

VEMAC GmbH & Co. KG
Aachen

**Piezoelektrischer Gemischbildner als kostengünstige Technik
zur Abgasentgiftung von Kleinkrafträdern.
Entwicklung eines Demonstrators zum Nachweis der signifikanten
Umweltentlastung sowie der technischen und ökonomischen
Machbarkeit.**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 25301 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Martin Düsterhöft

unter Mitarbeit von Dr. Oser / Partner in Technik
Köln & Herzogenrath

Dipl.-Ing. Werner Robens

Aachen, im Dezember 2008

Bezugsmöglichkeit des Abschlussberichtes:

VEMAC GmbH & Co. KG
Dr.-Ing. Martin Düsterhöft
Krantzstr. 7
52070 Aachen
Tel. 0241 / 18 29 29 –0

VEMAC GmbH & Co. KG
Aachen

**Piezoelektrischer Gemischbildner als kostengünstige Technik
zur Abgasentgiftung von Kleinkrafträdern.
Entwicklung eines Demonstrators zum Nachweis der signifikanten
Umweltentlastung sowie der technischen und ökonomischen
Machbarkeit.**

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 25301 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dr.-Ing. Martin Düsterhöft

unter Mitarbeit von Dr. Oser / Partner in Technik
Köln & Herzogenrath

Dipl.-Ing. Werner Robens

Aachen, im Dezember 2008

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	25301	Referat	21/0	Fördersumme	125.000,00 EUR
Antragstitel		Piezoelektrischer Gemischbildner als kostengünstige Technik zur Abgasentgiftung von Kleinkrafträdern – Entwicklung eines Demonstrators zum Nachweis der signifikanten Umweltentlastung sowie der technischen und ökonomischen Machbarkeit.			
Stichworte		Piezoelektrischer Gemischbildner, Otto-Motor, Krafträder, Demonstrator			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
18 Monate	11.04.2007	30.11.2008	1		
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger		VEMAC GmbH & Co. KG Krantzstr. 7 / Halle 33 a 52070 Aachen E-Mail: contact@vemac.de www.vemac.de		Tel 0241 / 1829 – 290 Fax 0241 / 1829 – 299 Projektleitung Dr.-Ing. M. Düsterhöft Bearbeiter	
Kooperationspartner					
<p>Zielsetzung und Anlaß des Vorhabens</p> <p>Der „Otto-Motor“ ist das dominierende Motorenprinzip bei Krafträdern, Industrieantrieben mit geringer Leistung und handgeführten Maschinen. Die Leistungsregelung und Gemischauflbereitung bei diesen Anwendungen erfolgt bis heute in der Regel durch einfache Gemischbildner, die prinzipbedingt nur für einen kleinen Betriebsbereich des Motors verbrauchs- oder abgasoptimal abgestimmt werden können.</p> <p>Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden</p> <p>Die Firma VEMAC hat zur Lösung dieser Problematik eine Technik entwickelt und patentiert, mit der durch Regelung des Kraftstoffmassenstroms mit Hilfe von piezoelektrischen Aktuatoren auch in einfachen Gemischbildnern ein optimales Kraftstoff-Luftgemisch über den gesamten Betriebsbereich eines Motors eingestellt werden kann. Gleichzeitig lässt sich durch den elektronisch geregelten Gemischbildner ein erhebliches Kraftstoffeinsparpotential erschließen. Beide Verbesserungspotentiale (Emission und Verbrauch) sollen mit praxisnahen Demonstratoren in Form von Großserien-Krafträdern nachgewiesen werden.</p> <p>Beide Verbesserungspotentiale (Emission und Verbrauch) wurden mit praxisnahen Demonstratoren in Form von Großserien Krafträdern nachgewiesen. Über bereits heute bekannte Abgasgrenzwerte hinaus ist davon auszugehen, dass diese vergleichsweise einfache und kostengünstige Technologie im Zusammenspiel mit einem optimal abgestimmten Katalysator noch erhebliches Potential für zukünftige weitere Absenkungen der Abgasgrenzwerte besitzt.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt ☐ An der Bornau 2 ☐ 49090 Osnabrück ☐ Tel 0541/9633-0 ☐ Fax 0541/9633-190 ☐ http://www.dbu.de					

Inhaltsverzeichnis

Gliederung des Abschlussberichtes		Seite
1.	Zusammenfassung	9
2.	Einleitung	10
3.	Aufgabenstellung	12
4.	Grundlagen oder vorangegangene Arbeiten	13
4.1	Abgasgesetzgebung für Kleinkraftmädrer in der Europäischen Union	13
4.2	Abgasverhalten von Ottomotoren	14
4.3	Funktion des Piezo-Moduls	16
4.4	Lambdasonden	18
4.5	Elektronische Regelung	20
4.5.1	PID-Regler	21
4.5.2	Zweipunktregler	21
5.	Realisierung des PCC-Systems am Kleinkraftmädrer	24
5.1	Integration des Piezo-Moduls in den Vergaser	24
5.2	Motorprüfstands Umgebung	24
5.2.1	Abgasmesstechnik	25
5.2.2	Kraftstoffmengenmessung	25
5.2.3	Mess- und Automatisierungssystem	25
5.3	Rollenprüfstand beim TÜV Nord	26
5.4	Ergebnisse des Vorhabens	28
5.4.1	Rollenprüfstandsergebnisse vom Serienmotorrad	28
5.4.2	Ergebnisse stationärer Messungen auf dem Motorprüfstand	30
5.4.3	Ergebnisse dynamischer Messungen auf dem Rollenprüfstand	37
5.4.4	TÜV Ergebnisse mit PCC-System	42
5.5	Fahrversuche	48
5.6	Bewertung der Ergebnisse	48
5.7	Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse	50
6.	Fazit	51
7.	Literaturverzeichnis	53
8.	Anhang	55

Verzeichnis von Bildern, Zeichnungen, Graphiken und Tabellen

2.1	Globale Produktionszahlen von Zweirädern	10
3.1	Kleinkraftrad Hero Honda Glamour	12
4.1	Tabelle Entwicklung der Emissionsgrenzwerte nach 97/24/EG	13
4.2	Teil des Stadtfahrzyklus nach 97/24/EU3	13
4.3	Tabelle Auszug aus der Richtlinie 27/24/EG	14
4.4	Schadstoffkomponenten beim Ottomotor im Rohgas	15
4.5	Konvertierungsgrad eines 3-Wege-Katalysators	16
4.6	Darstellung eines Prinzipvergasers	17
4.7	Binäre Lambdasonde	18
4.8	Kennlinie – Binäre Lambdasonde	19
4.9	Lineare Lambdasonde	19
4.10	Kennlinie – Lineare Lambdasonde	20
4.11	Blockschaltbild des Regelkreises	21
4.12	Strukturbild eines PID –Reglers	21
4.13	Hysteresekurve eines Zweipunktreglers	22
4.14	Geschlossener Regelkreis bei einem Zweipunktregler	22
4.15	Platine des Steuergeräts für den PCC	23
4.16	Steuergerät PCC mit Kunststoffgehäuse	23
5.1	Vergaser mit eingebautem Piezo-Modul	24
5.2	Aufbau des Motors auf dem Motorenprüfstand	25
5.3	Prüfstand Hauptdialog Vita	26
5.4	Kleinkraftrad auf dem Abgasrollenprüfstand	27
5.5	Grafische Darstellung der CO-Emissionen	28
5.6	Grafische Darstellung der NO _x -Emissionen	29
5.7	Grafische Darstellung der HC-Emissionen	29
5.8	Performance und Lambdaverläufe beim Seriensystem	30
5.9	Muscheldiagramm zur Darstellung der CO-Emission	31
5.10	Muscheldiagramm zur Darstellung der NO _x -Emission	31
5.11	Muscheldiagramm zur Darstellung der HC-Emission	32
5.12	Muscheldiagramm des spezifischen Kraftstoffverbrauchs	32
5.13	Kennfelder mit nicht optimierter PCC-Regelung	33
5.14	Kennfelder mit optimierter PCC-Regelung	34
5.15	Muscheldiagramm zur Darstellung der CO-Emission mit PCC	35
5.16	Muscheldiagramm zur Darstellung der NO _x -Emission mit PCC	35
5.17	Muscheldiagramm zur Darstellung der HC-Emission mit PCC	36
5.18	Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs mit PCC	36
5.19	Grafische Darstellung der CO-Emission mit Originalsystem	37
5.20	Grafische Darstellung der NO _x -Emission mit Originalsystem	38
5.21	Grafische Darstellung der HC-Emission mit Originalsystem	38
5.22	Grafische Darstellung der CO-Emission mit Breitbandlambdasonde	39
5.23	Grafische Darstellung der NO _x -Emission mit Breitbandlambdasonde	39
5.24	Grafische Darstellung der HC-Emission mit Breitbandlambdasonde	40
5.25	Grafische Darstellung der CO-Emission mit Sprunglambdasonde	40
5.26	Grafische Darstellung der NO _x -Emission mit Sprunglambdasonde	41
5.27	Grafische Darstellung der HC-Emission mit Sprunglambdasonde	41
5.28	CO-Emission mit Breitbandlambdasonde aus TÜV Prüfung	42

5.29	NO _x -Emission mit Breitbandlambdasonde aus TÜV Prüfung	43
5.30	HC-Emission mit Breitbandlambdasonde aus TÜV Prüfung	43
5.31	CO-Emission mit Sprunglambdasonde aus TÜV Prüfung	44
5.32	NO _x -Emission mit Sprunglambdasonde aus TÜV Prüfung	44
5.33	HC-Emission mit Sprunglambdasonde aus TÜV Prüfung	45
5.34	HC-CO-Emissionen bei unterschiedlichen Konfigurationen	45
5.35	NO _x -CO-Emissionen bei unterschiedlichen Konfigurationen	46
5.36	Kraftstoffverbrauch bei unterschiedlichen Konfigurationen	46
5.37	Integration des PCC Systems im Fahrzeug	47
6.1	Jährliche CO ₂ -Einsparpotentiale bei 100% Einsatz der PCC Technologie	52

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Begriff	physikalische Einheit
α_B	Hydraulischer Brennstoffdurchflussbeiwert [-]
α_L	Hydraulischer Luftdurchflussbeiwert [-]
A_B	Geometrische Strömungsfläche der Brennstoffdüse [m ²]
A_L	Geometrische Strömungsfläche des Lufttrichter [m ²]
ε	Kompressionsmodul der Luft [-]
ECER040	Europäischer Abgastest [-]
EU I	Europäischer Abgasgrenzwert [-]
EU II	Europäischer Abgasgrenzwert [-]
EU III	Europäischer Abgasgrenzwert [-]
CO	Kohlenmonoxid [-]
CO	Wegbezogener Kohlenmonoxidmassenausstoß [g/km]
CO ₂	Kohlendioxid [-]
CO ₂	Wegbezogener Kohlendioxidmassenausstoß [g/km]
Δp_B	Druckdifferenz des Brennstoffs über Brennstoffhauptdüse [Pa]
Δp_L	Druckdifferenz der Luft über Lufttrichter [Pa]
HC	Kohlenwasserstoffe [-]
HC	Wegbezogener Kohlenwasserstoffmassenausstoß [g/km]
H ₂ O	Wasser [-]
K_R	Proportionalanteil (Kreisverstärkung) eines PID-Reglers [-]
Lkw	Lastkraftwagen [-]
L_{St}	Stöchiometrische Konstante [-]
λ	Lambda (Luft-Kraftstoffgemisch) [-]
\dot{m}_B	Brennstoffmassenstrom [kg/s]
\dot{m}_L	Luftmassenstrom [-]
N ₂	Stickstoff [-]
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus [-]
NO _x	Stickoxide [-]
PCC	Piezo Controlled Carburettor (Piezo-Vergaser) [-]
PID	Proportional-Integral-Differential-Regler [-]
Pkw	Personenkraftwagen [-]
ρ_B	Dichte des Brennstoffs [kg/m ³]
ρ_L	Dichte der Luft [kg/m ³]
SFC	Spezifischer Kraftstoffverbrauch [kg/kWh]
V _H	Hubvolumen des Motors [m ³]
T _D	Konstante des Differenzialanteils eines PID-Reglers [-]
T _i	Konstante des Integralanteils eines PID-Reglers [-]
ZrO ₂	Zirkonoxid [-]

1. Zusammenfassung

An einem indischen Kleinkraftrad (Typ Glamour 125 von Hero Honda) mit einem luftgekühlten 125 ccm Einzylindermotor konnte im oben genannten Projekt das Potential der PCC Technologie zur Reduktion der umweltschädlichen gasförmigen Abgaskomponenten (CO, HC und NO_x) sowie des Kraftstoffverbrauchs (und damit der CO₂ Emissionen) dargestellt werden.

Das Betriebsverhalten sowohl des Originalmotors als auch des mit einem PCC-System ausgerüstete Motors wurden untersucht. Hierbei konnte im stationären Betrieb des Motors auf einem dynamischen Motorprüfstand im Rohabgas die Reduktion der Kohlenwasserstoffe (25%) und des Kohlenmonoxids (66%) nachgewiesen werden. Lediglich die Stickoxide blieben auf gleichem Niveau. Zusätzlich konnte die Motorperformance, bei gleichzeitiger Absenkung des Kraftstoffverbrauchs um 5%, leicht gesteigert werden.

Der Motor wurde darüber hinaus im dynamischen Betrieb (neuer europäischer Fahrzyklus NEFZ (ECE R040)) untersucht. Auch im dynamischen Betrieb zeigten sich mit dem PCC-System deutliche Verbesserungen im CO- (-27 %) und HC-Ausstoß (-51 %). Die NO_x-Emissionen blieben auch hier auf einem mit dem Originalsystem vergleichbaren Niveau. Der Kraftstoffverbrauch lies sich hierbei um 8 % absenken.

Die Untersuchung mit dem Originalsystem auf dem Rollenprüfstand im EURO III Test ergab, dass das Originalsystem aufgrund zu hoher HC-Emissionen den EURO III Test nicht bestanden hat (HC=0,8932 g/km, CO=1,8161 g/km und NO_x= 0,1368 g/km). Im Vergleich hierzu hat das Motorrad, das mit dem PCC System ausgerüstet ist, den Test jedoch eindeutig bestanden (HC=0,3403 g/km, CO= 1,1396 g/km und NO_x= 0,142 g/km) und gleichzeitig 10,4 % weniger Kraftstoff verbraucht.

Die indische Originalkonfiguration des Antriebs nutzt einen Oxidationskatalysator, der unter Zuhilfenahme eines Sekundärluftsystems auf die Oxidation der HC- und CO-Emissionen optimiert ist. Hierfür sprechen auch die geringen Konvertierungsraten (CO=59%, HC=56% und NO_x=33%) des originalen Katalysators im Lambda=1 Betrieb. Im Vergleich zu den EU III Grenzwerten (HC= 0,8 g/km ,CO= 2,0 g/km und NO_x= 0,15 g/km) könnte das PCC System mit einem optimierten Katalysator weitere Potentiale zur Unterschreitung zukünftiger Abgasgrenzwerte erschließen.

Für alle Versuche mit dem PCC-System konnte auf das originale Sekundärluftsystem verzichtet werden, weil eine Nutzung die Gemischbildung durch Lambdamessung im Abgas verfälschen würde. Der durch den Wegfall des Sekundärluftsystems (Ventil, Schläuche und Schlauchstutzen) resultierende Kostenvorteil erlaubte die Substitution der PCC-Systemkosten und macht sich positiv in den Gesamtkosten bemerkbar.

Neben den guten Prüfergebnissen konnte im realen Fahrbetrieb keine Beeinträchtigung der Fahrdynamik, des Fahrkomforts oder der Alltagstauglichkeit festgestellt werden. Die Erhöhung der motorischen Leistung und die Verbesserung in der Leistungsentfaltung durch die verbesserte Gemischbildung machte sich im Fahrversuch positiv bemerkbar.

2. Einleitung

Der Einsatz von Verbrennungsmotoren ist aufgrund der unvollkommenen Verbrennung mit dem Ausstoß von schädlichen Abgasen verbunden. Wegen der weltweit steigenden Nutzung von verbrennungsmotorischen Antrieben wurden zum Schutz der Menschen und der Umwelt gesetzliche Grenzwerte vereinbart, die in regelmäßigen Abständen hinsichtlich des technischen Fortschritts überprüft und gegebenenfalls verschärft werden.

Zunächst stand die Abgasentgiftung von Fahrzeugantrieben (Pkw und Lkw) im Fokus der Emissionsgesetzgebung. In diesem Bereich sind unbestritten deutliche Erfolge erzielt worden. Durch diese Erfolge wurde die Aufmerksamkeit auf weitere verbrennungsmotorisch angetriebene Applikationen („Non Road“ Anwendungen) gelenkt. Hierzu zählen u.a. handgehaltene Maschinen und stationäre Antriebe. Der Gesetzgeber hat entsprechend reagiert und Emissionsgrenzwerte für diese Applikationen erlassen /2.1/,/2.2/. Andere bereits bestehende Emissionsgrenzwerte z.B. für Kleinkrafträder ($V_H < 150$ ccm) werden derzeit verschärft /2.3/.

Die globale Verteilung von Non Rod Anwendungen ist nicht homogen. In Europa, USA und Japan liegt der Schwerpunkt bei den handgehaltenen Arbeitsmaschinen, in Asien (China und Indien) dominieren die Zweiräder mit kleinem Hubraum ($V_H < 200$ ccm). Zum einen dienen diese Fahrzeuge dort zur Befriedigung der individuellen Mobilität und zum anderen sind die Volumenproduzenten in diesen Ländern ansässig (vgl. **Abbildung 2.1**).

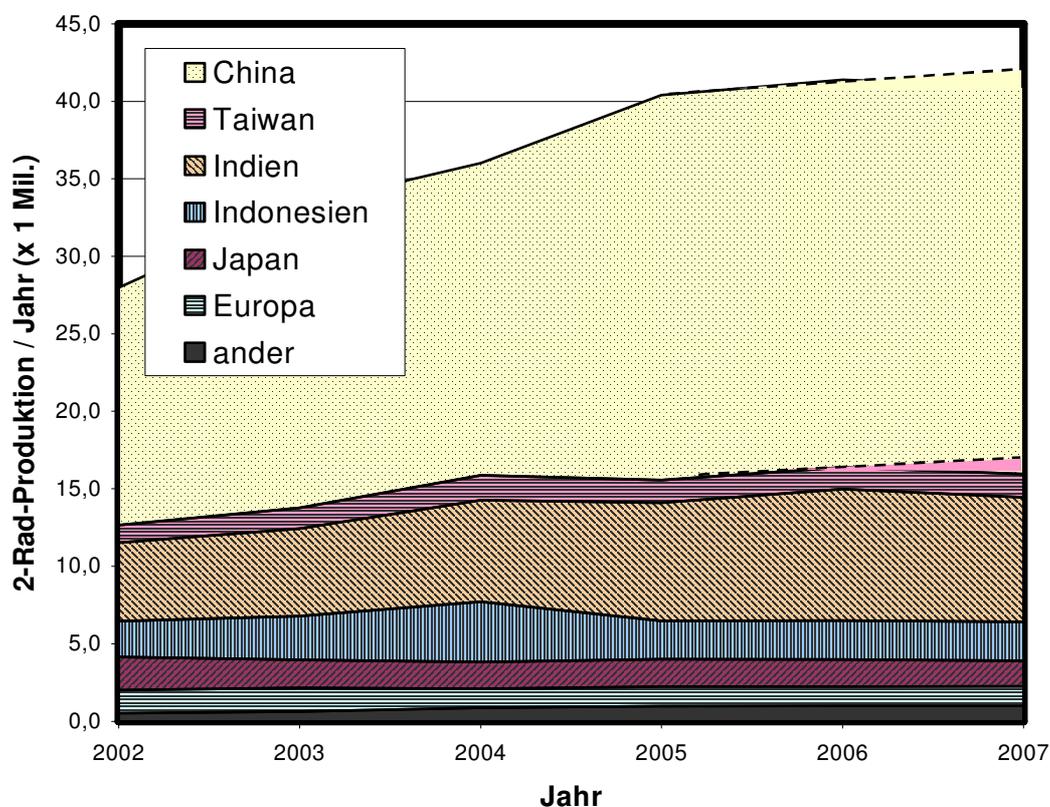


Abbildung 2.1: Globale Produktionszahlen von Zweirädern /2.4/

Auch in Europa ist seit dem Preisanstieg bei den Kraftstoffen eine steigende Nutzung der Kleinkrafträder festzustellen, was auf den Umstieg vom Pkw auf das Kleinkraftrad oder Motorroller vermuten lässt. Neben den Produkten europäischer Hersteller wird

der Konsum durch einen starken Import von Zweirädern aus Asien gedeckt. Ohne Verschärfung der Emissionsgrenzwerte ist mit einer höheren Umweltbelastung durch diese Kleinkrafträder zu rechnen. Die Umweltbelastung durch die Kleinkrafträder hat somit eine nicht zu vernachlässigende globale Dimension.

Neben den gesetzlich limitierten Abgaskomponenten (CO, HC und NO_x) sind die Treibhausgase insbesondere das Kohlendioxid (CO₂) wegen ihres Beitrages zur globalen Erwärmung in das öffentliche Interesse getreten. Die Emission von CO₂ ist jedoch direkt mit dem Kraftstoffverbrauch der Verbrennungsmotoren verknüpft, so dass neben der Emissionsdiskussion auch eine Kraftstoffverbrauchsdiskussion angeregt wurde.

Die Automobilindustrie hat leistungsstarke Technologien (elektronische Einspritzung und aktive Abgasmachbehandlungssysteme) entwickelt und in den Markt gebracht, um die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch zu senken. Aufgrund technischer und kommerzieller Randbedingungen lassen sich die Lösungen der Automobilindustrie nicht uneingeschränkt auf diese Applikationen anwenden. Insbesondere bei handgehaltenen Arbeitsmaschinen, Industrieantrieben, Kleinkrafträdern usw. ist der Einsatz der Einspritztechnik aufgrund der Kosten und der benötigten elektrischen Leistungsaufnahme fragwürdig.

VEMAC hat aus diesem Grund den piezoelektrisch geregelten Vergaser (PCC) entwickelt. Es handelt sich hierbei um ein System, das mit Hilfe einer Lambda-Regelung den Kraftstoffmassenstrom in einem Vergaser bedarfsgerecht (emissionsgerecht) regelt. An mehreren Applikationen, z.B. einem 4-Zylinder-Motor oder einem tragbaren Notstromaggregat mit einem 1-Zylinder-Motor konnte die positive Wirkung der PCC-Technik nachgewiesen werden /2.5/.

