIALSINTERUNG EINES KATALYSATORS.....	14
ABBILDUNG 2-9:	SCHEMA DER SELEKTIVEN (LINKS) UND NICHT SELEKTIVE (RECHTS) VERGIFTUNG EINES KATALYSATORS	14
ABBILDUNG 2-10:	WMTC TEIL 1 UND TEIL 1 MIT REDUZIERTER GESCHWINDIGKEIT	16
ABBILDUNG 2-11:	WMTC TEIL 2 UND TEIL 2 MIT REDUZIERTER GESCHWINDIGKEIT	16
ABBILDUNG 2-12:	WMTC TEIL 3 UND TEIL 3 MIT REDUZIERTER GESCHWINDIGKEIT	17
ABBILDUNG 3-1:	VERSUCHSAHNRZEUG YAMAHA FZ 150I AM ROLLENPRÜFSTAND	19
ABBILDUNG 3-2:	VERSUCHSMOTOR AM MOTORPRÜFSTAND	20
ABBILDUNG 3-3:	DROSSELKLAPPENMODUL M3A MIT LEERLAUFREGLER	23
ABBILDUNG 3-4:	3-D MODELL DES INJEKTORS MIT SPRÜHKEGEL	24
ABBILDUNG 3-5:	EINLASSADAPTER MIT INJEKTORAUFNAHME.....	24
ABBILDUNG 3-6:	ANSAUGGERÄUSCHDÄMPFER FÜR DAS FAHRZEUG	25
ABBILDUNG 3-7:	TRIGGERRING FÜR DAS MOTORSTEUERGERÄT M3A.....	26
ABBILDUNG 3-8:	POSITIONIERUNG DER TRIGGERSCHEIBE UND INDUKTIVGEBER	26
ABBILDUNG 3-9:	STROMVERSORGUNG UND KOMPONENTENVERBINDUNG DES M3A STEUERGERÄTES.....	27
ABBILDUNG 3-10:	KATALYSATORWECHSELSYSTEM MIT <i>TriCLAMP</i> -FLANSCHSYSTEM IM AUSPUFF VERBAUT	28
ABBILDUNG 3-11:	KATALYSATORADAPTER MIT <i>TriCLAMP</i> -KONUS.....	28
ABBILDUNG 3-12:	<i>TriCLAMP</i>	29
ABBILDUNG 3-13:	<i>TriCLAMP</i> KLEMMVERBINDUNG	29
ABBILDUNG 3-14:	<i>TriCLAMP</i> -KONUS MIT DICHTUNG, ORIGINAL UND MODIFIZIERT	30
ABBILDUNG 3-15:	AUSPUFFENDSCHALLDÄMPFER MIT RAHMENBEFESTIGUNG.....	30
ABBILDUNG 3-16:	PRÜFSTANDSAUFBAU (PRINZIP)	31
ABBILDUNG 3-17:	LEISTUNGSSCHARAKTERISTIK DER LEISTUNGSBREMSE	31
ABBILDUNG 3-18:	DREHMOMENTMESSFLANSCH <i>KISTLER 4504A</i>	33
ABBILDUNG 3-19:	SIGNALVERLAUF DES DREHZAHLEBEBERS	33
ABBILDUNG 3-20:	KRAFTSTOFFVERBRAUCHSMESSUNG <i>CORI-FLOW M14</i>	34
ABBILDUNG 3-21:	SPANNUNGSKENNLINIE DER ZWEIPUNKT-LAMBDA-SONDE FÜR VERSCHIEDENE ARBEITSTEMPERATUREN.....	36
ABBILDUNG 3-22:	AUFBAU EINER ZWEIPUNKT-LAMBDA-SONDE	36
ABBILDUNG 3-23:	PUMPSTROM I _p EINER BREITBAND-LAMBDA-SONDE IN ABHÄNGIGKEIT DER LUFTZAHL λ	37
ABBILDUNG 3-24:	PLANARE BREITBAND-LAMBDA-SONDE (SCHEMATISCHER AUFBAU DER MESSZELLE UND ANORDNUNG IM ABGASROHR)	37
ABBILDUNG 3-25:	PLANARE BREITBAND-LAMBDA-SONDE <i>LSU4</i>	38
ABBILDUNG 3-26:	SCHEMATISCHER AUFBAU EINER OFFENEN CVS-ANLAGE	40
ABBILDUNG 3-27:	SCHEMATISCHE BESTIMMUNG DER EINSPRITZMENGE IM MOTORSTEUERGERÄT.....	42
ABBILDUNG 3-28:	EINZELMESSPUNKTE DER BASISKENNFELDERSTELLUNG	46