Die höchsten Anforderungen an die PCC Technologie stellt z.Zt. die Zielapplikation Zweirad. Zum Einen sind die EU III Grenzwerte für Kleinkrafträder im Vergleich zu den geltenden Emissionsgrenzwerten für die Non Road Applikationen deutlich schärfer und zum Anderen ist der Testzyklus (ECE R040, NEFZ) bedeutend dynamischer und damit anspruchsvoller.

Die PCC Technologie könnte uneingeschränkt dem Zielmarkt (Non Road Anwendungen und Kleinkrafträder) angeboten werden, wenn der Nachweis der EU III-Fähigkeit gelingt. Zu diesem Zweck ist in diesem Vorhaben die Ausrüstung eines Zweirades aus dem Zielmarkt mit der PCC Technologie vorgesehen. Mit Hilfe umfangreicher Prüfstands- und Fahrversuche soll die Eignung untersucht werden und wenn möglich ein positiver Nachweis erbracht werden.

3. Aufgabenstellung

Im vorliegenden Projekt soll das Potential der PCC-Technik zur Unterschreitung der anspruchsvollen EU III Grenzwerte für Kleinkrafträder ($V_H < 150 \text{ ccm}$) /2.3/ untersucht und wenn möglich nachgewiesen werden. Als Versuchsträger wurde ein Kleinkraftrad vom Typ Glamour des indischen Herstellers Hero Honda gewählt (**Abbildung 3.1**).



Abbildung 3.1: Das Kleinkraftrad Hero Honda Glamour im Originalzustand

Als Technologien zur Reduktion der umweltbelastenden Abgaskomponenten verfügt das Kleinkraftrad in der Serienausführung über eine elektronische Zündung, ein Sekundärluftsystem und einen Katalysator.

Ziel der Arbeit ist es einen Nachweis zu erbringen, dass die PCC Technologie geeignet ist, Applikationen mit hohen Anforderungen an die Motorendynamik und an die Breite des motorischen Betriebsbereiches in Bezug auf die Abgasentgiftung darzustellen. Das Kleinkraftrad wird hierzu mit der PCC Technologie ausgerüstet und auf Prüfständen und im realen Fahrbetrieb untersucht.

Für das ausgewählte Kleinkraftrad Glamour 125 gelten die Projektziele in Bezug auf Abgasemissionen, dass die EU III Grenzwerte unterschritten werden müssen.

4. Grundlagen oder vorangegangene Arbeiten

4.1 Abgasgesetzgebung für Kleinkrafträder in der Europäischen Union

Mit dem Inkrafttreten der Richtlinie 97/24/EG gelten seit 1997 für Motorräder und Mopeds europaweit festgelegte Abgasgrenzwerte (EU 0), deren Ziel die Reduktion gasförmiger Schadstoffe und luftverunreinigender Partikel in den Abgasen von Verbrennungsmotoren ist. Diese Abgasvorschriften wurden kontinuierlich verschärft. In **Abbildung 4.1** ist die Entwicklung der einzuhaltenden Abgasgrenzwerte dargestellt. Vergleichbare Gesetze zur Schadstoffbegrenzung an Zweirädern sind auch in anderen Regionen der Erde erteilt worden, so z.B. in den USA, in China und Indien.

	Euro I	Euro II	Euro III
Typprüfung	seit 17. Juni 1999	seit 1. April 2003	seit 1. Januar 2006
CO g/km	8	5,5	2
NOx g/km	0,1	0,3	0,15
HC g/km	4	1,2	0,8

Abbildung 4.1: Entwicklung der Emissionsgrenzwerte nach 97/24/EG

So muss ein Fahrzeug heute in der Europäischen Gemeinschaft die Typgenehmigung für zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge (< 150 ccm) nach der erweiterten Richtlinie 97/24EG gemäß Euro III erfolgen. Diese Werte beziehen sich für den Versuchsträger auf den Stadtfahrzyklus, der auf einem Rollenprüfstand simuliert wird. Hierbei wird das Prüffahrzeug von einem besonders geschulten Fahrer gefahren. Der Stadtfahrzyklus besteht aus sechs aufeinanderfolgenden Teilzyklen, dargestellt in **Abbildung 4.2**.

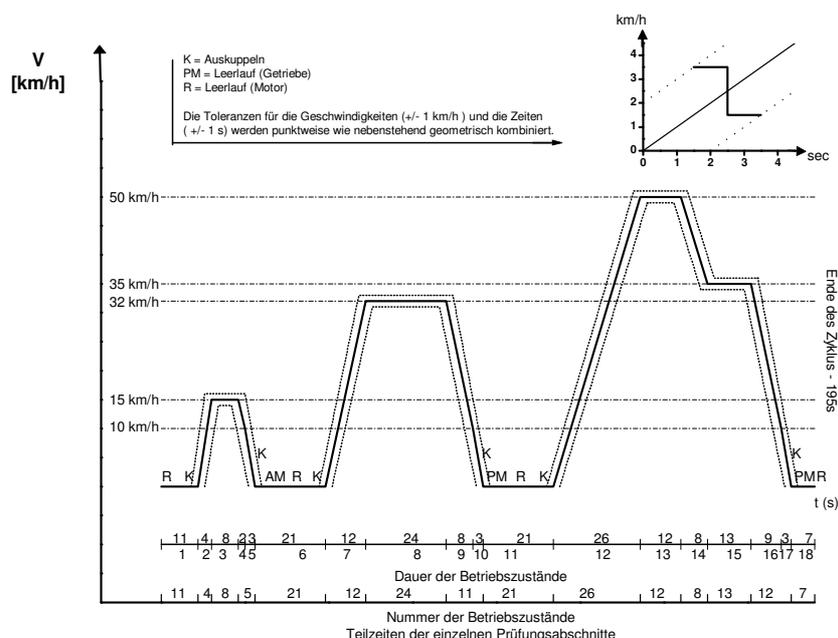


Abbildung 4.2: Teilzyklus des Stadtfahrzyklus nach 97/24/EU3

Ein Teilzyklus dauert 195 s. Das dabei entstehende Abgas wird in speziellen Beuteln aufgefangen (CVS-Anlage). Nach dem der Stadtfahrzyklus beendet ist, werden die Beutelmassen ausgewertet und in den spezifischen Wert (g/km) umgerechnet.

Fahrzyklus auf dem Rollenprüfstand								
Nr.	Betriebszustand	Prüfungsabschnitt	Beschleunigung [m/s ²]	Geschwindigkeit [km/h]	Dauer jedes		Zeitsummen [s]	Bei Schaltgetriebe zu verwendender Gang
					Betriebszustands [s]	Prüfungsabschnitts [s]		
1	Leerlauf	1			11	11	11	6 s PM/5 s K ⁽¹⁾
2	Beschleunigung	2	1,04	0 - 15	4	4	15	Gemäß 2.3.
3	konstante Geschwindigkeit	3		15	8	8	23	Gemäß 2.3.
4	Verzögerung	4	-0,69	15 - 10	2	5	25	Gemäß 2.3.
5	Verzögerung, Motor ausgekuppelt		-0,92	10 - 0	3		28	K
6	Leerlauf	5			21	21	49	16 s PM/5 s K
7	Beschleunigung	6	0,74	0 - 32	12	12	61	Gemäß 2.3.
8	konstante Geschwindigkeit	7		32	24	24	85	Gemäß 2.3.
9	Verzögerung	8	-0,75	32 - 10	8	11	93	Gemäß 2.3.
10	Verzögerung, Motor ausgekuppelt		-0,92	10 - 0	3		96	K
11	Leerlauf	9			21	21	117	16 s PM/5 s K
12	Beschleunigung	10	0,53	0 - 50	26	26	143	
13	konstante Geschwindigkeit	11		50	12	12	155	Gemäß 2.3.
14	Verzögerung	12	-0,52	50 - 35	8	8	163	Gemäß 2.3.
15	konstante Geschwindigkeit	13		35	13	13	176	Gemäß 2.3.
16	Verzögerung	14	-0,68	35 - 10	9	12	185	K
17	Verzögerung, Motor ausgekuppelt		-0,92	10 - 0	3		188	
18	Leerlauf	15			7	7	195	7 s PM

⁽¹⁾ PM: Getriebe in Leerlaufstellung, Motor eingekuppelt.
K: Motor ausgekuppelt.

Abbildung 4.3: Auszug aus der Richtlinie 27/24/EG

4.2 Abgasverhalten von Ottomotoren

Die Abgasbestandteile von Ottomotoren sind zum größten Teil Stickstoff, Wasser und Kohlendioxid. Die wesentlichen gasförmigen Schadstoffe Stickoxide (NO_x), Kohlenmonoxid (CO) und Kohlenwasserstoffe (HC) machen nur einen geringen Anteil aus. Die Mengenanteile dieser drei Schadstoffe hängen dabei von dem Verbrennungsluftverhältnis (λ =Lambda) ab. Diese Zusammenhänge werden bei der Betrachtung von **Abbildung 4.4** deutlich. Der Lambdawert ist eine wichtige Kenngröße bei der Beurteilung von motorischen Verbrennungsprozessen und kann z.B. mittels Lambdasonde im Abgasstrom gemessen werden. Er gibt indirekt Auskunft über die Kraftstoff-Luftzusammensetzung der vorangegangenen Verbrennung. Eine magere Verbrennung ($\lambda > 1$) weist auf Luftüberschuss während der Verbrennung hin, d.h. es stand mehr Luft zur Verfügung, als benötigt wurde. Bei einer fetten Verbrennung ($\lambda < 1$) stand während der Verbrennung weniger Luft zu Verfügung. Ferner ist das Kraftstoff - Luftgemisch unterhalb von $\lambda = 0,7$ und oberhalb von $\lambda = 1,5$ unter normalen Bedingungen nicht mehr zündfähig. Dies macht sich im Motorbetrieb durch Verbrennungsaussetzer und unruhige Laufeigenschaften bemerkbar. /4.1/

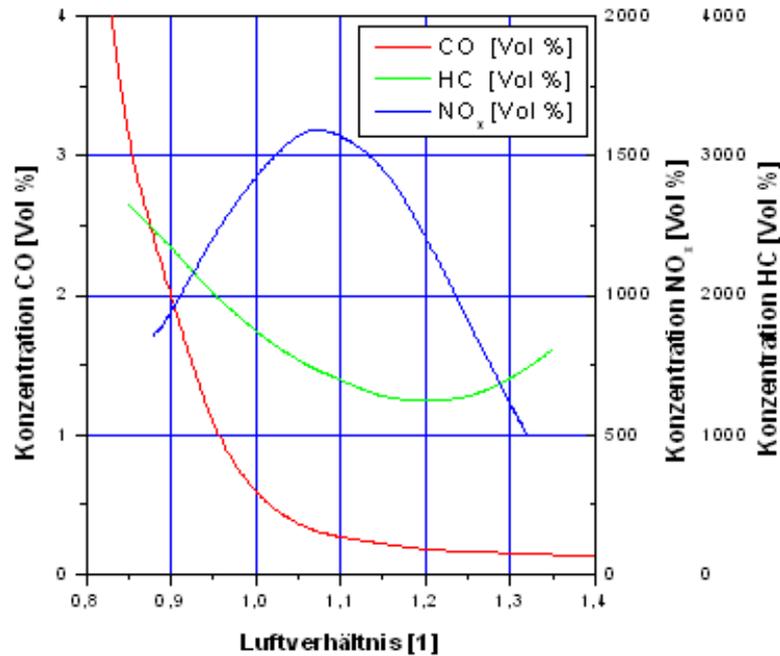


Abbildung 4.4: Schadstoffkomponenten beim Ottomotor im Rohgas /4.1/

Die Konzentration der CO-Emission ist in erster Linie eine Funktion des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses, wie in **Abbildung 4.4** zu erkennen ist. Bei einem fetten Gemisch ($\lambda < 1$) entsteht grundsätzlich Kohlenmonoxid (CO) als Produkt der unvollständigen Oxidation.

Die Stickoxidbildung (NO_x) wird durch hohe Temperaturen während der Verbrennung gefördert. Das Maximum dieser Konzentration tritt jedoch nicht unbedingt bei dem Luftverhältnis mit den höchsten Verbrennungstemperaturen auf, es liegt im mageren Bereich ($\lambda = 1,1$). Der Grund hierfür ist, dass zur NO_x -Bildung auch eine genügend hohe Sauerstoffkonzentration im umgesetzten Kraftstoffluftgemisch erforderlich ist.

Im Gegensatz zu den NO_x - und CO-Emissionen wird das Niveau der HC-Rohemissionen deutlich stärker durch konstruktive Motorparameter beeinflusst. Kohlenwasserstoffe (HC) verbrennen (ausreichend Sauerstoff vorausgesetzt) fast vollständig. So können die Kohlenwasserstoffe im Abgas nur aus Zonen stammen, die nicht vollständig von der Verbrennung erfasst wurden.

Aufgrund der unvollkommenen Verbrennung im realen Ottomotor werden weitere technische Maßnahmen notwendig, um die Emissionen abzusenken. Der Drei-Wege-Katalysator stellt das zur Zeit wirkungsvollste System zur Abgasnachbehandlung und damit zur Schadstoffreduzierung bei Otto-Motoren dar. Dieser Katalysator muss

- Kohlenmonoxid (CO) zu Kohlendioxid (CO_2) oxidieren
- Kohlenwasserstoffe (HC) zu Kohlendioxid (CO_2) und Wasserdampf (H_2O) oxidieren
- Stickoxid (NO_x) in Stickstoff (N_2) und Wasserdampf (H_2O) reduzieren

Beim „geregelt“en Drei-Wege-Katalysator wird durch eine Lambda-Sonde das Luft-Kraftstoff-Verhältnis gemessen und durch ein Dosierorgan ein stöchiometrisches Kraftstoff-Luftgemisch ($\lambda = 1$) eingestellt. Bei modernen Drei-Wege-Katalysatoren liegen die Konvertierungsraten für alle drei oben genannten Schadgasen deutlich über 90 %.

Bei der Nutzung eines Katalysators mit unregelmäßigem Kraftstoff-Luftgemisch liegen durch die unterschiedlichen Luftüberschusszahlen die Konvertierungsraten erheblich tiefer. Bei der Betrachtung von **Abbildung 4.5** kann man das schmale Fenster um $\lambda = 1$, in dem die optimale Konvertierung erreicht wird, deutlich erkennen.

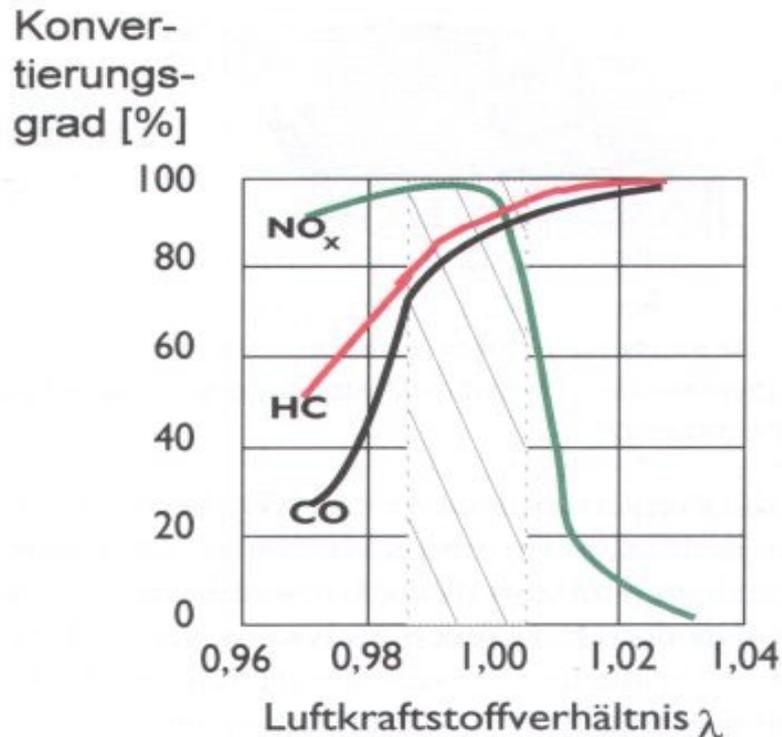


Abbildung 4.5: Konvertierungsgrad eines 3-Wege-Katalysators in Abhängigkeit vom Luftkraftstoffverhältnis λ /4.2/

Dieses Konvertierungsverhalten eines 3-Wege-Katalysators bedingt eine Regelung, um die anspruchsvollen Abgasgrenzwerte (z.B. EU III) in der Praxis zu realisieren.

4.3 Funktion des Piezo-Moduls

Die prinzipiellen Zusammenhänge der Vergaserfunktion und die Rolle des Piezo-Moduls sollen am sogenannten „Prinzipvergaser“ dargestellt und nachstehend erläutert werden.

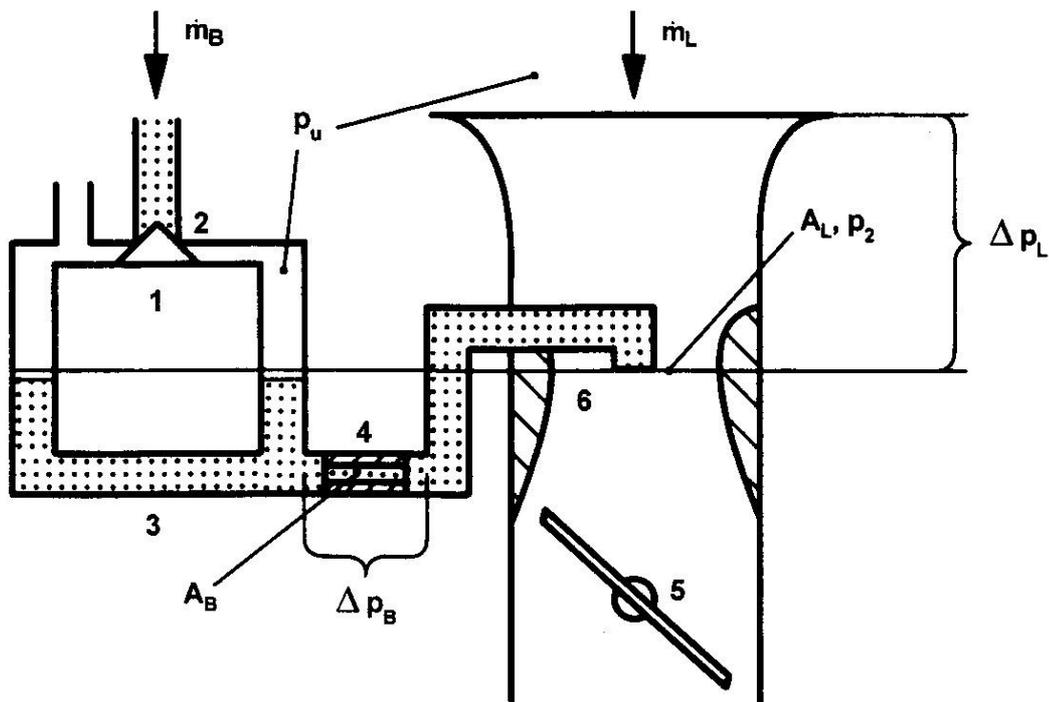


Abbildung 4.6: Darstellung eines Prinzipvergaser /2.4/

Die Gemischzusammensetzung des Prinzipvergaser ist nach Gl. 4.1 definiert zu:

$$\lambda = \frac{m_L}{m_B L_{St}} = \frac{\alpha_L A_L \varepsilon}{\alpha_B A_B L_{St}} \sqrt{\frac{\Delta p_L \rho_L}{\Delta p_B \rho_B}} \quad \text{Gl. 4.1}$$

Nach Gl. 4.1 ist eine Steuerung der Gemischzusammensetzung auf zwei Wegen zu erzielen. Durch eine Steuerung der Luftmasse m_L oder durch Steuerung der Brennstoffmasse m_B . Eine Steuerung der Luftmasse führt zwangsläufig auch zu einer Beeinflussung der Motorleistung, da die gleiche Funktion auch durch die Drosselklappe (Quantitätsregelung) erreicht wird. Ohne präzise Luftregelung hat diese Form der Gemischregelung einen direkten, meist negativen Einfluss auf die Laufruhe des Otto-Motors (Bonanza-Effekt). Dieser Nachteil kann durch die Steuerung der Brennstoffmasse vermieden werden. Am einfachsten erfolgt die Steuerung der Brennstoffmasse m_B durch die Veränderung des Strömungswiderstands der Kraftstoffhauptdüse. Bei einem stöchiometrischen Kraftstoffluftgemisch ($\lambda=1$) ist das Verhältnis von Brennstoff- zu Luftmasse ca. 14,7. Daraus folgt zwangsläufig, dass die Präzision der Brennstoffmassensteuerung 14,7-mal größer sein muss, als die Steuerung der Luftmasse durch die Drosselklappe. Diese Präzision erfordert entsprechend genaue Steller (Aktuatoren).

Eine einfache technische Realisierung verspricht die Änderung der geometrischen Fläche A_B durch eine variierbare Kraftstoffdüse. Dieses wird unter Verwendung eines piezoelektrischen Aktuators realisiert und so die benötigte Genauigkeit bei der Dosierung erreicht.

4.4 Lambdasonden

Der Lambdawert wird mit Hilfe von Lambda-Sonden im Abgasstrom gemessen, wobei nach zwei verschiedenen Sondentypen und deren Messanordnung unterschieden wird. Beiden Typen gemein ist die Messung der Sauerstoffkonzentration im Abgasstrom basierend auf der Nernst-Gleichung. Dazu verwendet man ein Zirkondioxid (ZrO_2), das bei Temperaturen oberhalb von ca. 350 °C für Sauerstoffionen leitend wird. Befinden sich auf beiden Seiten der ZrO_2 -Schicht unterschiedliche Sauerstoffpartialdrücke, so kann diese Differenz in Form einer Spannung über dieser Schicht abgegriffen werden, die Rückschlüsse auf den Lambdawert zulässt.

Binäre Lambdasonden :

Aufbau und Messanordnung dieses Typs, auch Zweipunkt-Lambda-Sonde genannt, sind in **Abbildung 4.7** dargestellt.

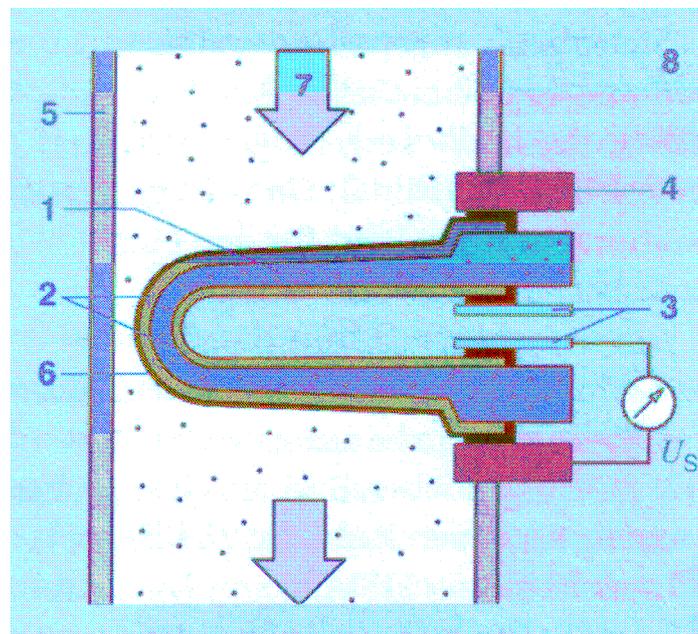


Abbildung 4.7: Binäre Lambdasonde /4.3/

Durch das Abgasrohr (5) strömt das vom Motor kommende Abgas (7) und trifft dabei auf die Lambdasonde. Diese besteht aus einem einseitig geschlossenen, gasundurchlässigen Keramikkörper (1), dessen Oberflächen beidseitig mit Elektroden (2) aus einer dünnen porösen Platinschicht versehen sind. Auf der ins Auspuffrohr ragenden Elektrode ist zusätzlich eine poröse Keramikschicht (6) zum Schutz gegen Verschmutzung aufgebracht. Die Lambdaspaltung U_s kann über die Kontakte (3) und (4) abgegriffen werden. Die Elektrode auf der Innenseite des Keramikkörpers hat Kontakt zur Außenluft (8), so dass der Sauerstoffpartialdruck zwischen Außenluft und Abgas gemessen wird. Da selbst bei fettem Motorbetrieb ($\lambda < 1$) noch Restsauerstoff im Abgas vorhanden ist ($\lambda = 0,95$: 0,2-0,3 Volumenprozent), kann eine Spannung an den Elektroden gemessen werden. /4.3/

Für den Einsatz in der Lambda-Regelung muss die Sonde möglichst schnell ihre Betriebstemperatur erreichen. Unbeheizte Sonden sind dabei auf die Erwärmung durch den Abgasmassenstrom angewiesen, der je nach Motorlast schwankt.

Hingegen erreichen beheizte Sonden aufgrund ihres Heizelements schon nach 20-30 s ihre optimale Betriebstemperatur, die dann dauerhaft gehalten wird.

Binäre Lambdasonden erlauben eine Bewertung, ob ein fettes ($\lambda < 1$) oder ein mageres ($\lambda > 1$) Kraftstoff-Luftgemisch während der Verbrennung vorlag. Somit sind sie für eine Lambda-Regelung geeignet. Die sprunghafte Kennlinie in **Abbildung 4.8** zeigt dies deutlich.

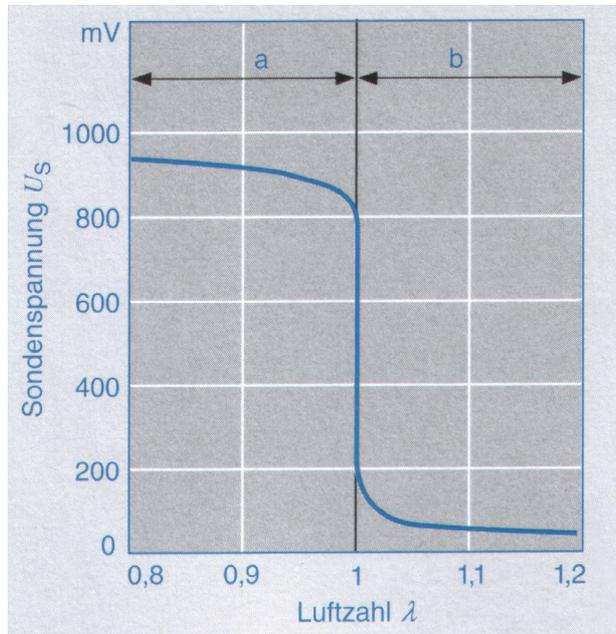


Abbildung 4.8: Kennlinie – Binäre Lambdasonde /4.3/

Lineare Lambdasonden :

Aufbau und Messanordnung dieses Sondentyps, der auch als Breitband-Lambda-Sonde bezeichnet wird, sind in **Abbildung 4.9** dargestellt.

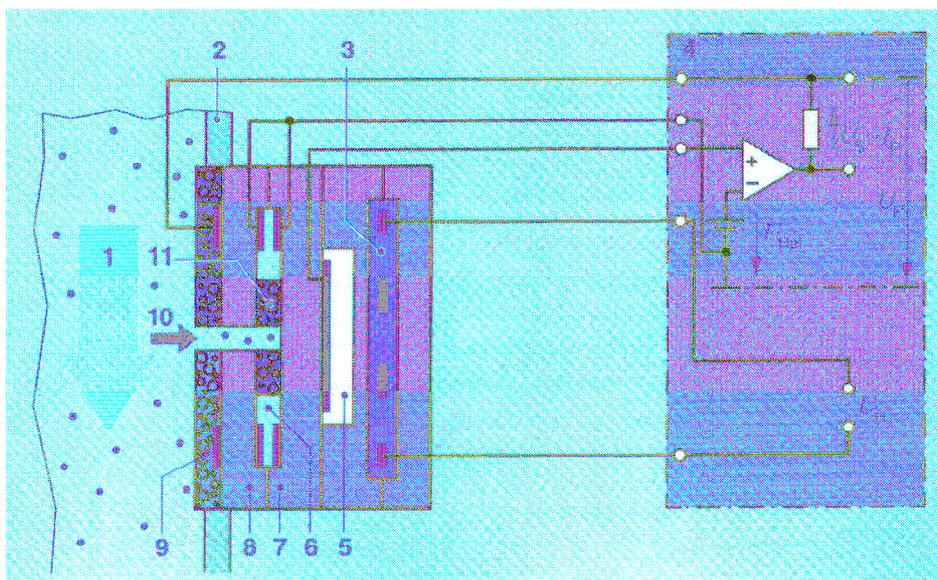


Abbildung 4.9: Lineare Lambdasonde /4.3/

Eine Breitband-Lambda-Sonde ermöglicht, die Messung der Sauerstoffkonzentration über einen großen Lambdabereich. Im Gegensatz zu der Zweipunkt-Lambda-Sonde ändert sich das elektrische Ausgangssignal über den Lambdabereich nicht sprunghaft, sondern steigt stetig an (**Abbildung 4.10**).

Dieser Sondentyp ist deutlich komplexer aufgebaut und benötigt neben einer eigenen Regelelektronik (4) auch ein Heizelement (3), das die für ein brauchbares Ausgangssignal notwendige Betriebstemperatur von mindestens 600...800°C erzeugt. Das Abgas (1) strömt im Abgasrohr (2) an der Sonde vorbei. Durch das Gaszutrittsloch (10) gelangt es in den Diffusionsspalt (6), dem 10...50 µm großen Messraum, der zwischen Sauerstoffpumpzelle (8) und Nernst-Konzentrationszelle (7) liegt. Ein Referenzluftkanal (5), der sich auf der anderen Seite der Konzentrationszelle befindet, ist mit der Umgebungsluft verbunden. Wird die Pumpspannung UP an den Platinelektroden der Pumpzelle angelegt, so kann Sauerstoff aus dem Abgas durch die poröse Diffusionsbarriere (11) hinein- oder herausgepumpt werden. Diese Spannung wird durch eine elektronische Schaltung im Steuergerät so geregelt, dass die Gaszusammensetzung im Diffusionsspalt immer bei $\lambda = 1$ liegt, wobei die Konzentrationszelle als Sensor benutzt wird. Stellen sich Lambdawerte > 1 ein, so pumpt die Pumpzelle den Sauerstoff nach außen (positiver Pumpstrom IP), während bei Lambdawerten < 1 der Sauerstoff in den Abgasspalt gepumpt wird (negativer Pumpstrom IP). Ist ein stöchiometrisches Luftverhältnis ($\lambda = 1$) im Diffusionsspalt vorhanden, so finden keine Pumpvorgänge statt und der Pumpstrom ist gleich Null. Da der Pumpstrom proportional zur Sauerstoffkonzentration ist, kann er als Indikator für den Lambdawert herangezogen werden. /2.4/

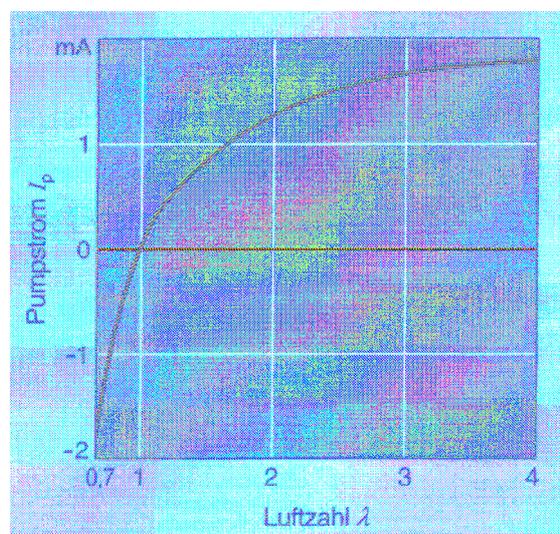


Abbildung 4.10: Kennlinie – Lineare Lambdasonde /4.3/

4.5 Elektronische Regelung

Für die Regelung des Kraftstoff-Luft-Gemisches durch das piezoelektrische Stellglied im modifizierten Vergaser wird ein Regler benötigt. Dieser muss aufgrund des aktuellen Lambdawertes einen entsprechenden Wert für die Steuerspannung des Piezomoduls errechnen, welche dann an den Aktuator gegeben wird und diesen steuert. In **Abbildung 4.11** wird das Prinzip einer solchen Regelung verdeutlicht.

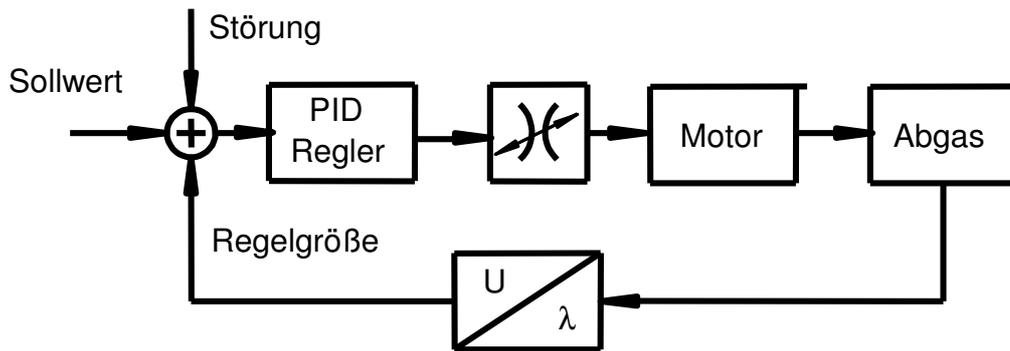


Abbildung 4.11 : Blockschaltbild einer Regelung

4.5.1 PID –Regler

Der PID -Regler zeichnet sich durch seine besonders flexible Anpassbarkeit aus. Dabei kann man sein Verhalten durch die Wahl mehrerer Parameter (K_R , T_D , T_I) beeinflussen. **Abbildung 4.12** zeigt das Strukturbild eines PID - Reglers.

Die einzelnen Teilabschnitte beschreiben mit dem Verstärkungsfaktor K_R den proportionalen, mit der Vorhaltezeit T_I den integralen und mit der Nachstellzeit T_D den differentiellen Anteil am Gesamtregler. Als Eingang für den Regler wird die Regelabweichung als Differenz von Sollwert w und Regelgröße x bestimmt. Die Stellgröße y wird nach der Regelung an das Stellglied weitergegeben. /4.4/

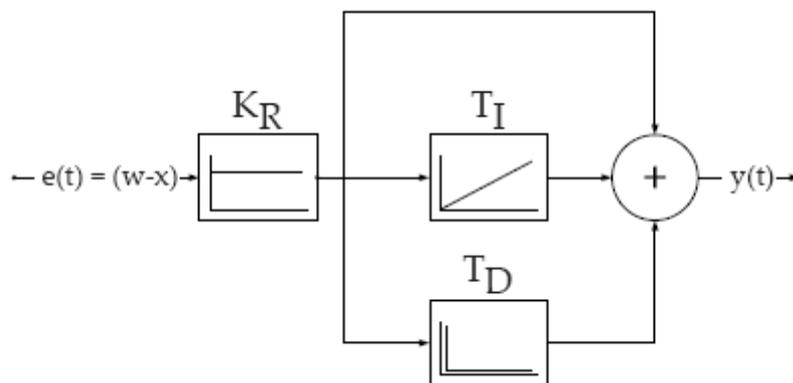


Abbildung 4.12 : Strukturbild eines PID –Reglers /4.4/

4.5.2 Zweipunktregler

Unter einem Zweipunktregler versteht man einen Regler mit zwei Ausgangszuständen. Der Ausgangszustand wird in Abhängigkeit von der Regelgröße in Bezug zu dem Sollwert eingenommen. **Abbildung 4.13** zeigt das Übertragungsverhalten des Zweipunktreglers. Die Hysterese wird verwendet, um ein Schwingen der Regelgröße zu vermindern.

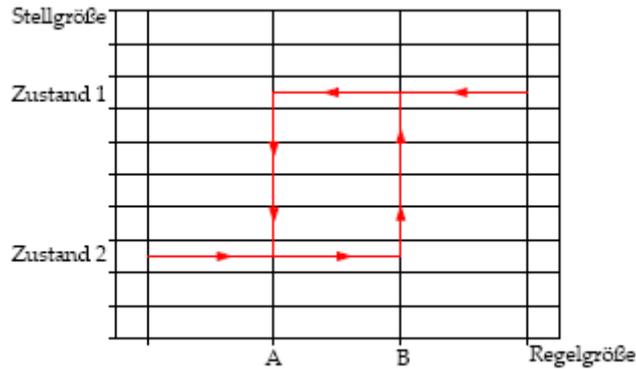


Abbildung 4.13 : Hysteresekurve eines Zweipunktreglers /4.4/

Ist die Regelgröße kleiner als A, so wird die Stellgröße des Reglers auf den Zustand 2 gesetzt. Steigt nun die Regelgröße an und wird größer als B, dann schaltet der Regler von Zustand 2 auf Zustand 1 um. Durch diese Veränderung wird die Kraftstoffzufuhr geändert und der Motor reagiert mit einer Veränderung der Regelgröße (Lambdawert). Wenn nun die Regelgröße unter den Wert von A sinkt, veranlasst der Regler ein erneutes Umschalten von Zustand 1 auf Zustand 2. Der eigentliche Sollwert befindet sich hierbei in dem Bereich zwischen A und B und wird nie genau erreicht.

Die beiden Zustände 1 und 2 stellen in dem verwendeten Konzept eine Erhöhung bzw. eine Verringerung der Steuerspannung des Piezomoduls dar. Ein Parameterwert definiert dabei den Gradienten der Änderung. Den geschlossenen Regelkreis bei Verwendung eines Zweipunktreglers für das genutzte System zeigt **Abbildung 4.14**. Da der Regler nur unterscheidet, ob das Kraftstoff-Luft-Gemisch zu fett oder zu mager ist, wird auf jegliche Regelabweichung immer gleich reagiert. Durch das Anpassen des oben erwähnten Gradienten können starke Schwingungen des Stellwertes vermieden werden./4.4/

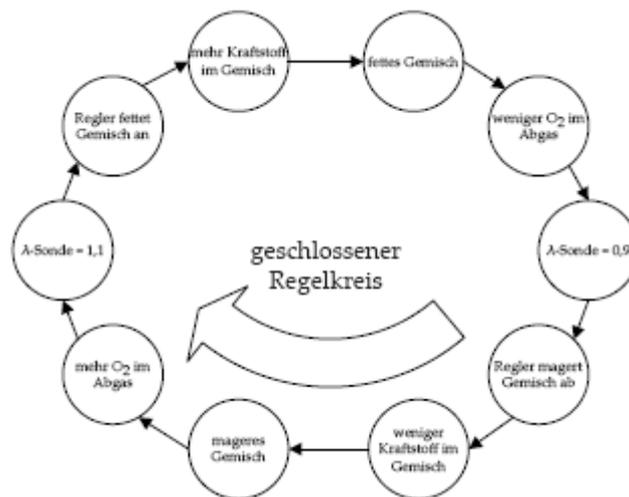


Abbildung 4.14: Geschlossener Regelkreis bei einem Zweipunktregler /4.4/

Abbildung 4.15 zeigt die technische Realisierung beider Regler in Form einer elektronischen Schaltung. Die Festlegung der Reglertopologie erfolgt ausschließlich durch die Software im verwendeten μ Controller.

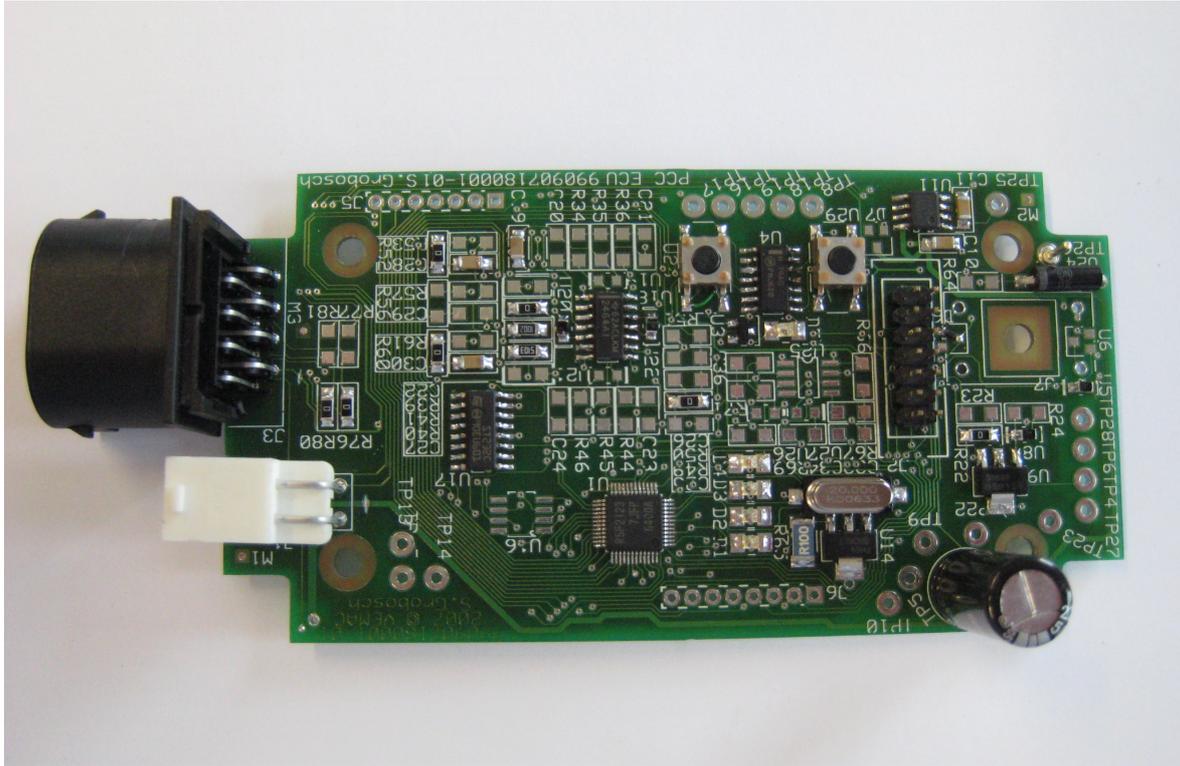


Abbildung 4.15 : Platine des Steuergeräts für den PCC

Abbildung 4.16 zeigt den gleichen Regler in einem Kunststoffgehäuse.



Abbildung 4.16 : Steuergerät mit Kunststoffgehäuse

5. Realisierung des PCC-Systems am Kleinkraftrad

5.1 Integration des Piezo-Moduls in den Vergaser

Das Piezomodul ersetzt die Vergaserhauptdüse durch eine im Querschnitt steuerbare Drossel. Hierdurch lässt sich der Kraftstoffmassenstrom steuern und so das gewünschte Kraftstoffluftverhältnis einstellen. Um dieses Modul in den Schwimmervergaser des Mopeds integrieren zu können, wurde die originale Brennstoffhauptdüse entfernt. Das Piezomodul wurde so gestaltet, dass es die serienmäßige Schwimmerkammer ersetzt. Das Schwimmerkammervolumen bleibt hierbei identisch.

Abbildung 5.1 zeigt den Vergaser mit dem integrierten Piezo-Modul. Hier wurde zu Demonstrationszwecken die originale Schwimmerkammer als Abschluss des Piezo-Moduls montiert, um die Gleichheit der Kammervolumina hervorzuheben.

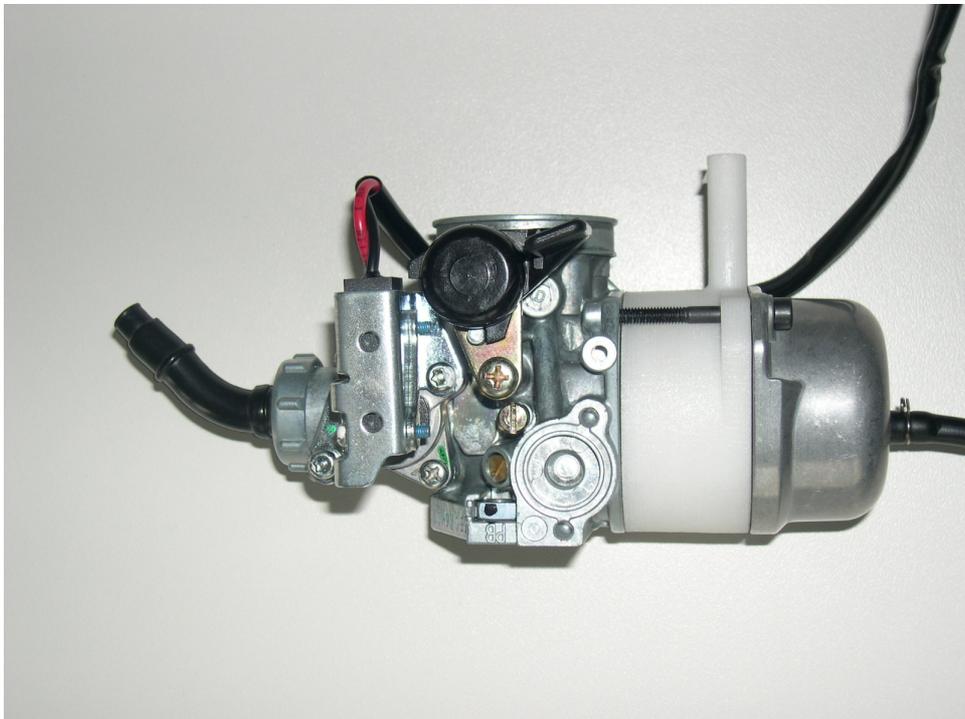


Abbildung 5.1: Vergaser mit eingebautem Piezo-Modul

5.2 Motorprüfstandsumgebung

Abbildung 5.2 zeigt den Verbrennungsmotor auf dem Motorenprüfstand der VEMAC. Neben dem Prüfling ist auch die Belastungseinheit zu erkennen. Diese besteht aus einer elektrischen Maschine, die im 4-Quadrantenbetrieb den Verbrennungsmotor sowohl antreiben (schleppen), als auch belasten (bremsen) kann.