ABBILDUNG 3-29:	VERGLEICH DER KENNFELDWERTE IM BASISKENNFELD VON MESSUNG ZUR RECHNUNG BEI EINZELMESSUNGSMETHODE (4125 U/MIN).....	47
ABBILDUNG 3-30:	VERGLEICH DER KENNFELDWERTE IM BASISKENNFELD VON MESSUNG ZUR RECHNUNG BEI MESSUNG MIT LAMBDAEUREGELUNG (4125 U/MIN).....	48
ABBILDUNG 3-31:	MESSSTELLEN ZUR MESSUNG DES TEMPERATURVERLAUFS IM AUSPUFF.....	50
ABBILDUNG 3-32:	ABGASTEMPERATUR BEIM WARMLAUF IM LEERLAUF	51
ABBILDUNG 3-33:	ABHÄNGIGKEIT DER ABGASTEMPERATUR VOM ZÜNDWINKEL UND VOM ABSTAND ZUM AUSLASS (LEERLAUF)	52
ABBILDUNG 3-34:	ABGASTEMPERATUR BEI VARIATION DES VERBRENNUNGSLUFTVERHÄLTNISSES λ IM LEERLAUF, IN ABHÄNGIGKEIT DES ABSTANDES ZUM AUSLASS	53
ABBILDUNG 3-35:	ABGASTEMPERATUR BEI VARIATION DER VERBRENNUNGSLUFTVERHÄLTNISSES λ BEI VOLLAST UND 8600 U/MIN, IN ABHÄNGIGKEIT DES ABSTANDES ZUM AUSLASS	53
ABBILDUNG 3-36:	MAXIMALE ABGASTEMPERATUR IN ABHÄNGIGKEIT DES ABSTANDES ZUM AUSLASS (VOLLAST BEI 8600 U/MIN)	54

ABBILDUNG 3-37:	AUSWIRKUNGEN DER SONDENPOSITION AUF DEN BEGINN DER LAMBDAEREGELUNG IM TEIL 1 DES WMTC (0 BIS 180 SEKUNDEN)	55
ABBILDUNG 3-38:	AUSWIRKUNG DER SONDENPOSTION AUF DIE CO-EMISSIONEN IM TEIL 1 DES WMTC (0 BIS 180 SEKUNDEN)	55
ABBILDUNG 3-39:	AUSWIRKUNG DER SONDENPOSTION AUF DIE HC- UND NO _x -EMISSIONEN IM TEIL 1 DES WMTC (0 BIS 180 SEKUNDEN)	56
ABBILDUNG 3-40:	ÄNDERUNG DES LUFTVERHÄLTNISS λ IM FALLE EINER FÜLLUNGSERFASSUNG DURCH MESSUNG DES LUFTMASSENSTROMS	57
ABBILDUNG 3-41:	ÄNDERUNG DES LUFTVERHÄLTNISS λ IM FALLE EINER FÜLLUNGSERFASSUNG DURCH MESSUNG DES SAUGROHRDRUCKS	58
ABBILDUNG 3-42:	FLUSSDIAGRAMM FÜR SCHNELLE WANDFILMKOMPENSATION	59
ABBILDUNG 3-43:	FLUSSDIAGRAMM ZUR BERECHNUNG DER EINSPRITZMENGE BEI MOTORSTART UND WARMLAUF	60
ABBILDUNG 3-44:	ZUSAMMENSETZUNG DER WARMLAUFKORREKTUR UND LAMBDAVERSCHIEBUNG	62
ABBILDUNG 3-45:	AUSWIRKUNG DER WARMLAUFKORREKTUR AUF DEN LAMBDA BETRIEBSPUNKT IM TEIL 1 DES WMTC (0 BIS 180 SEKUNDEN)	64
ABBILDUNG 3-46:	AUSWIRKUNG DER WARMLAUFKORREKTUR AUF DIE CO-EMISSIONEN IM TEIL 1 DES WMTC (0 BIS 180 SEKUNDEN)	65
ABBILDUNG 3-47:	AUSWIRKUNG DER WARMLAUFKORREKTUR AUF DIE HC- UND NO _x -EMISSIONEN IM TEIL 1 DES WMTC (0 BIS 180 SEKUNDEN)	66
ABBILDUNG 4-1:	NORMIERTE ROH-EMISSIONEN (GRENZWERTE EURO 4) BEIM WMTC 2.1	68
ABBILDUNG 4-2:	NORMIERTE EMISSIONEN (GRENZWERTE EURO 4) BEIM WMTC 2.1 MIT KATALYSATOR 13 1320	69
ABBILDUNG 4-3:	KONVERTIERUNGSRATE VON HC DES KATALYSATOR 13 1320 BEIM WMTC 2.1	70