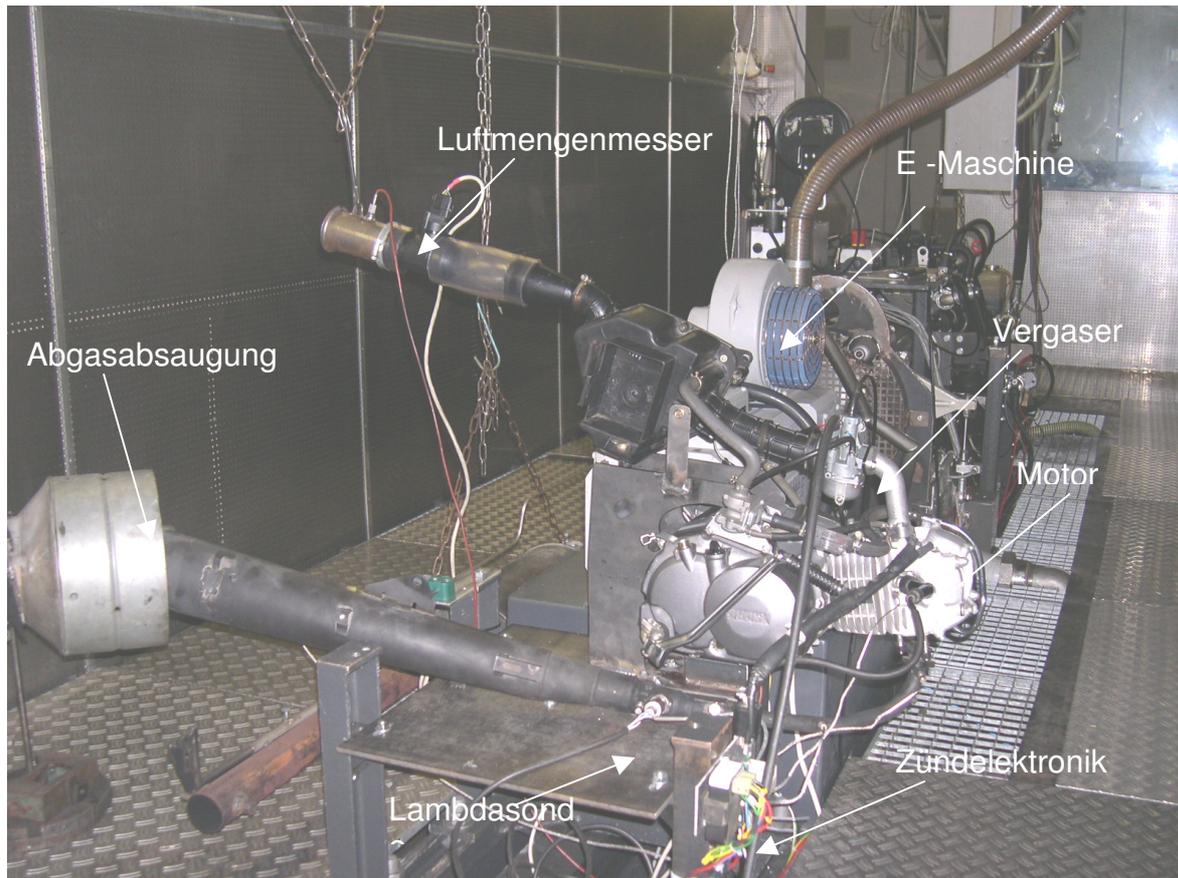


Abbildung 5.2: Aufbau des Motors auf dem Motorenprüfstand

5.2.1 Abgasmesstechnik

Um die limitierten Abgaskomponenten CO, NO_x und HC zu ermitteln, wird eine Abgasanalyseeinrichtung eingesetzt. Die Bestimmung der CO-Mengenanteile erfolgt mittels NDIR (nicht dispersiver Infrarot- Absorptionsanalysator). Die NO_x Konzentration wird mittels CLD (Chemilumineszens-Detektor) bestimmt. Die Kohlenwasserstoffkonzentration (HC) wird mit einem FID (Flammenionisationsdetektor) bestimmt.

5.2.2 Kraftstoffmengenmessung

Für eine genaue Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs wurde in die Kraftstoffzufuhr ein Massendurchflussmesser (Typ SITRANS F C MASS 2100 DI 1.5) nach dem Coriolis-Prinzip /5.1/ eingesetzt.

5.2.3 Mess- und Automatisierungssystem

Der Motorenprüfstand ist mit einem Mess- und Automatisierungssystem (Vita) ausgestattet. Dieses erlaubt die Erfassung und Dokumentation aller wichtigen Motorenkennwerte als auch die notwendigen Betriebsparameter. In **Abbildung 5.3** ist der Hauptdialog von Vita dargestellt, wobei die drei wesentlichen Größen Drehzahl, Drehmoment und Leistung in Rundinstrumenten visualisiert sind. Zur besseren Lesbarkeit werden diese Werte zusätzlich noch in numerischen Anzeigen

dargestellt. Weiterhin bietet Vita die Möglichkeit eine Vielzahl von Sensordaten (digital und analog) auszulesen. Die hierbei verwendeten Sensoren sind Lambdasonden, Temperatur- und Drucksensoren, sowie Massenmesser für Luft- und Kraftstoffmassenstrom. Die ausgelesenen Werte werden in für jeden Sensor in frei konfigurierbaren Anzeigeelementen dargestellt. /5.2/

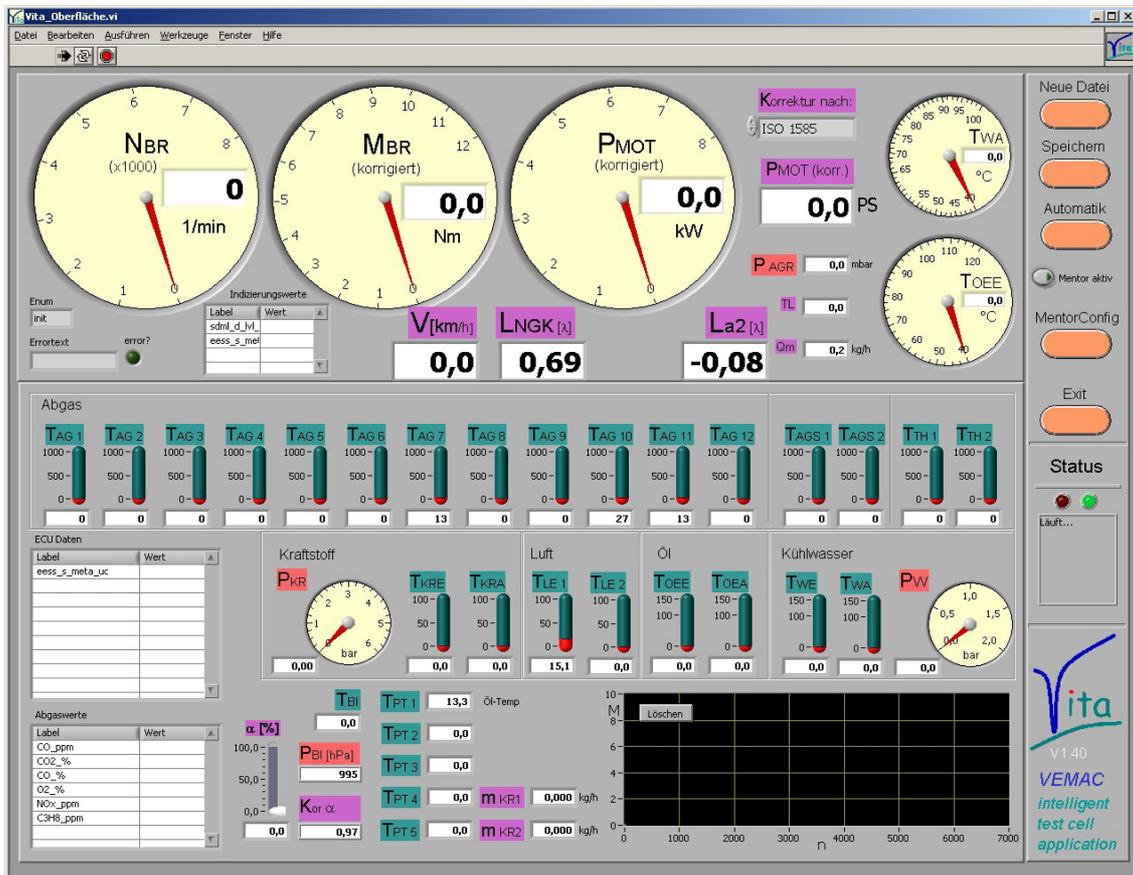


Abbildung 5.3: Hauptdialog Vita

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Sensordaten, werden in dieser Anlage noch die Messwerte einer Abgasmesseinrichtung (**Kapitel 5.2.1**) eingelesen, und in einem Textfeld aufgeschlüsselt. Alle in Vita aufgenommenen Messwerte und Daten können in definierten Zeitabständen protokolliert und in einer Datei abgespeichert werden.

Die Automatisierungsfunktion in Vita ermöglicht es den Prüfling mit einem frei definierbaren Fahrzyklus vollautomatisch zu testen. Dazu wird eine entsprechende Test-Sequenz hinterlegt, die einzelne Abschnitte des Fahrzyklus beschreibt. Diese Fahrskripte können im Automatisierungsdialog von Vita ausgeführt werden.

5.3 Rollenprüfstand beim TÜV Nord

Neben den in Kapitel 5.2 beschriebenen Motorprüfstand wurden auch Abgasmessungen auf einem Rollenprüfstand gemäß EU-Testbedingungen /2.3/ durchgeführt. Hierzu wurde ein zertifizierter Abgasrollenprüfstand vom TÜV Nord genutzt. Abbildung 5.4 zeigt das Kleinkraftrad auf dem Abgasrollenprüfstand.

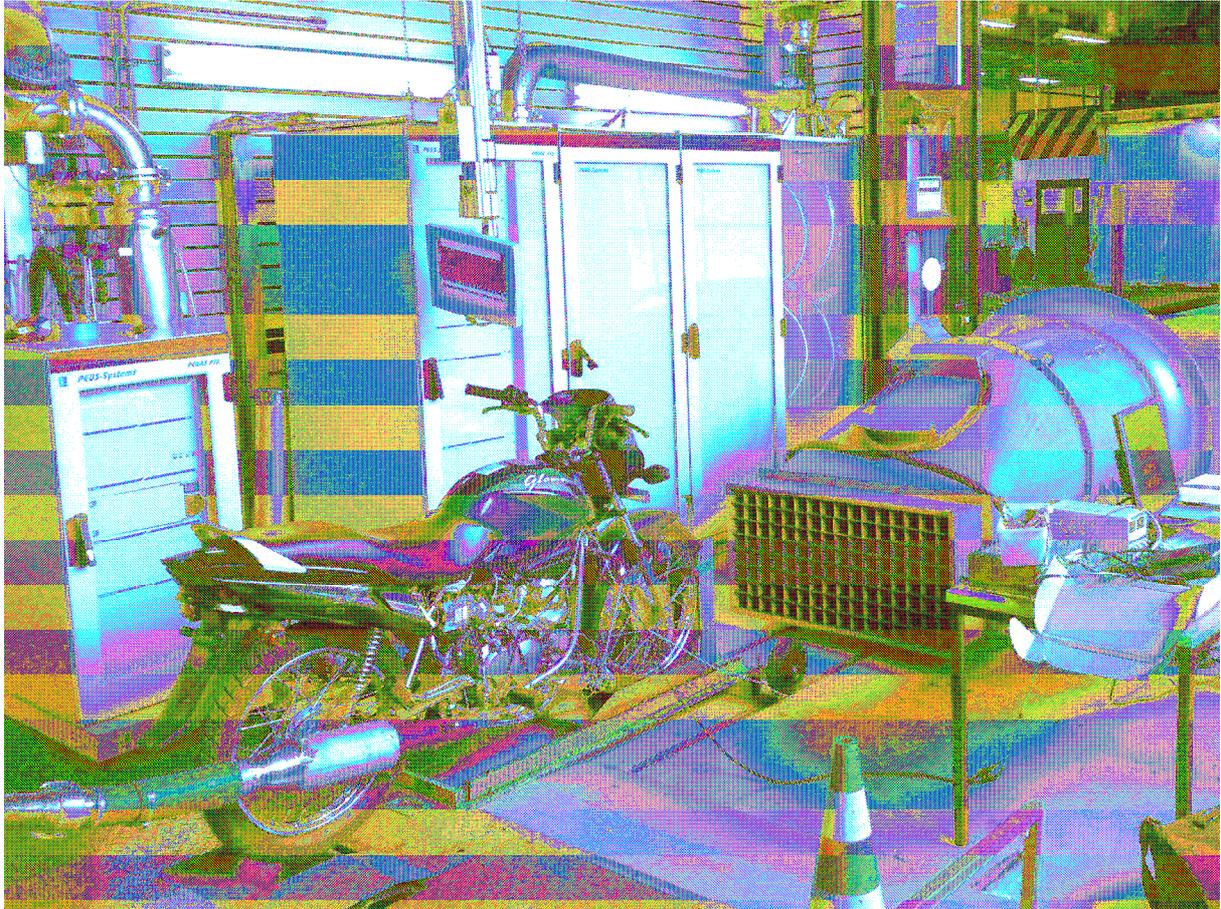


Abbildung 5.4: Kleinkraftrad auf dem Abgasrollenprüfstand

5.4 Ergebnisse des Vorhabens

5.4.1 Rollenprüfstandsergebnisse vom Serienmotorrad

Die Abgasmessung an dem Serienmotorrad erfolgte zunächst auf einem Rollenprüfstand beim TÜV Nord. Hier wurde der in **Kapitel 4, Abbildung 4.2** erläuterte und dargestellte Teilzyklus sechs mal hintereinander gefahren. Die Messwerte (Massenströme) der limitierten Schadstoffe sind in **Abbildung 5.5** bis **Abbildung 5.7** grafisch dargestellt. Neben dem Verlauf der limitierten Gaskomponenten ist zur besseren Orientierung auch das Geschwindigkeitsprofil des Testzyklus dargestellt. Das Gesamtergebnis Originalkonfiguration im Vergleich zur PCC Lösung mit Bezug zum Grenzwert (97/24EU) wird im **Kapitel 4.4** diskutiert. Bei der Betrachtung dieser Ergebnisse (vgl. auch Kapitel 4.4) ist zu erkennen, dass der Abgastest in der originalen Konfiguration durch die zu hohen HC-Emissionen nicht bestanden wurde.

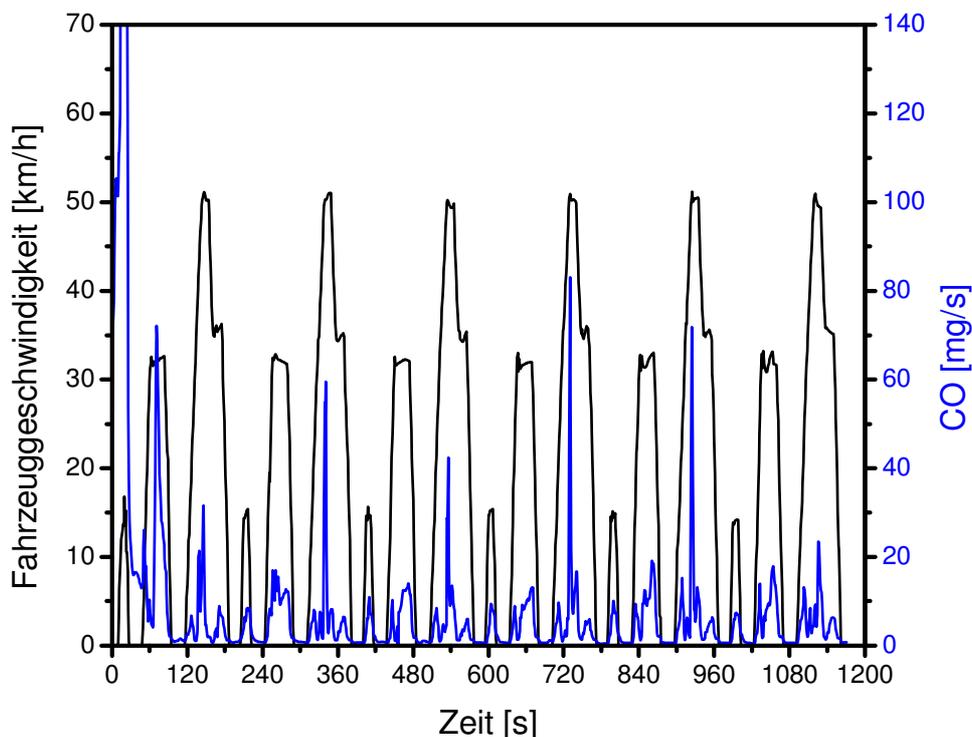


Abbildung 5.5: Grafische Darstellung der CO-Emissionen

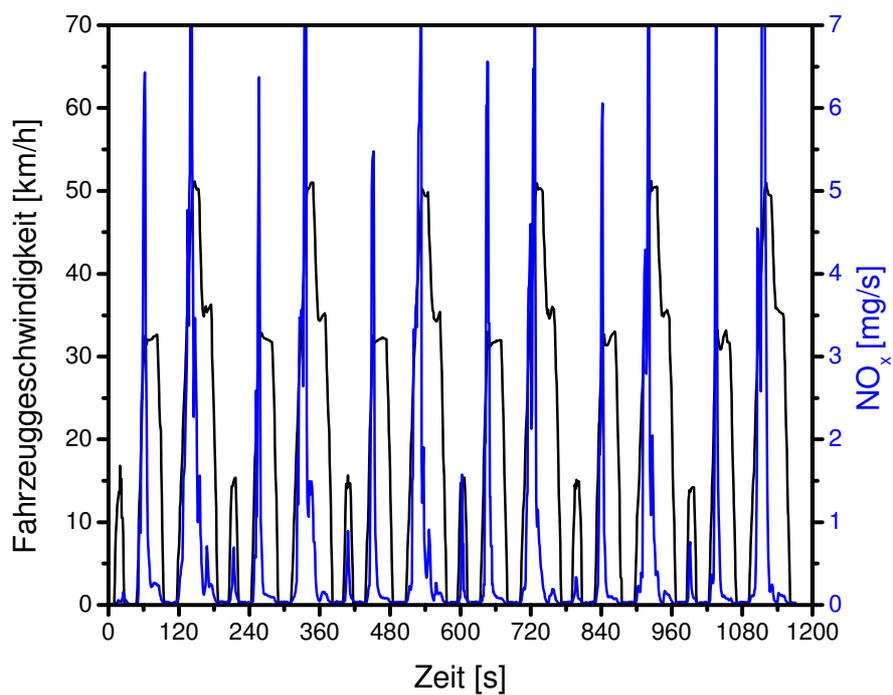


Abbildung 5.6: Grafische Darstellung der NO_x-Emissionen

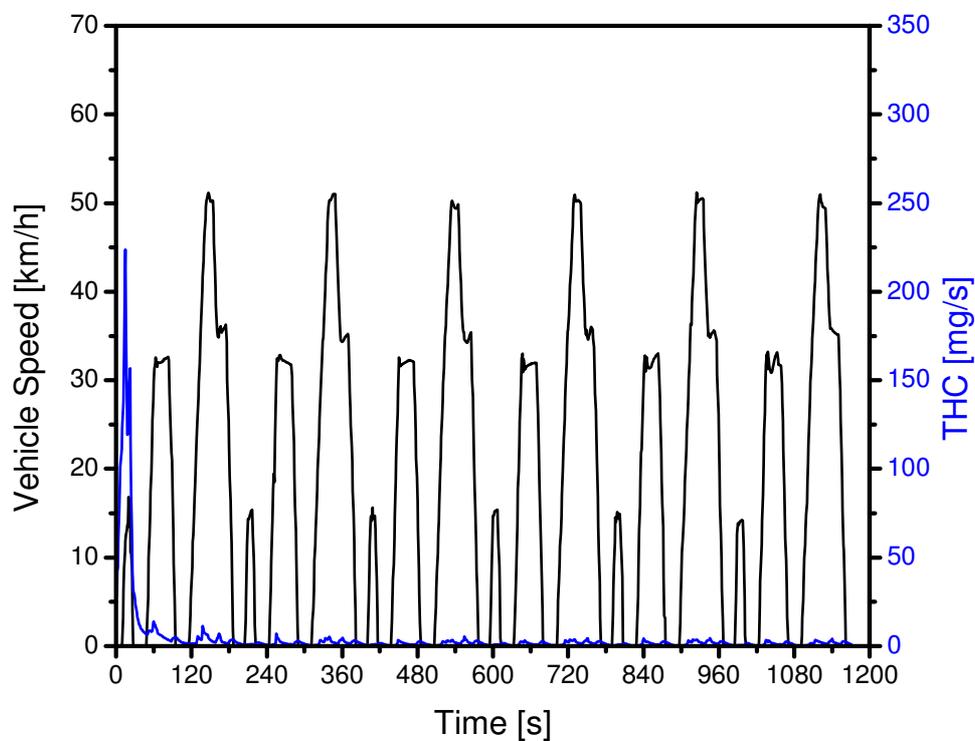


Abbildung 5.7 : Grafische Darstellung der HC-Emissionen

5.4.2 Ergebnisse stationärer Messungen auf dem Motorprüfstand

Neben den Messungen auf dem Rollenprüfstand wurden auch Messungen mit der Originalkonfiguration auf dem Motorprüfstand durchgeführt. Zunächst erfolgte eine Analyse des Motorverhaltens unter stationären Betriebsbedingungen. Hierzu wurden Leistungs-, Momenten-, und Lambdaverläufe bei unterschiedlichen Lasten (25%, 50%, 75% und 100%) und entsprechende Kennfeldvermessungen hinsichtlich der Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs durchgeführt. Das Sekundärluftsystem war hierbei in Betrieb, wodurch sich die sehr hohen λ -Werte erklären. Die Abgasentnahme erfolgte vor Kat (Rohgasentnahme).