ABBILDUNG 4-4:	KONVERTIERUNGSRATE VON CO DES KATALYSATOR 13 1320 BEIM WMTC 2.1	71
ABBILDUNG 4-5:	KONVERTIERUNGSRATE VON NO _x DES KATALYSATOR 13 1320 BEIM WMTC 2.1	71
ABBILDUNG 4-6:	NORMIERTE EMISSIONEN (GRENZWERTE EURO 4) BEIM WMTC 2.1 MIT KATALYSATOR 13 1717	72
ABBILDUNG 4-7:	KONVERTIERUNGSRATE VON HC DES KATALYSATOR 13 1317 BEIM WMTC 2.1	73
ABBILDUNG 4-8:	KONVERTIERUNGSRATE VON CO DES KATALYSATOR 13 1317 BEIM WMTC 2.1	73
ABBILDUNG 4-9:	KONVERTIERUNGSRATE VON NO _x DES KATALYSATOR 13 1317 BEIM WMTC 2.1	74
ABBILDUNG 4-10:	NORMIERTE EMISSIONEN (GRENZWERTE EURO 4) BEIM WMTC 2.1 MIT KATALYSATOR 13 1718	75
ABBILDUNG 4-11:	KONVERTIERUNGSRATE VON HC DES KATALYSATOR 13 1718 BEIM WMTC 2.1	76
ABBILDUNG 4-12:	KONVERTIERUNGSRATE VON CO DES KATALYSATOR 13 1718 BEIM WMTC 2.1	76
ABBILDUNG 4-13:	KONVERTIERUNGSRATE VON NO _x DES KATALYSATOR 13 1718 BEIM WMTC 2.1	77
ABBILDUNG 4-14:	VERGLEICH DER NORMIERTE EMISSIONEN (GRENZWERTE EURO 4) BEIM WMTC 2.1	79
ABBILDUNG 4-15:	VERGLEICH DER NORMIERTE EMISSIONEN (GRENZWERTE EURO 4) BEIM WMTC 2.1 UNTER BERÜCKSICHTIGUNG DER GESETZLICHEN VERSCHLECHTERUNGSFAKTOREN FÜR DIE DAUERHALTBARKEIT	79
ABBILDUNG 6-1:	ABMESSUNGEN DER INJEKTORAUFNAHME	82
ABBILDUNG 6-2:	VERKABELUNG AM STECKER DES MOTORSTEUERGERÄTES M3A	82
ABBILDUNG 6-3:	KABELBAUM FÜR DAS M3A-MODUL	83
ABBILDUNG 6-4:	KATALYSATORWECHSELSYSTEM MIT <i>TRICLAMP</i> -KONUS	84

Tabellenverzeichnis

TABELLE 2-1:	EINTEILUNG DER FAHRZEUGE NACH HUBRAUM UND BAUARTGESCHWINDIGKEIT	15
TABELLE 2-2:	EURO ABGASGRENZWERTE NACH ANTRIEBSKLASSEN	18
TABELLE 2-3:	VERSCHLECHTERUNGSFAKTOREN	18
TABELLE 3-1:	ABMESSUNGEN UND GEWICHT DES VERSUCHSFAHRZEUGES	21
TABELLE 3-2:	TECHNISCHE DATEN DES VERSUCHSMOTORS	21
TABELLE 3-3:	GEGENÜBERSTELLUNG DER GETRIEBEABSTUFUNGEN	22
TABELLE 3-4:	TECHNISCHE DATEN DES WASSER-WASSER-PLATTENWÄRMETAUSCHERS	32
TABELLE 3-5:	TECHNISCHE DATEN DES HONEYWELL STELLMOTORS	32
TABELLE 3-6:	TECHNISCHE DATEN DER BREITBAND-LAMBDA SONDE	38
TABELLE 3-7:	TECHNISCHE DATEN DES ROLLENPRÜFSTANDES	39
TABELLE 3-8:	TECHNISCHE DATEN DES FAHRTWINDVENTILATORS	39
TABELLE 3-9:	MESSVARIABLEN FÜR BASISKENNFELD	45
TABELLE 3-10:	MESSVARIABLEN FÜR MOTORWARMLAUF	62
TABELLE 3-11:	ÜBERSICHT DER VERMESSENEN DREI-WEGE-KATALYSATOREN	67
TABELLE 4-1:	EMISSIONEN BEIM TEIL 1 UND TEIL 2 DES WMTC 2.1	77