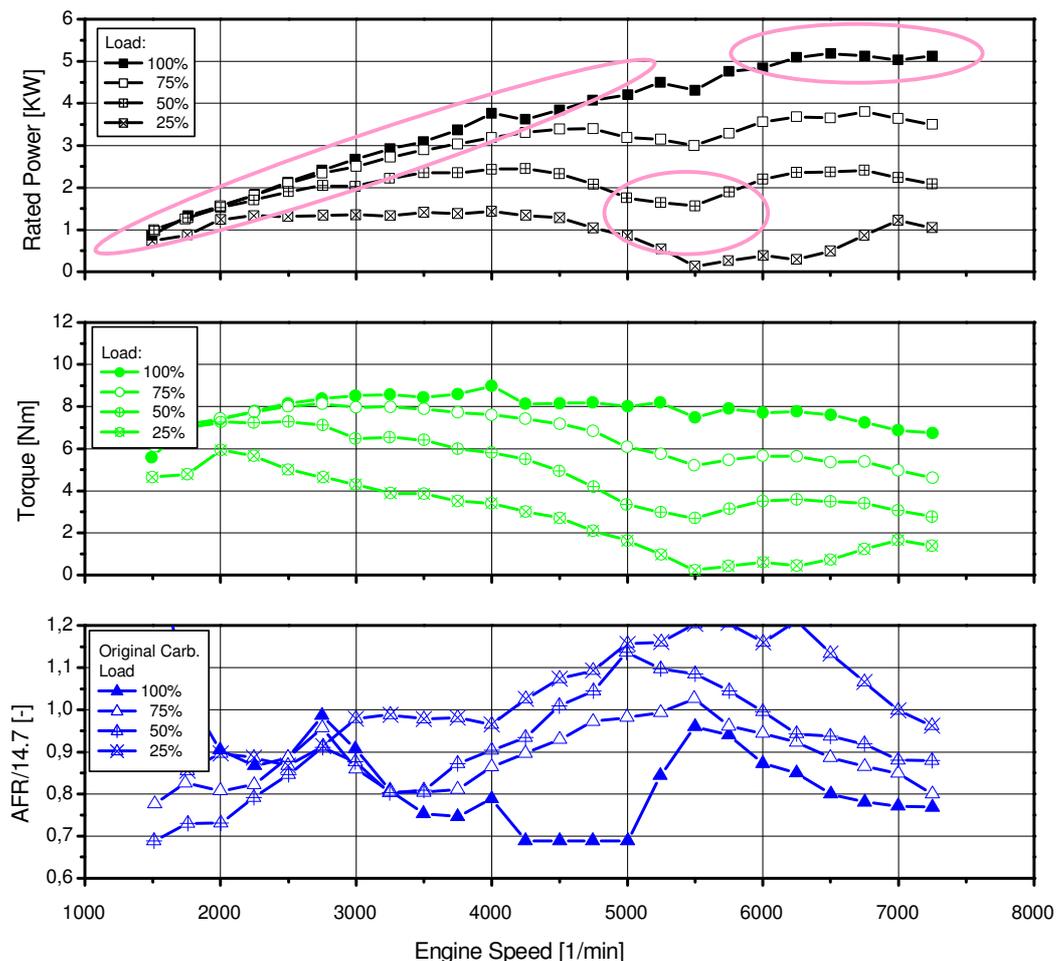


Abbildung 5.8: Performance und Lambdaverlauf beim Seriensystem

Betrachtet man die Emissionsverteilung über dem Betriebskennfeld, so zeigen sich Zonen mit hohen Emissionen und weitere Bereiche mit geringen Emissionen vgl. **Abbildung 5.9 – 5.11**. Ein Vergleich mit den Lambda-Messwerten bestätigt den direkten Einfluss der „fetten“ oder „mageren“ Verbrennung auf die Emissionen. Die Zonen mit hohen CO- und HC-Emissionen sind identisch mit einem fetten Gemisch, d.h. geringe Lambda-Werte. Die NO_x-Emissionen haben ihr Maximum bei einem Lambda von ca. 1,05-1,1 und liegen damit weiter im mageren Bereich. Es zeigt sich ein typisches Ergebnis für einen Motor mit unregelmäßigem Kraftstoff-Luftgemisch und damit verursachter unvollkommener Verbrennung.

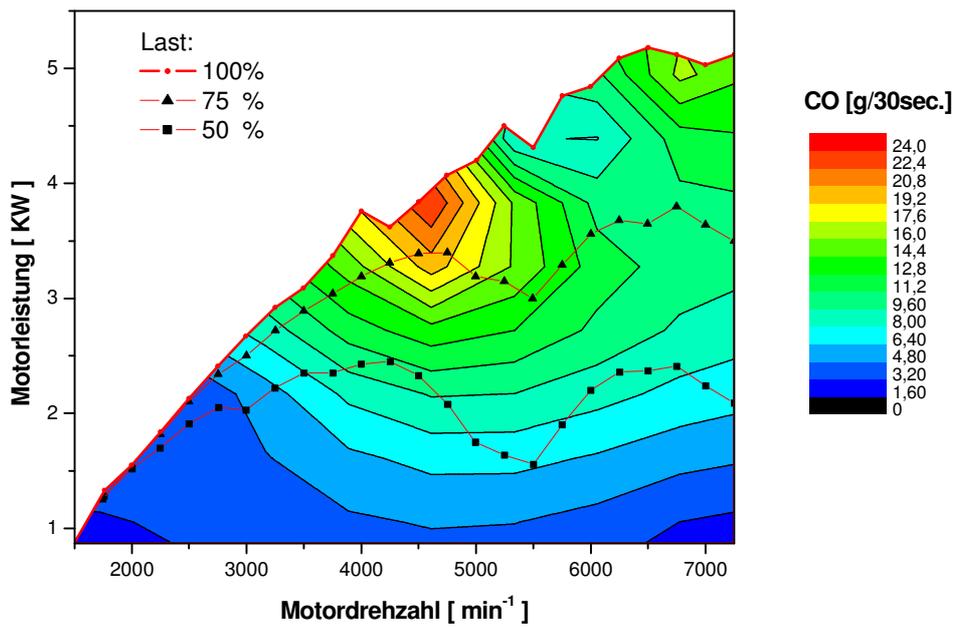


Abbildung 5.9: Muschediagramm zur Darstellung der CO-Emission

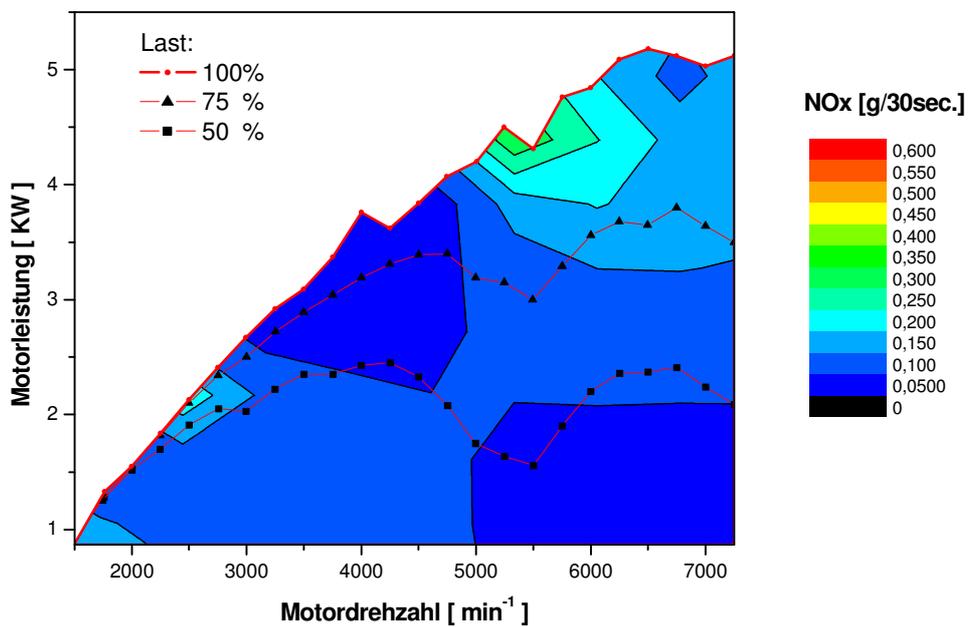


Abbildung 5.10: Muschediagramm zur Darstellung der NO_x-Emission

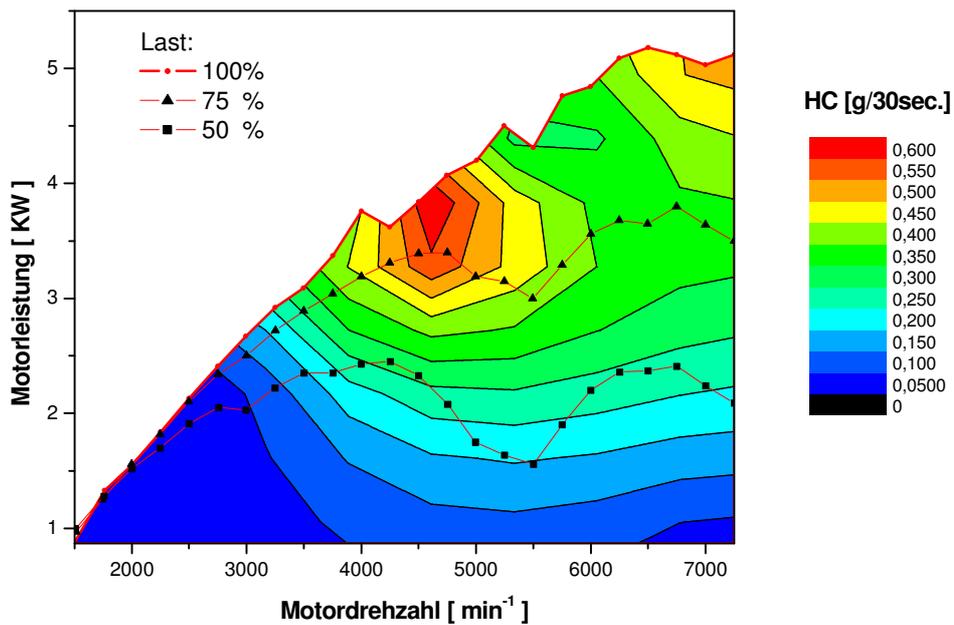


Abbildung 5.11: Muschediagramm zur Darstellung der HC-Emission

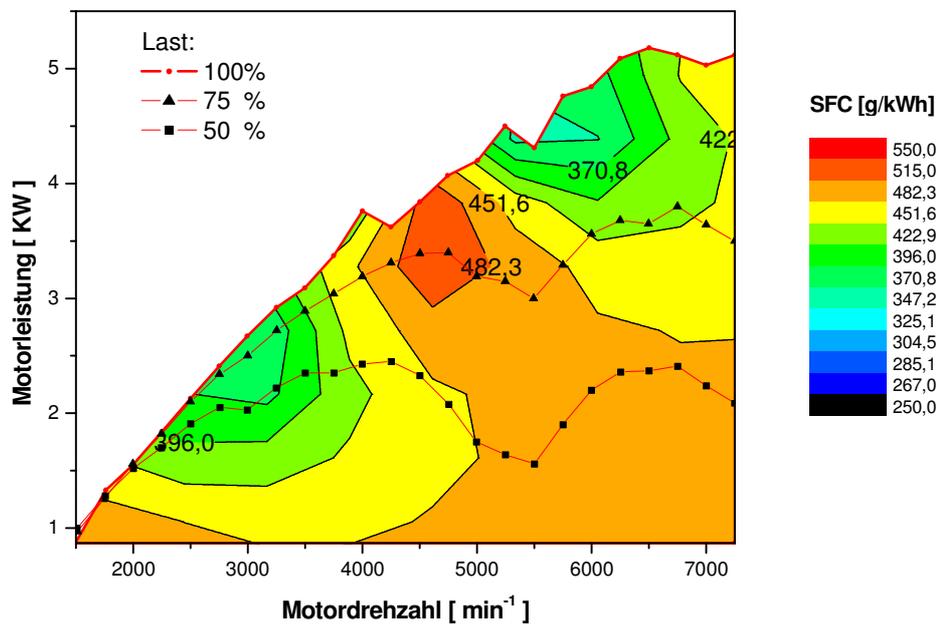


Abbildung 5.12: Muschediagramm des spezifischen Kraftstoffverbrauchs

Das Kennfeld des spezifischen Kraftstoffverbrauchs (SFC) in **Abbildung 5.12** weist ebenfalls den höchsten Kraftstoffverbrauch in Zonen fetten Gemisches auf, wogegen die geringeren Verbräuche in den Zonen mageren Gemischs zu finden sind.

Die selben Versuche wurden auch mit PCC auf dem Teststand durchgeführt. Für die Regelung des PCC mit Breitbandlambdasonde wurde eine PID-Regelung verwendet und mit unterschiedlichen Regelparametern getestet. In **Abbildung 5.13** sind Kennfelder einer nicht vorteilhaften Regelung dargestellt. Dies wird besonders deutlich in den Kennlinien für 50% Last bei einer Drehzahl von 5500 min^{-1} . Hier wird der Lambdawert so groß (mager Motorbetrieb), dass Leistung und Drehmoment stark einbrechen. Durch eine Optimierung der Regelparameter ließen sich diese Einbrüche beseitigen.

In **Abbildung 5.14** sind die Kennfelder einer optimierten Regelung dargestellt.

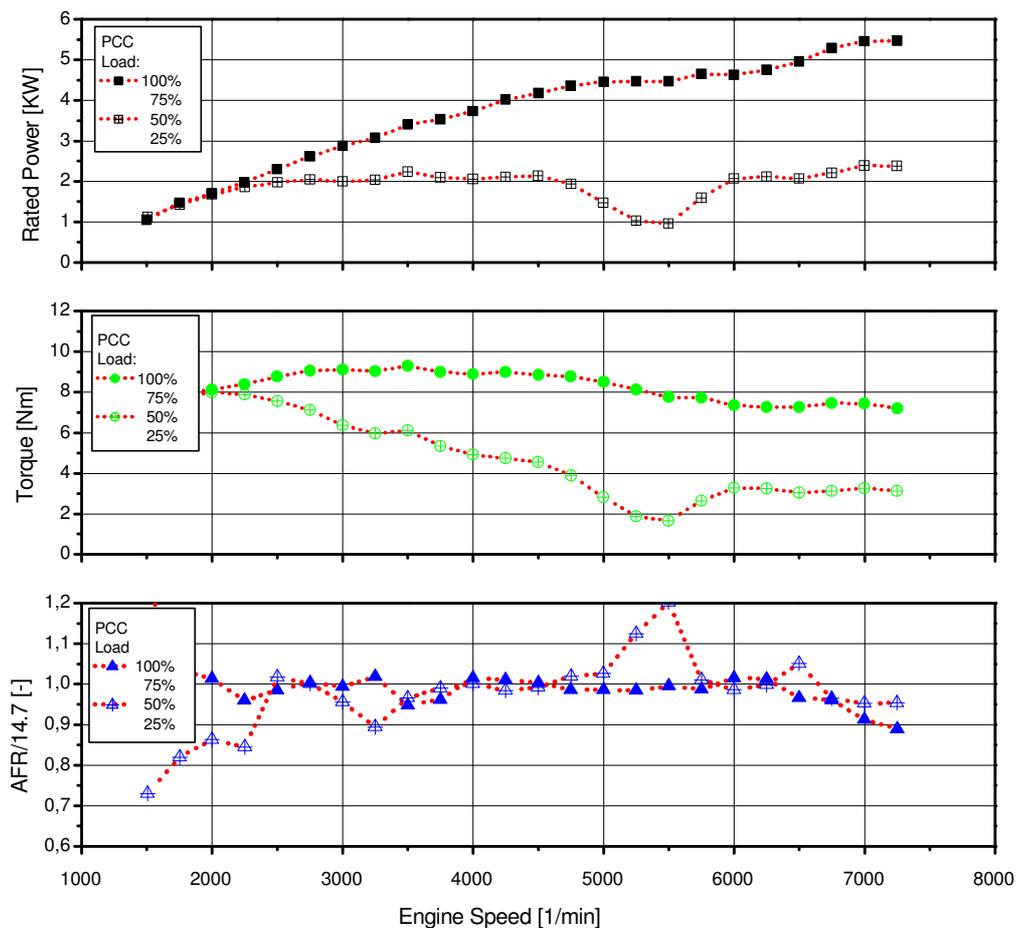


Abbildung 5.13: Kennfelder mit nicht optimierter PCC-Regelung

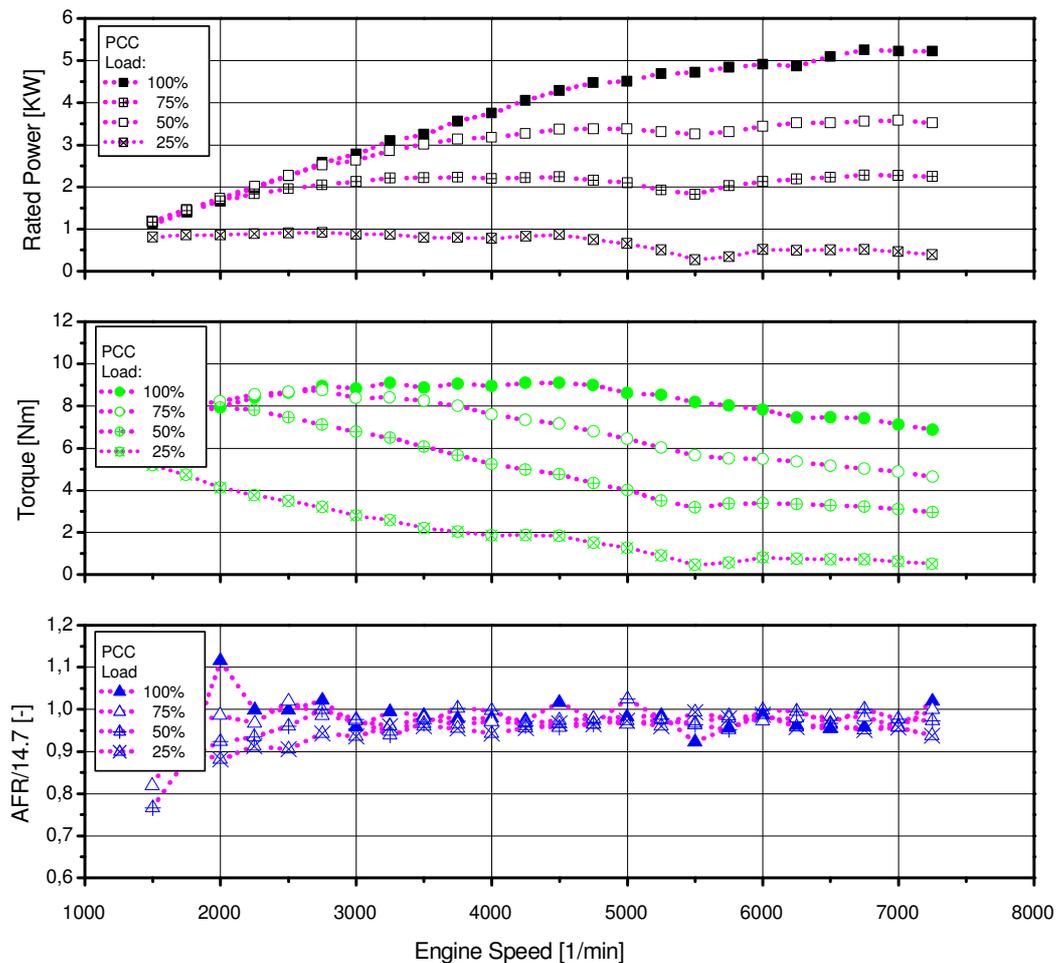


Abbildung 5.14: Kennfelder mit optimierter PCC-Regelung

Der positive Einfluss auf die Leistungsentfaltung des Motors ist deutlich zu erkennen. Besonders die Leistungseinbrüche der einzelnen Kurven bei den Motordrehzahlen 4250 min^{-1} und 5500 min^{-1} sind mit optimierter PCC-Regelung stark reduziert. Die optimierten Regelparameter ermöglichten den gewünschten konstanten Lambdawert.

Die nachfolgenden Emissions- Kennfelder (**Abbildung 5.15 bis Abbildung 5.18**) verdeutlichen, dass die Originalvergaserwerte der HC- und CO-Emissionen mit der optimierten Regelung auf $\lambda=1$ stark unterschritten wurden (HC -25%), (CO -66%). Doch vor allem lassen die spezifischen Verbrauchswerte (SFC) eine Reduzierung des Kraftstoffverbrauchs auch im dynamischen Betrieb erwarten. Lediglich die NO_x -Werte verschlechterten sich geringfügig. Dieses Verhalten erklärt sich jedoch mit einem Blick auf **Abbildung 4.4** im **Kapitel 4.2**. Dort ist ersichtlich, dass die NO_x -Rohemissionen von fettem Betrieb in Richtung $\lambda=1$ ansteigen, die HC- und CO-Rohemissionen jedoch sinken.