TABELLE 4-2:	NORMIERTER EMISSIONSAUSSTOß (GRENZWERT EURO 4) BEI TEIL 1 UND 2 BEIM WMTC 2.1 (GEWICHTUNG BERÜCKSICHTIGT).....	78
TABELLE 4-3:	EMISSIONS ENDWERTE BEIM WMTC 2.1.....	78

Literatur- und Quellenverzeichnis

- [1] R. Pischinger und H. Eichlseder, „Kolbenmaschinen,“ Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Graz, 2007.
- [2] H. Eichlseder, „Verbrennungskraftmaschinen Vertiefte Ausbildung,“ Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Graz, 2005.
- [3] S. Hausberger, „Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei Kfz,“ Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Graz, 2009.
- [4] S. Hausberger, „Umweltauswirkungen des Verkehrs,“ Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, Graz, 2011.
- [5] R. v. Basshuysen, Handbuch Verbrennungsmotor, Wiesbaden: Vieweg & Teubner, 2012.
- [6] UNITED NATIONS, „Global technical regulation No. 2 (ECE/TRANS/180/Add.2),“ UNITED NATIONS, Geneva, 2005.
- [7] R. Johannsen, „Zukünftige Anforderungen der Abgasgesetzgebung an Motorräder,“ *Motortechnische Zeitschrift*, 05 2013.
- [8] Delphi, „World Wide Emissions Standards,“ 2013/2014.
- [9] Synerject, „Synerject,“ [Online]. Available: <http://www.synerject.com/2-3-wheeler/light-motorcycles/m3a-module-p29-6?idi=11>. [Zugriff am 15 01 2014].
- [10] Synerject, „Synerject recommendations for components installation,“ Synerject, 2012.
- [11] M & A Technik GmbH, „M & A Technik GmbH,“ [Online]. Available: <http://www.mat-gmbh.at/TC-Klammer2.pdf>. [Zugriff am 01 08 2013].
- [12] InnoRat GmbH, „InnoRat GmbH,“ InnoRat GmbH, [Online]. Available: http://www.innorat.ch/Tri-clamp_u2_74.html. [Zugriff am 15 01 2014].
- [13] „MTS Messtechnik Schaffhausen GmbH,“ MTS Messtechnik Schaffhausen GmbH, [Online]. Available: <http://www.mts.ch/pictures/4504A.jpg>. [Zugriff am 15 03 2013].
- [14] B. H.-T. B.V., „BRONKHORST HIGH-TECH B.V.,“ [Online]. Available: http://www.bronkhorst.com/files/br_coritech/downloads/datasheets/m14_mini_coriflow.pdf. [Zugriff am 01 06 2013].
- [15] K. Reif, Sensoren im Kraftfahrzeug, R. B. GmbH, Hrsg., Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2010.
- [16] Synerject, „Engine Management System,“ Synerject, 2012.
- [17] „Climate Change 2013,“ Cambridge University Press, Cambridge, New York, Melbourne, Madrid, Cape Town, Singapore, São Paulo, Delhi, Mexico City, 2013.