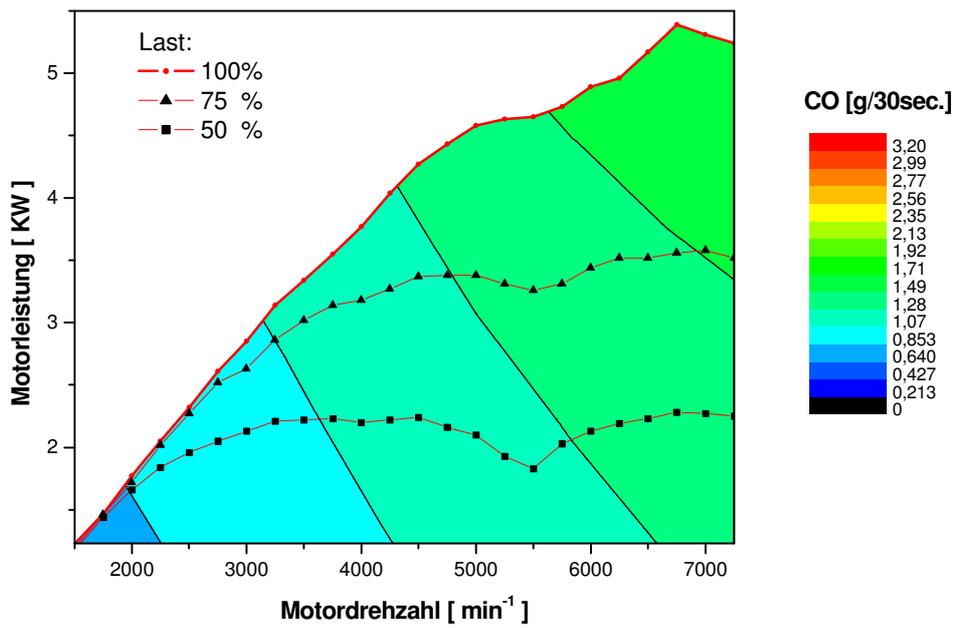


Abbildung 5.15: Muschediagramm zur Darstellung der CO-Emission mit PCC

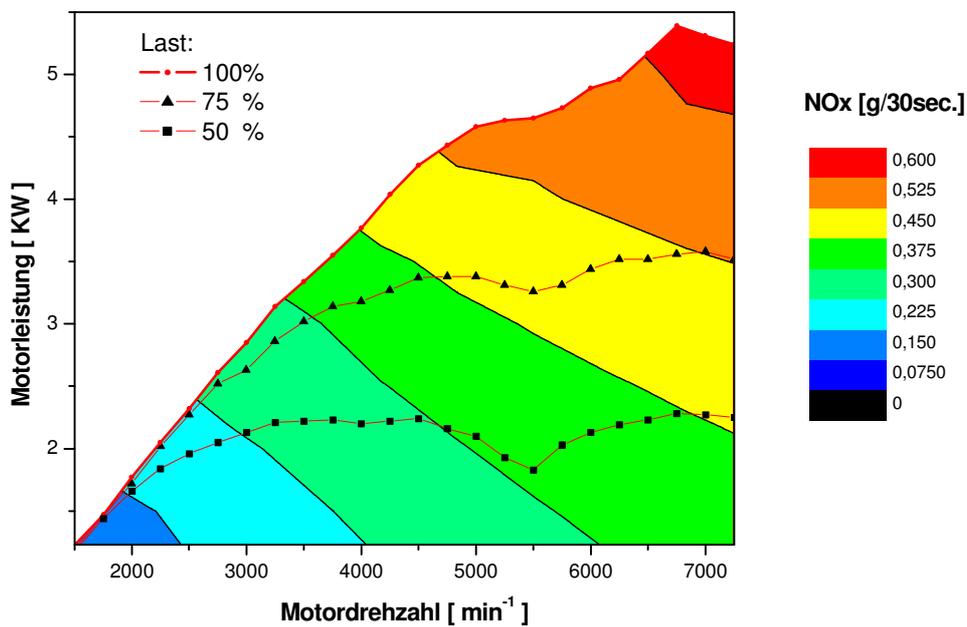


Abbildung 5.16: Muschediagramm zur Darstellung der NO_x-Emission mit PCC

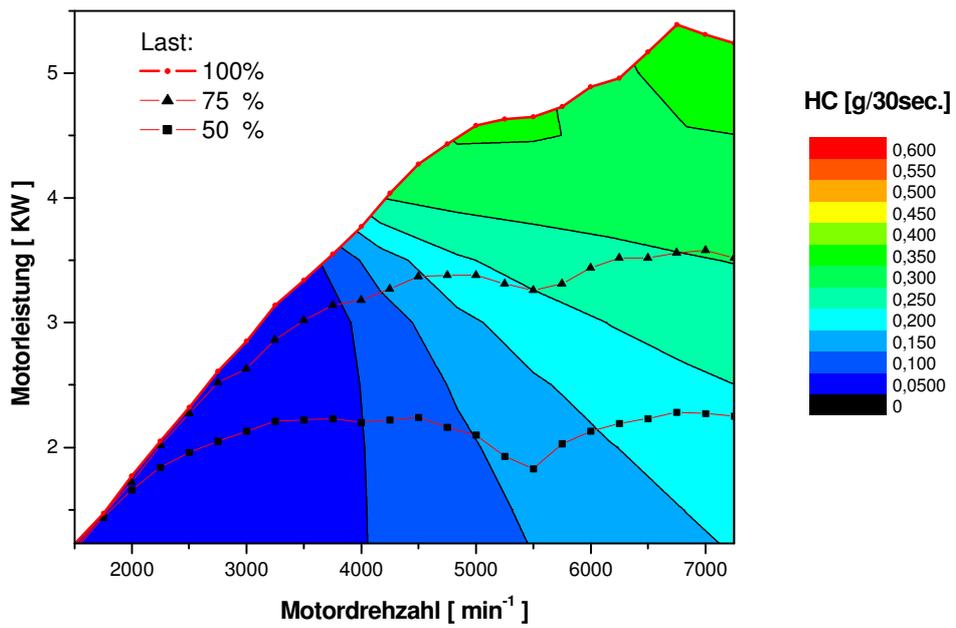


Abbildung 5.17: Muscheldiagramm zur Darstellung der HC-Emission mit PCC

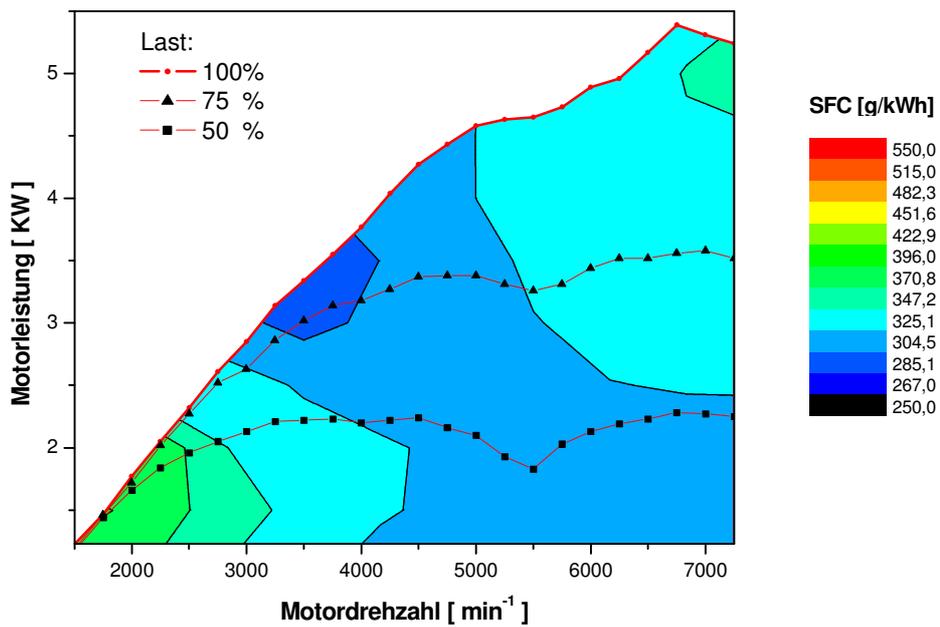


Abbildung 5.18: Muscheldiagramm des spezifischen Verbrauchs mit PCC

5.4.3 Ergebnisse dynamischer Messungen auf dem Rollenprüfstand

Im Anschluss an den statischen Betrieb wurde der Motor dynamisch getestet. Hierzu wurde der dynamische Stadtfahrzyklus der Norm 97/24 EU (NEFZ) auf dem Prüfstand simuliert. Um eine gute Reglereinstellung für den piezoelektrisch gesteuerten Vergaser mit Breitbandlambdasonde zu finden, orientierten sich die Werte an den statischen Regelparametern. Hier zeigten sich wie auch im statischen Betrieb die gleichen PID Reglereinstellungen. Außerdem wurde eine kostengünstigere Variante mit einer beheizten Sprunglambdasonde und Steuergerät mit Zweipunktregler untersucht, wobei selbstverständlich eine geeignete Reglerabstimmung für den dynamischen Betrieb ermittelt wurde. In den **Abbildungen 5.19 bis 5.27** sind die Ergebnisse der dynamischen Tests mit Originalsystem, PCC mit Breitbandlambdasonde und PCC mit Sprunglambdasonde dargestellt. Deutliche Verbesserungen sind im CO- (-27 %) und HC-Ausstoß (-51%) zu erkennen. Die NO_x -Emissionen blieben auch hier auf einem mit dem Originalsystem vergleichbaren Niveau. Der Kraftstoffverbrauch ließ sich um 8% absenken.

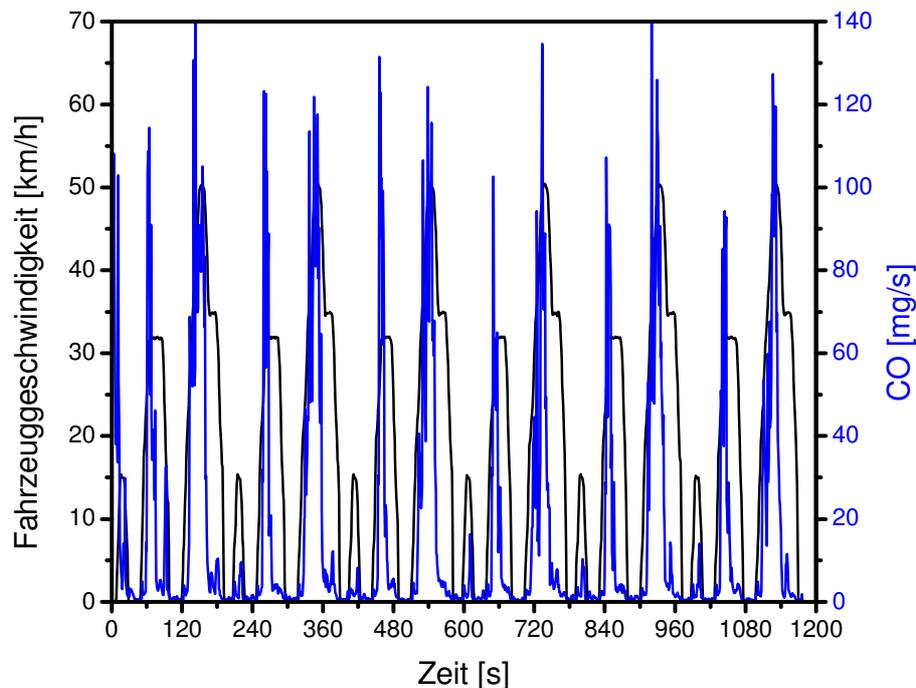


Abbildung 5.19: Grafische Darstellung der CO-Emission mit Originalsystem

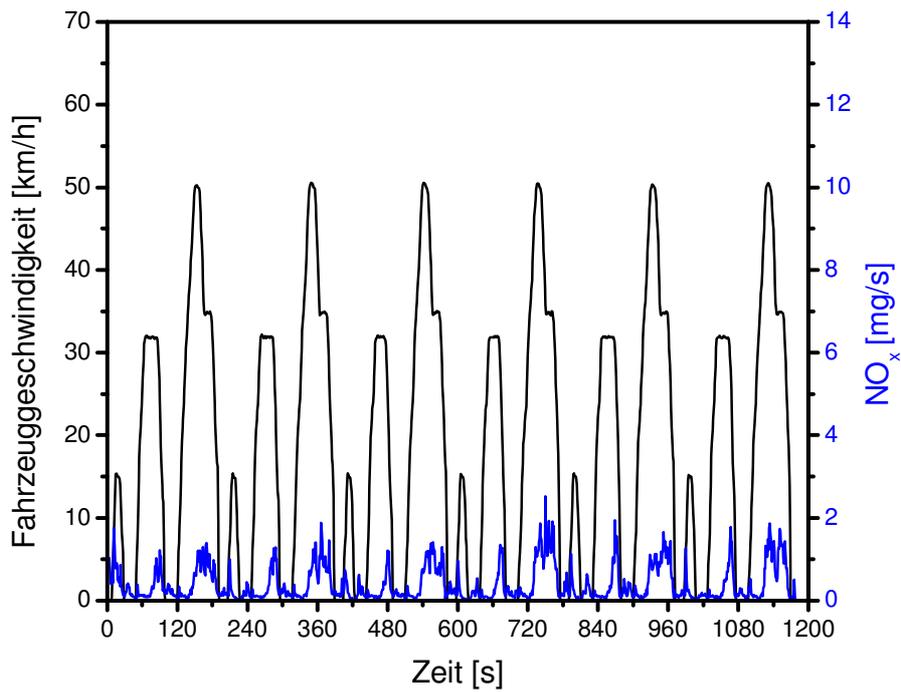


Abbildung 5.20: Grafische Darstellung der NO_x-Emission mit Originalsystem

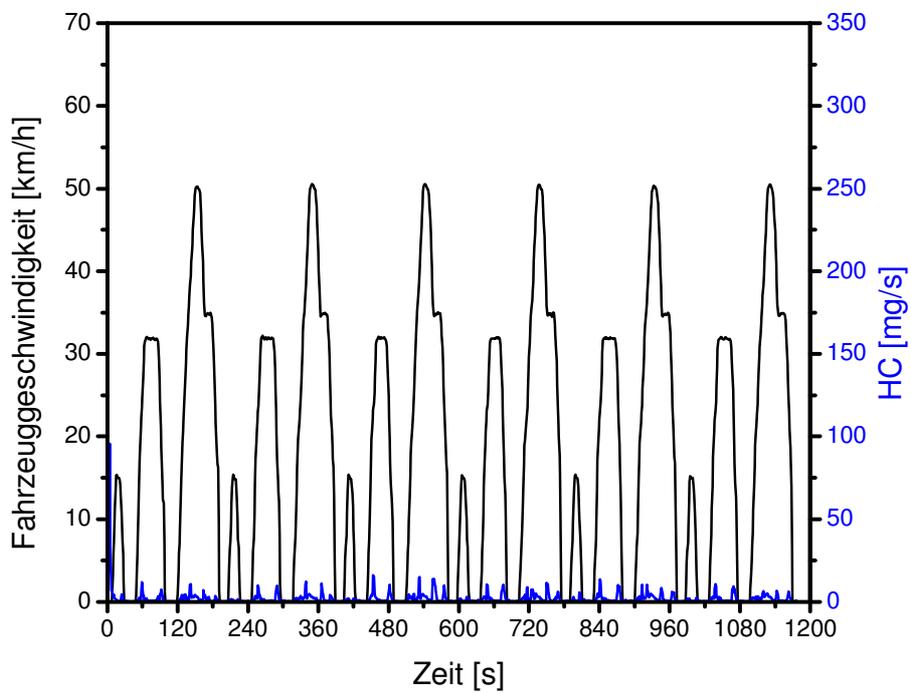


Abbildung 5.21: Grafische Darstellung der HC-Emission mit Originalsystem

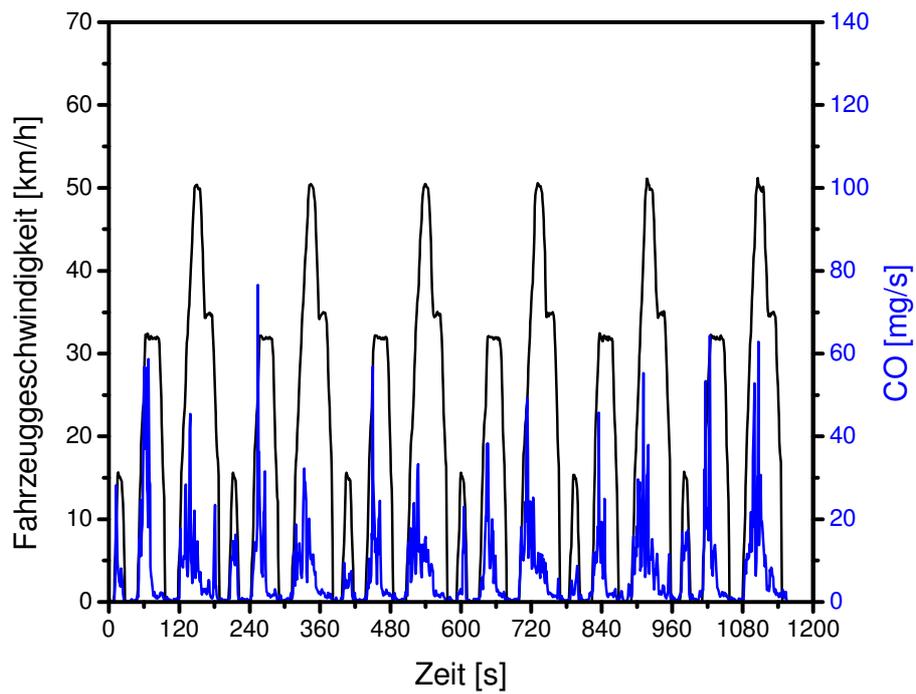


Abbildung 5.22: Grafische Darstellung der CO-Emission mit Breitbandlambdasonde

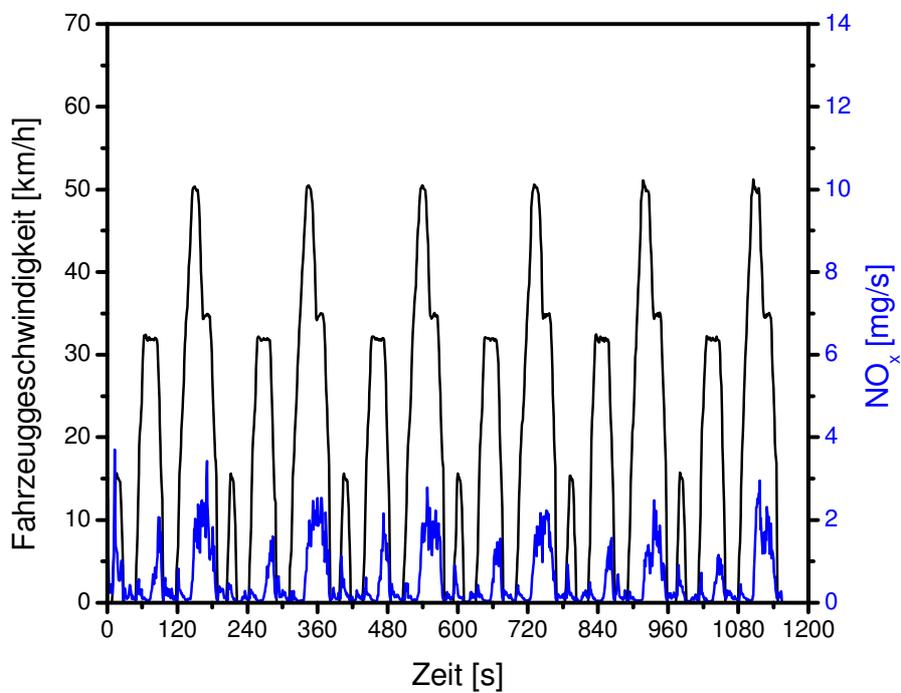


Abbildung 5.23: Grafische Darstellung der NO_x-Emission mit Breitbandlambdasonde

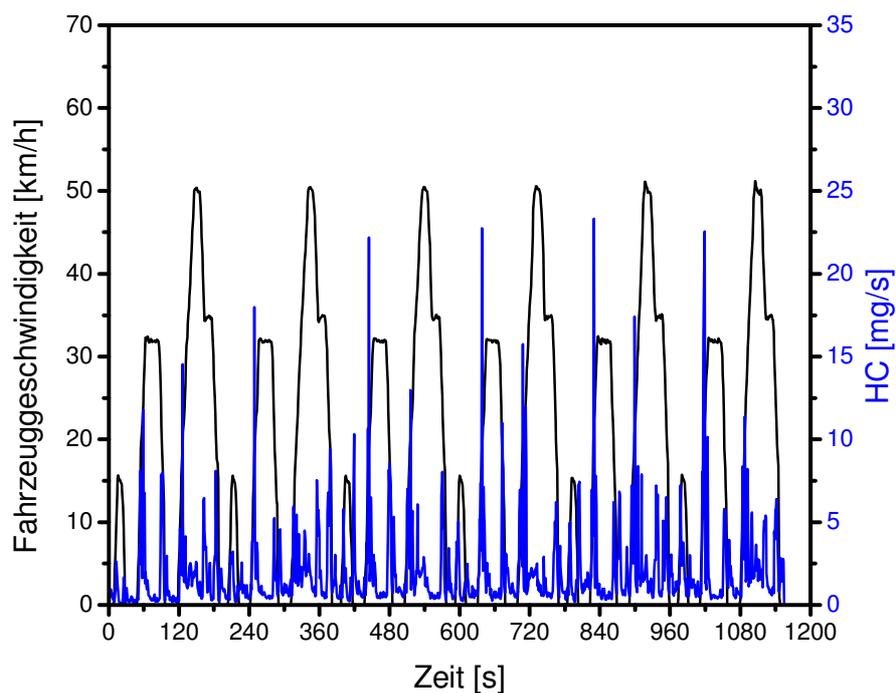


Abbildung 5.24: Grafische Darstellung der HC-Emission mit Breitbandlambdasonde

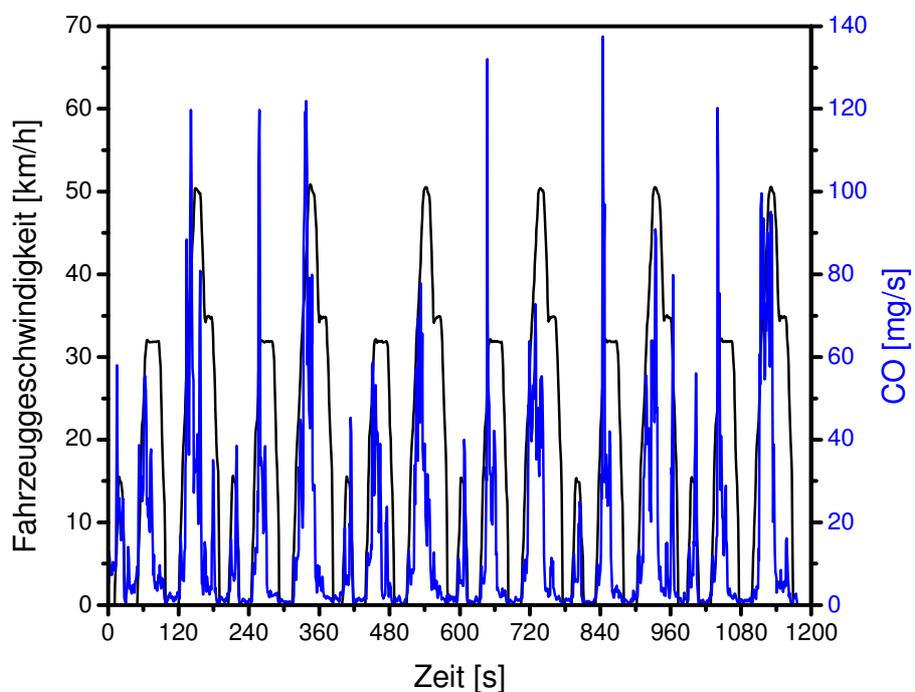


Abbildung 5.25: Grafische Darstellung der CO-Emission mit Sprunglambdasonde

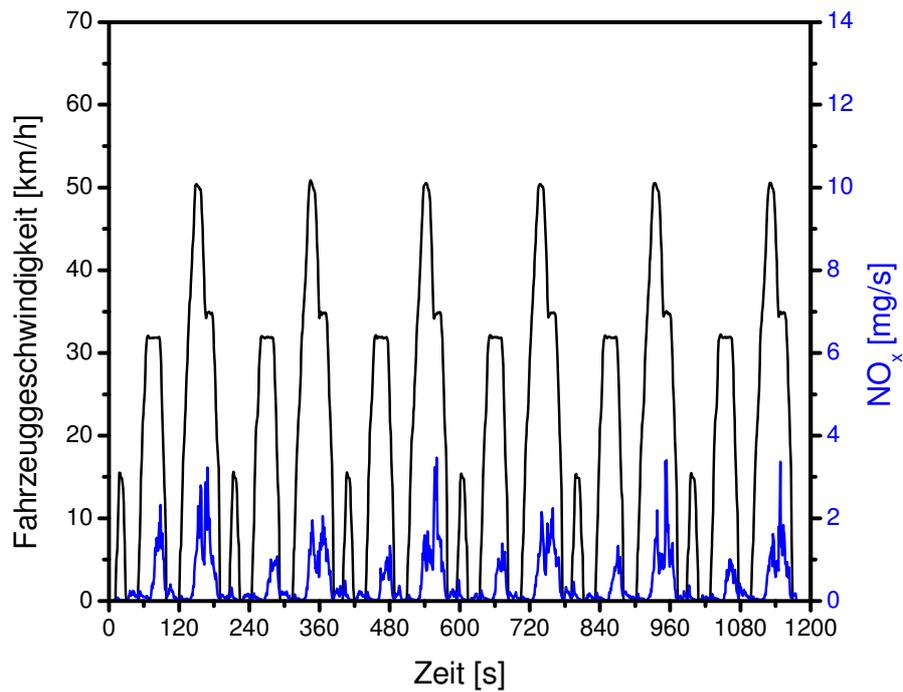


Abbildung 5.26: Grafische Darstellung der NO_x-Emission mit Sprunglambdasonde

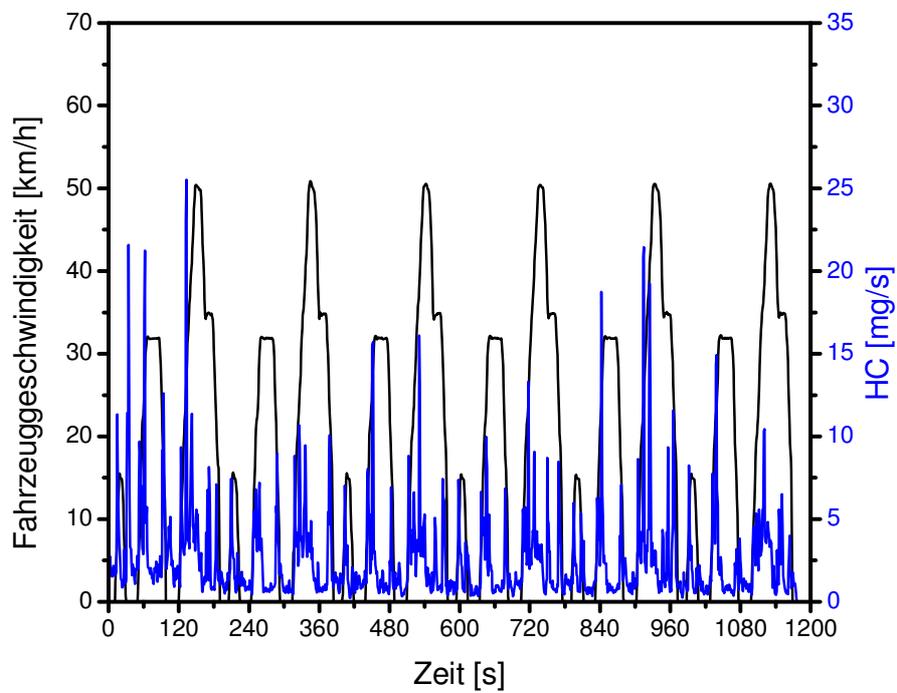


Abbildung 5.27 : Grafische Darstellung der HC-Emission mit Sprunglambdasonde

5.4.4 TÜV Ergebnisse mit PCC-System

Nach den dynamischen Abstimmungen auf dem Motorenprüfstand der VEMAC wurde der Motor inklusive PCC-System für Breitbandlambdasonde und für Sprunglambdasonde wieder in das Motorrad eingebaut. Wie in den **Abbildungen 5.28 bis 5.33** zu erkennen ist, wurde der Test nach 97/24/EU bestanden. Mit dem piezoelektrisch gesteuerten Vergaser und der Breitbandlambdasonde wurden die HC-Emissionen auf 0,340 g/km (57% unter Grenzwert) und die CO-Emission auf 1,139 g/km (43% unter Grenzwert) gesenkt. Mit der Sprunglambdasonde wurden die HC-Emissionen auf 0,320 g/km (60% unter Grenzwert) und die CO-Emissionen auf 1,342 g/km (33% unter Grenzwert) gesenkt. Die NO_x-Emissionen lagen mit der Breitbandlambdasonde bei 0,142 g/km und mit der Sprunglambdasonde bei 0,143 g/km. Dies sind ca. 5% unter dem vorgeschriebenen Grenzwert. Zusätzlich konnte der Verbrauch beim Betrieb mit Breitbandlambdasonde von 1,88 l/100 km (Originalkonfiguration) auf 1,72 l/100 km, (-8,5%) beim Betrieb mit der Sprunglambdasonde sogar auf 1,69 l/100 km (-10,4%) gesenkt werden.

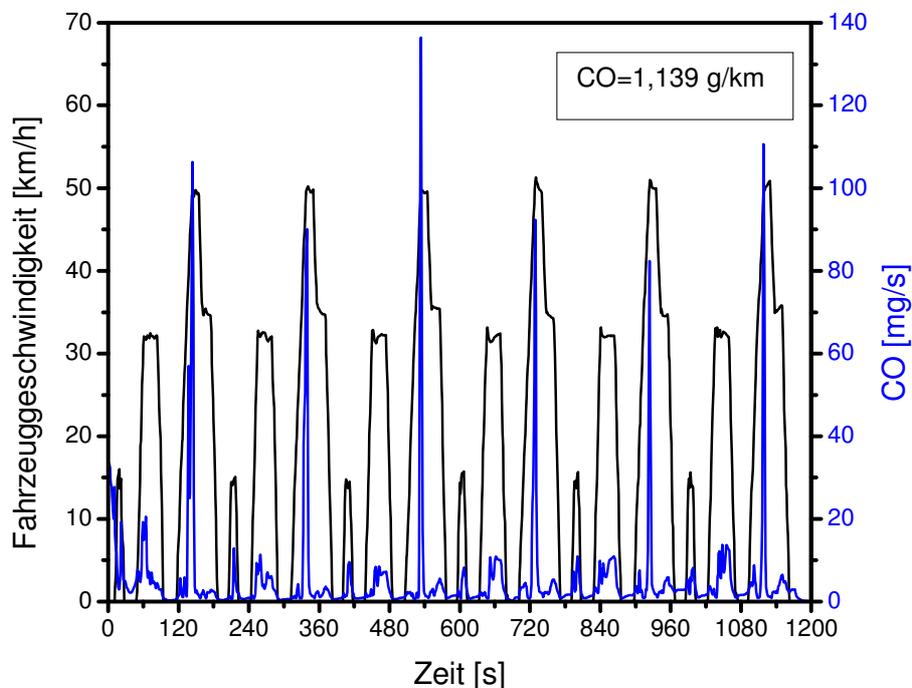


Abbildung 5.28: CO-Emission mit Breitbandlambdasonde aus TÜV Prüfung

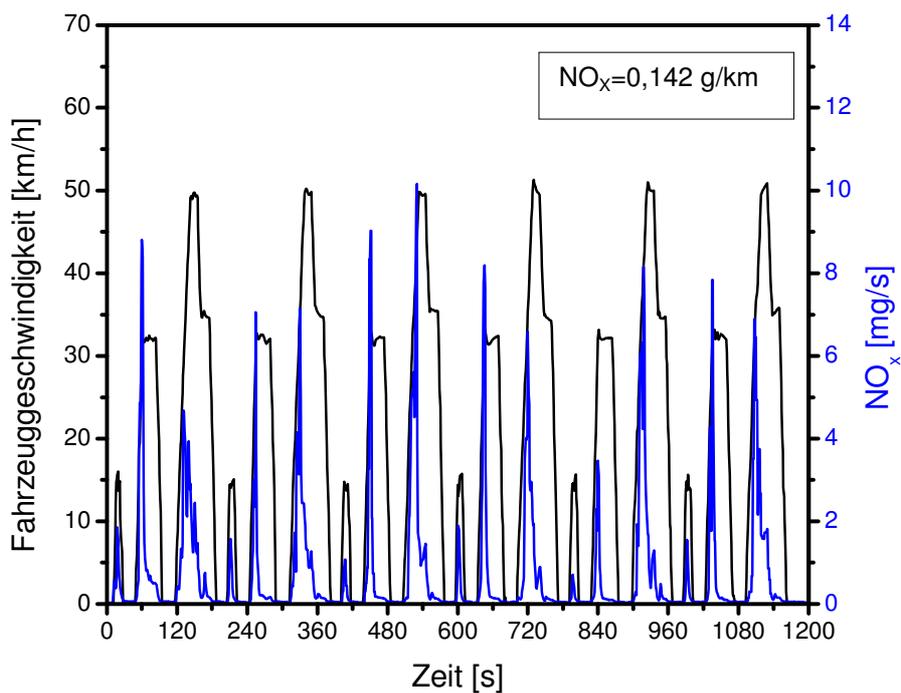


Abbildung 5.29: NO_x-Emission mit Breitbandlambdasonde aus TÜV Prüfung

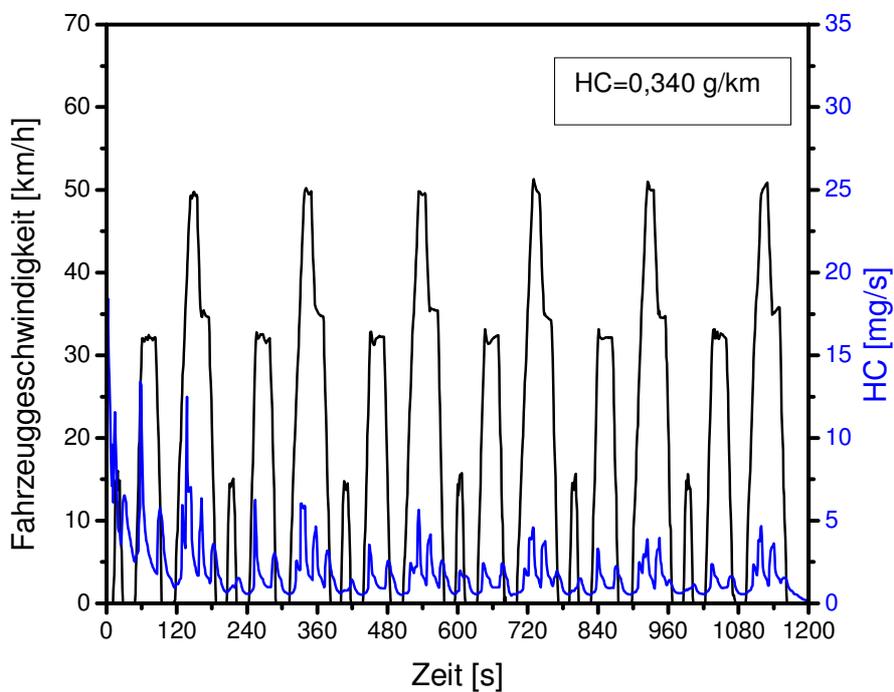


Abbildung 5.30: HC-Emission mit Breitbandlambdasonde aus TÜV Prüfung

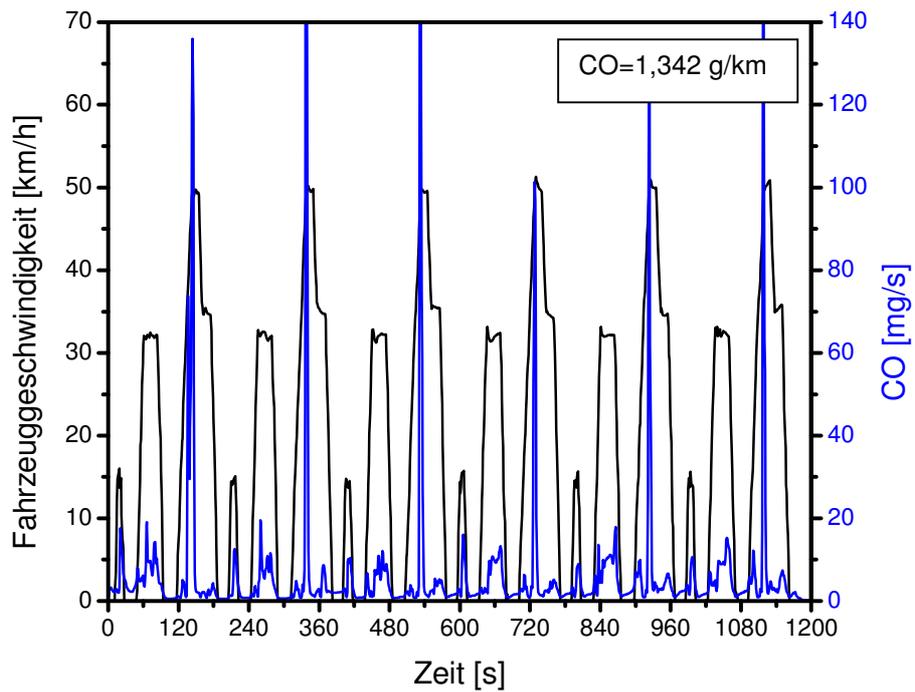


Abbildung 5.31: CO-Emission mit Sprunglambdasonde aus TÜV Prüfung

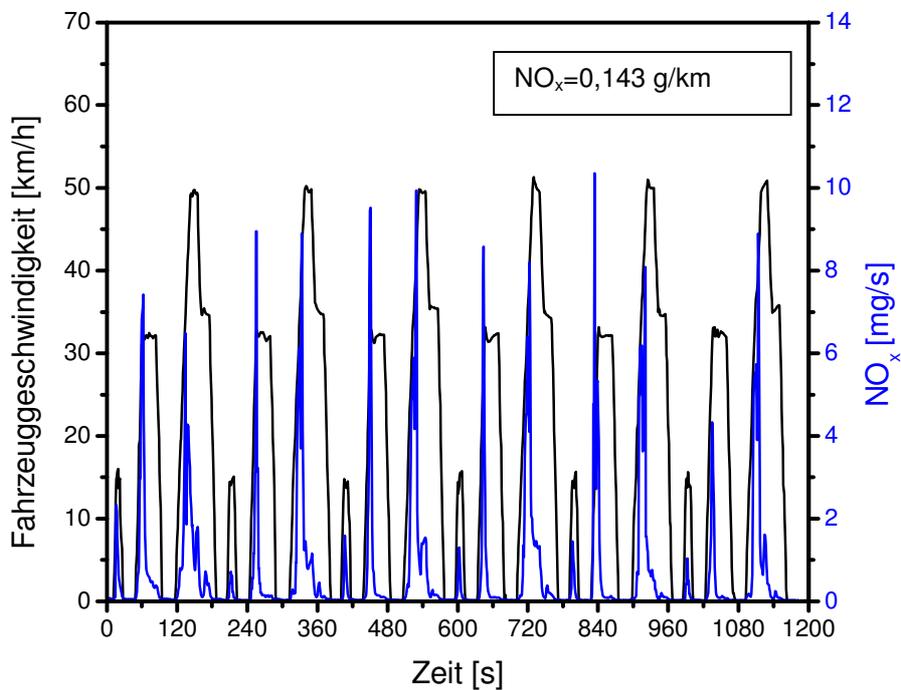


Abbildung 5.32: NO_x-Emission mit Sprunglambdasonde aus TÜV Prüfung

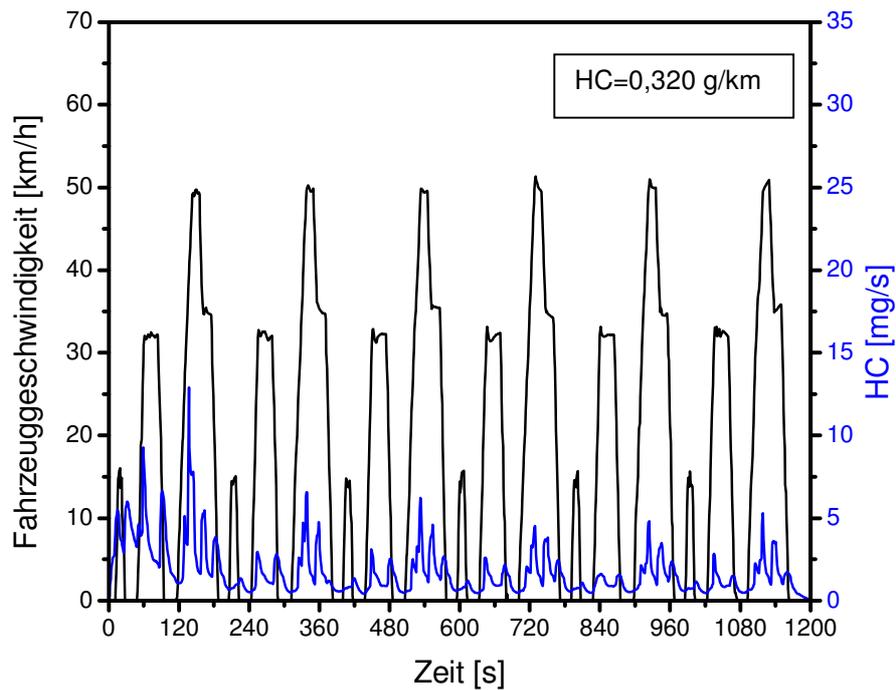


Abbildung 5.33: HC-Emission mit Sprunglambdasonde aus TÜV Prüfung

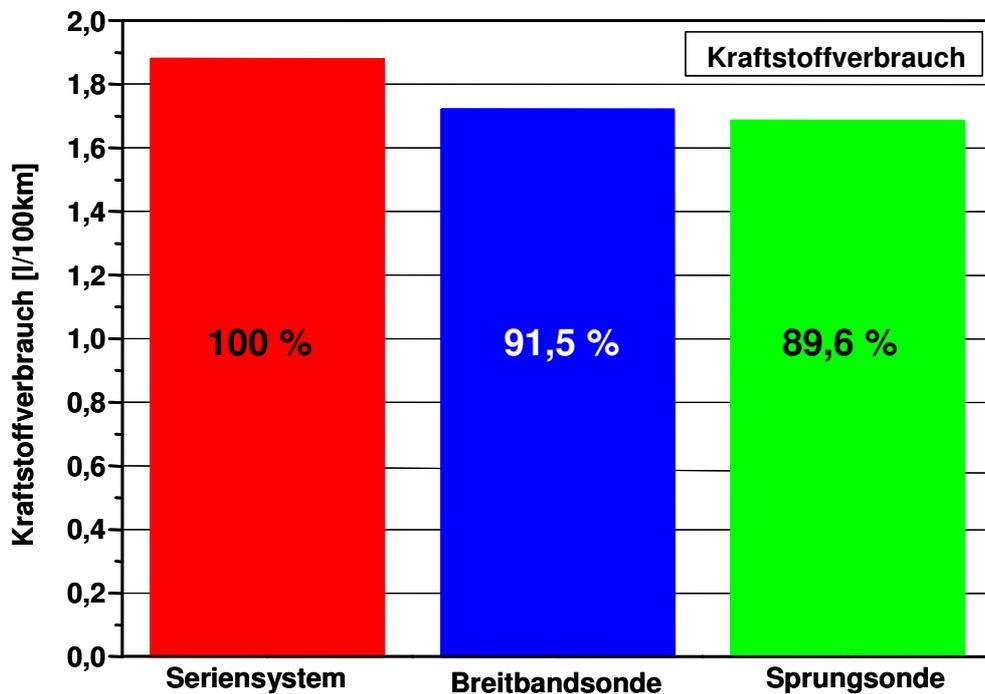


Abbildung 5.34: Kraftstoffverbrauch aus Rollenprüfstandtest (TÜV)

Auffällig sind die höheren absoluten Massenströme in dem CO und NO_x-Emissionen beim Einsatz der Sprungsonde im Vergleich zur Breitbandsonde. Die Spitzen sind jedoch zeitlich stärker begrenzt. Durch die Integration der Massenströme entstehen geringere Prüfwerte für den Betrieb mit der Sprungsonde. Dieses Verhalten lässt sich durch das deutlich dynamischere Betriebsverhalten des Zweipunktregler erklären. Im stationären Betrieb hat die Breitbandsonde mit PID-Regler ihre Vorteile.

Die folgenden Diagramme in **Abbildung 5.35-5.36** fassen die Ergebnisse der TÜV-Prüfung mit Originalkonfiguration, mit PCC –Breitbandlambdasonde und mit PCC–Sprunglambdasonde graphisch zusammen.

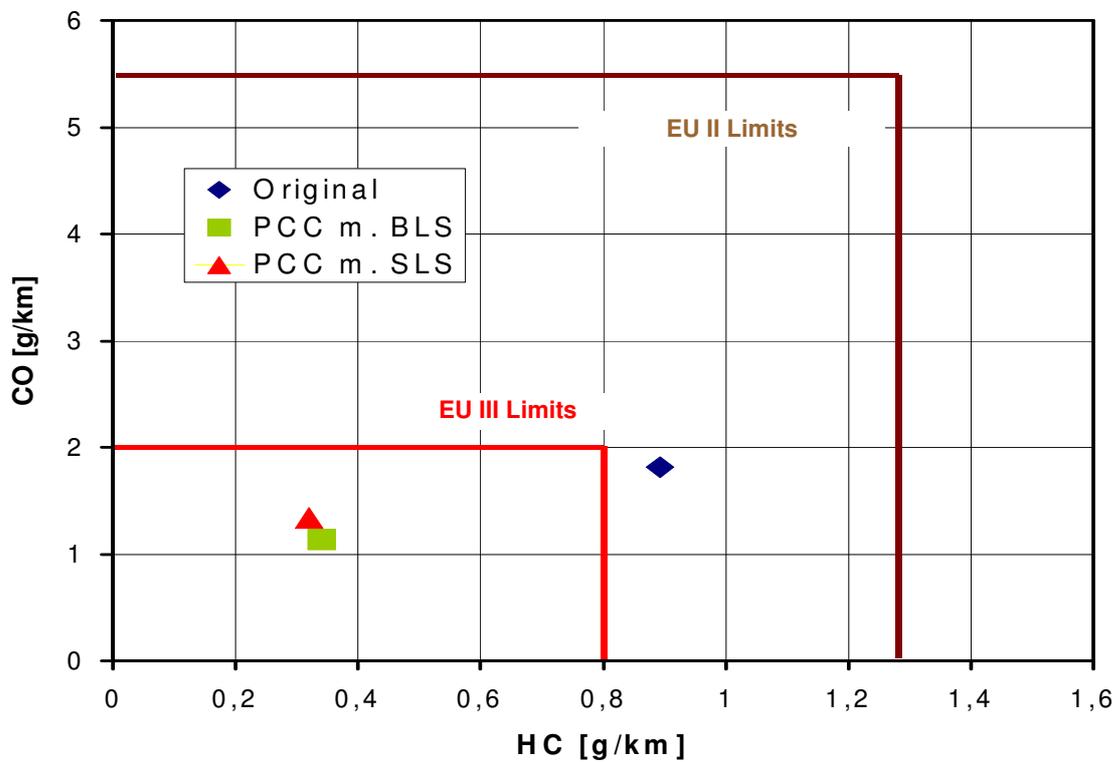


Abbildung 5.35: HC-CO-Emissionen mit unterschiedlichen Konfigurationen

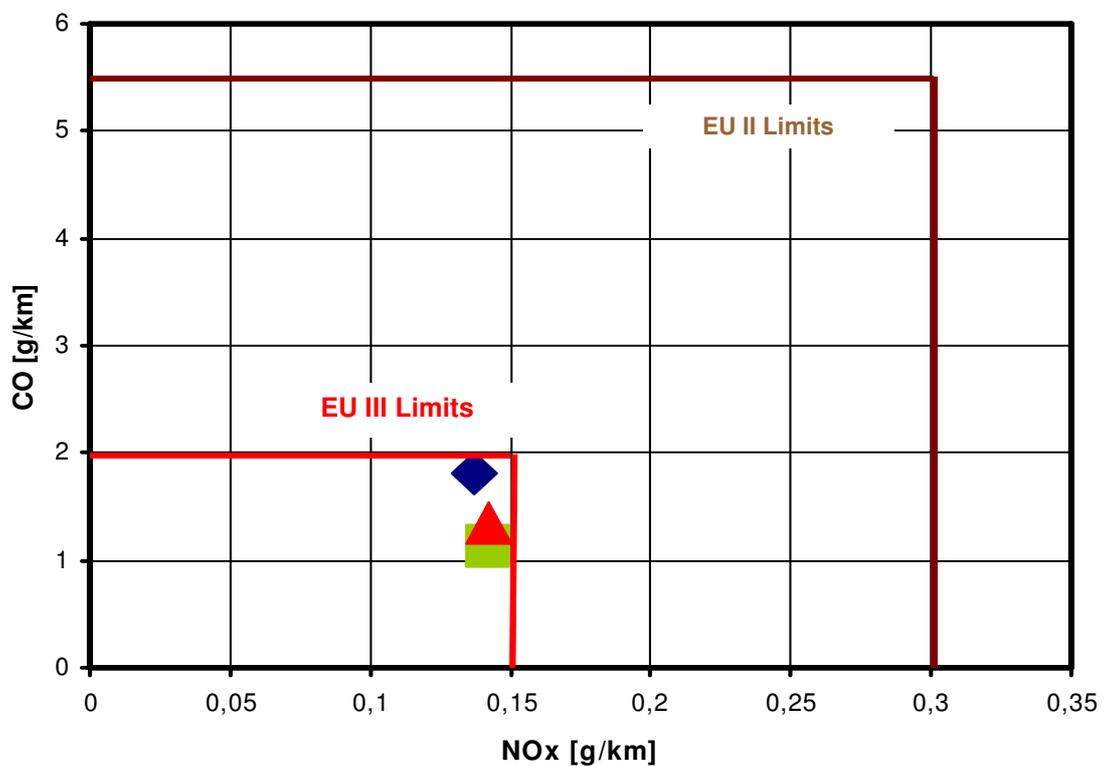


Abbildung 5.36: NO_x-CO-Emissionen mit unterschiedlichen Konfigurationen

Abbildung 5.37 zeigt den Motor mit PCC, der Lambdasonde, dem elektronischen Regler, wie sie im Motorrad verbaut wurden.

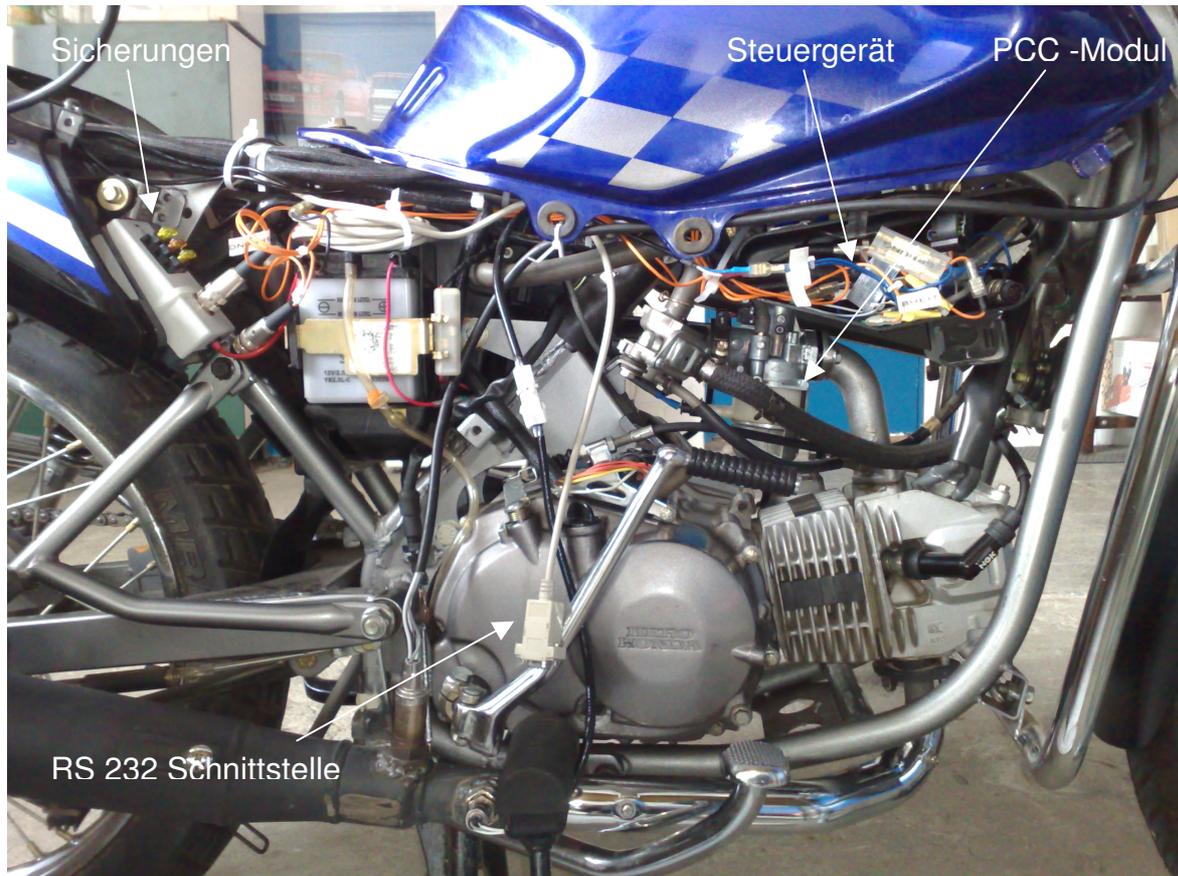


Abbildung 5.37: Integration des PCC-Systems im Fahrzeug

5.5 Fahrversuche

Neben den Motor- und Rollenprüfstandsversuchen wurde das Kleinkrafttrad auch Versuchsfahrten im Straßenverkehr unterzogen. Die Versuchsfahrten im originalen Zustand (Serie) ergaben keine unerwarteten Ergebnisse. Allgemein muss jedoch festgehalten werden, dass Ergebnisse aus dem Fahrbetrieb in der Regel subjektive Eindrücke wieder geben, da belastbare Daten nur mit einem erhöhten Aufwand hinsichtlich Messtechnikeinsatz erzielt werden können.

Das Fahrzeug erreichte nach Serientacho eine maximale Geschwindigkeit von ca. 85 km/h auf gerader ebener Strecke. Für die vorhandene Leistung eine durchaus akzeptabler Wert. Die Fahrdynamik war ausreichend, um dem Straßenverkehr mühelos folgen zu können. Aufgrund der geringen Endgeschwindigkeit ist eine Nutzung auf Autobahnen jedoch nicht zu empfehlen.

Die Leistungsentfaltung ist typisch für Fahrzeuge mit einfachen Vergasern. Im mittleren Drehzahlbereich (5000-6000 min⁻¹) und mittlerer bis hoher Last (>50%) wird die Leistungsentfaltung (Leistungs- bzw. Geschwindigkeitszuwachs) gebremst. Ab einer Drehzahl von 6000 min⁻¹ ist dann wieder eine deutliche Beschleunigung wahrzunehmen. Die Bremsanlage sollte den höheren Durchschnittsgeschwindigkeiten in Deutschland angepasst werden.

Die Fahrversuche mit PCC System wurden in gleicher Art und Weise, d.h. auf der gleichen Fahrstrecke mit gleichem Fahrer durchgeführt. Als Ergebnis kann festgehalten werden, dass die Leistungssteigerung deutlich wahrnehmbar war. Als Endgeschwindigkeit wurden 90 km/h abgelesen.

Am auffälligsten war jedoch die Leistungsentfaltung im Drehzahlbereich zwischen 5000 und 6000 min⁻¹. Die deutliche Beschleunigungsschwäche des originalen Fahrzeuges war vollständig aufgehoben. Das Kleinkrafttrad hinterließ beim Fahrer einen deutlich „sportlicheren“ Eindruck.

5.6 Bewertung der Ergebnisse

Im vorliegenden Projekt konnte gezeigt werden, dass ein Kleinkrafttrad (Hubraum = 125 ccm) aus indischer Produktion die strengen, geltenden Abgasgrenzwerte (EU III) trotz der getroffenen klassischen Maßnahmen zur Abgasentgiftung (Sekundärluftsystem mit Oxidationskatalysator) nicht erfüllt (siehe Prüfbericht des TÜV Nord im Anhang).

Es konnte weiterhin gezeigt werden, dass die PCC Technologie auf dieses Fahrzeug adaptierbar ist. Es wurden zwei unterschiedliche elektronische Regelsysteme appliziert und untersucht. Beide Systeme unterscheiden sich im Abgassensor (Breitband- und Sprungsonde), der Elektronik und der Regelungssoftware (PID- und Zweipunktregler). Der originale Vergaser wurde lediglich durch das Piezomodul erweitert. Der Verbrennungsmotor blieb im originalen Zustand.

Die Emissionswerte für Kohlenwasserstoffe (HC) und Kohlenmonoxid (CO) wurden durch den Einsatz der PCC Technologie in beiden Fällen deutlich abgesenkt, so dass die EU III Grenzwerte unterschritten wurden. Bei den Stickoxiden wäre ein

deutlicherer Abstand zwischen Messwert und Grenzwert wünschenswert. Da die Messwerte im stöchiometrischen Betrieb ($\lambda=1$) höher sind als in der originalen Konfiguration, ist ein eindeutiges Indiz dafür, dass die originale Betriebsstrategie „fett“ ($\lambda < 1$) abgestimmt ist. Zusätzlich konnte durch die Verbesserung der Gemischbildung der Kraftstoffverbrauch um beachtliche 10,4 % gesenkt werden. Diese Verbesserung wurden wiederum von einer unabhängigen Instanz (TÜV Nord) bestätigt.

Vor dem Hintergrund, dass es sich bei dem Versuchsfahrzeug mit PCC Technologie um einen Prototyp handelt, ist zu erwarten, dass die Ergebnisse durch weitere Detailentwicklungen noch steigerungsfähig sind. Die primären Projektziele wurden damit erzielt.

Die globale Bedeutung des Zweirades als Transportmittel für den Individualverkehr ist bedeutend, wie die hohen Produktionszahlen von mehr als 40 Millionen Einheiten pro Jahr zeigen. Die stärkste Nutzung liegt heute in Asien, gefolgt von (Ost-) Europa, Teilen von Südamerika und den USA. Vom Marktvolumen, als auch von der Umweltverträglichkeit, bedeutend sind in erster Linie die Zweiräder mit einem Hubraum unter 150 ccm. Durch einen stärkeren Einsatz moderner Technologien, wie z.B. der PCC Technologie könnten hier u.a. erhebliche Beiträge zur Verminderung des Kraftstoffverbrauchs und dem damit verbundenen CO₂-Ausstoß geleistet werden. Hierdurch könnte ein spürbarer Beitrag zum globalen Klimaschutz erfolgen. Das geschätzte, globale CO₂-Einsparpotential beträgt beachtliche 0,5 bis 1,5 Millionen Tonnen pro Jahr abhängig von den Betriebszeiten und Fahrstrecken (vgl. **Abbildung 6.1**). Die PCC Technologie stellt zudem eine sehr kostengünstige Technologie dar, die hierdurch auch global einsetzbar ist.

Das vorliegende Projekt zeigt deutlich das Potential der PCC Technologie zur Absenkung der Abgasemissionen und des Kraftstoffverbrauchs. Für die industrielle Nutzung und damit für die Marktdurchdringung sind, neben den technischen Ergebnissen und den Systemkosten im Vergleich zum technischen Wettbewerb, auch die Zeitspanne der Nutzung wichtige Kriterien. Die Nutzungsdauer einer emissionsmindernden Technologie für Verbrennungsmotoren wird durch die Verschärfung der Emissionsgesetzgebung vom Gesetzgeber maßgeblich mitbestimmt. Deshalb haben Technologien mit ausgewiesenen Zukunftspotential eine deutlich bessere Akzeptanz im Markt. Für die PCC Technologie bedeutet dieses, dass neben der bestätigten EU III-Tauglichkeit auch eine Aussage hinsichtlich Erfüllung der EU IV Grenzwerte gewünscht wird (obwohl noch keine Grenzwerte festgesetzt wurden). Im vorliegenden Projekt konnte gezeigt werden, dass der Katalysatortechnik hier eine entscheidende Rolle zufällt. Die untersuchten Oxidationskatalysatoren (Serienkatalysator) sind für die Betriebsstrategie der PCC Technologie ($\lambda =1$) weniger geeignet, so dass optimale Katalysatoren für die Erbringung des EU IV entwickelt bzw. abgestimmt werden müssen. Eine solche Entwicklung wurde mit Katalysatorherstellern diskutiert. Die Parameter zur Katalysatoroptimierung sind jedoch vielfältig. Neben den geometrischen Größen des Trägers sind insbesondere die Parameter der Beschichtung mannigfaltig, so dass hier mit einem erheblichen Zeitaufwand für Prüfstandsuntersuchungen und Optimierungsschritten zu rechnen ist. Zur Durchführung einer solchen Projektphase war aufgrund der fortgeschrittenen Projektlaufzeit keine ausreichende Zeit mehr vorhanden.

Bei einer globalen Bewertung des PCC Einsatzes ergeben sich neben der Katalysatorfrage und der damit verbundenen Zukunftssicherheit zusätzlich Fragen nach der Übertragbarkeit der Emissionsergebnisse auf solche Länder, die eine deutlich schlechtere Kraftstoffqualität aufweisen, als die in Europa vorzufindende gleichbleibende Kraftstoffqualität (EN228). Es sind Ergebnisse aus weltweit geführten Qualitätsanalysen zu Dieselmotorkraftstoff bekannt /5.8/, /5.9/. Zur weltweiten Qualität von Ottomotorkraftstoffen ist eine vergleichbare Untersuchung nicht bekannt. Hier besteht noch Nachholbedarf insbesondere für die asiatischen Märkte.

Beide offenen Fragen zum Zukunftspotential bzgl. Erreichen der EU IV Grenzwerte und zur Robustheit gegenüber unterschiedlichen Kraftstoffqualitäten können nur durch weitere Untersuchungen geklärt werden. Diese müssen jedoch auf ein zukünftiges Projekt übertragen werden.

5.7 Maßnahmen zur Verbreitung der Ergebnisse

Die Ergebnisse aus diesem Projekt wurden zunächst den bereits bestehenden Firmenkontakten präsentiert. Dieses geschah in einigen Fällen auch schon während der Projektlaufzeit. Die Ergebnisse stießen hier immer auf starkes Interesse.

Neue Ergebnisse aus dem Projekt wurden in Form von Pressemitteilungen verbreitet. Alle Pressemitteilungen befinden sich auf unserer Firmen-Homepage /5.3/.

Zur weiteren Verbreitung der Projektergebnisse wurden Informationen an die Fachpresse verteilt, die neben digitalen Medien u.a. auch die Veröffentlichung in der Motortechnischen Zeitschrift MTZ fanden /5.4/.

Wir haben die PCC Technologie und damit auch die Ergebnisse aus dem vorliegenden Forschungsprojekt in unsere Marketingaktivitäten integriert. So finden sich Informationen auch in marketingtechnischen Publikationen /5.5/ wieder.

Zuletzt wurde die PCC Technologie auch der breiten Öffentlichkeit präsentiert, indem der Prototyp des indischen Motorrades auf der Fachmesse INTERMOT 2008 in Köln auf unserem Firmenstand ausgestellt wurde /5.6/.

Im Ausland (Indien) wurde auf dem Fachkongress „NIMMSYS“ durch Vorträge und Teilnahme an der Podiumsdiskussion von den positiven Ergebnissen aus dem vorliegenden Projekt berichtet./5.7/.

6. Fazit

Im Vorhaben wurde ein indisches Kleinkraftrad vom Typ Glamour 125 des Herstellers Hero Honda mit der PCC Technologie ausgerüstet. In umfangreichen Tests wurde das Systemverhalten mit und ohne PCC Technologie ermittelt.

Emissionstest beim TÜV Nord in der Originalkonfiguration zeigten, dass das Fahrzeug wegen der Überschreitung der Abgaswerte bei den Kohlenwasserstoffen (HC) in der europäischen Gemeinschaft nicht in Verkehr gebracht werden darf. Die vorhandenen technischen Maßnahmen (elektronische Zündung, Sekundärluftsystem und Oxidationskatalysator), die der Hersteller eingesetzt hat, reichen nicht aus, um die gesetzlichen Grenzwerte zu erfüllen

Die Testergebnisse aus den Motorprüfstands- und den Fahrversuchen zeigen eine Behinderung der Fahrdynamik, durch unzureichende Gemischbildung mit Überfettung des Gemisches ($\lambda=0,7$). Der Kraftstoffverbrauch von 1,89 l/100km im NEFZ bestätigen die fette Abstimmung des Motors. Die geringeren Stickoxid-Emissionen (NO_x) werden unter Zunahme der Kohlenmonoxid- (CO) und Kohlenwasserstoffemissionen (HC) erkauft. Der Oxidationskatalysator oxydiert die CO und HC-Bestandteile des Abgases dann unter Zuhilfenahme des Sauerstoffüberschusses aus dem Sekundärluftsystem zu Kohlendioxid (CO₂) und Wasserdampf (H₂O). Dieser Vorgang geht jedoch zu Lasten des Kraftstoffverbrauchs und führt damit zu einem erhöhten CO₂-Ausstoß.

Der Einsatz der PCC Technologie erlaubt im gleichen Motor nachweislich einen stöchiometrischen Betrieb. Hierdurch lassen sich nun alle Abgaskomponenten (CO, HC, NO_x) reduzieren. Wegen des damit verbundenen mageren Motorenbetriebs wird der Kraftstoffverbrauch (ca. 10%) und damit auch die CO₂-Emissionen abgesenkt. Die Bedeutung des Zweirades mit geringem Hubraum (< 150 ccm) für die Mobilität zeigen hohe Produktionszahlen von mehr als 40 Millionen Einheiten pro Jahr (in 2005-2007). Die globale Umweltbelastung durch Zweiräder aufgrund des Einsatzes einfacher bzw. veralteter Technologie wird wenig diskutiert. Hierbei sind zum einen die Wirkung der giftigen Abgasbestandteile (CO, HC, NO_x) und zum anderen die hohen CO₂-Emissionen auf die Umwelt zu bewerten. Eine theoretische Betrachtung ergibt, unter der Annahme, dass alle Zweiräder weltweit mit der PCC Technologie ausgestattet sind, bei unterschiedlichen täglichen Fahrleistungen (10, 25 und 50 km pro Tag) die in **Abbildung 6.1** dargestellten CO₂-Einsparpotentiale.

Der in den Test weiterhin genutzte originale Oxidationskatalysator ist nicht für den stöchiometrischen Betrieb optimiert. Mit einem Drei-Wege-Katalysator sollten sich deshalb noch bessere Abgasergebnisse erzielen lassen, insbesondere die NO_x-Emissionen sollten durch den Einsatz eines Drei-Wege-Katalysators deutlich gesenkt werden können. Hierzu wären entsprechende Testmuster und weitere Versuche notwendig. Es ist nicht auszuschließen, dass dann auch das Potential zur Erfüllung zukünftiger Emissionsgrenzwerte (EU IV) aufgezeigt werden kann. Mit einem derartigen Nachweis werden letzte Hürden für die Serieneinführung der PCC Technologie abgebaut, da so auch die Zukunftssicherheit für die Motorradhersteller gegeben ist.

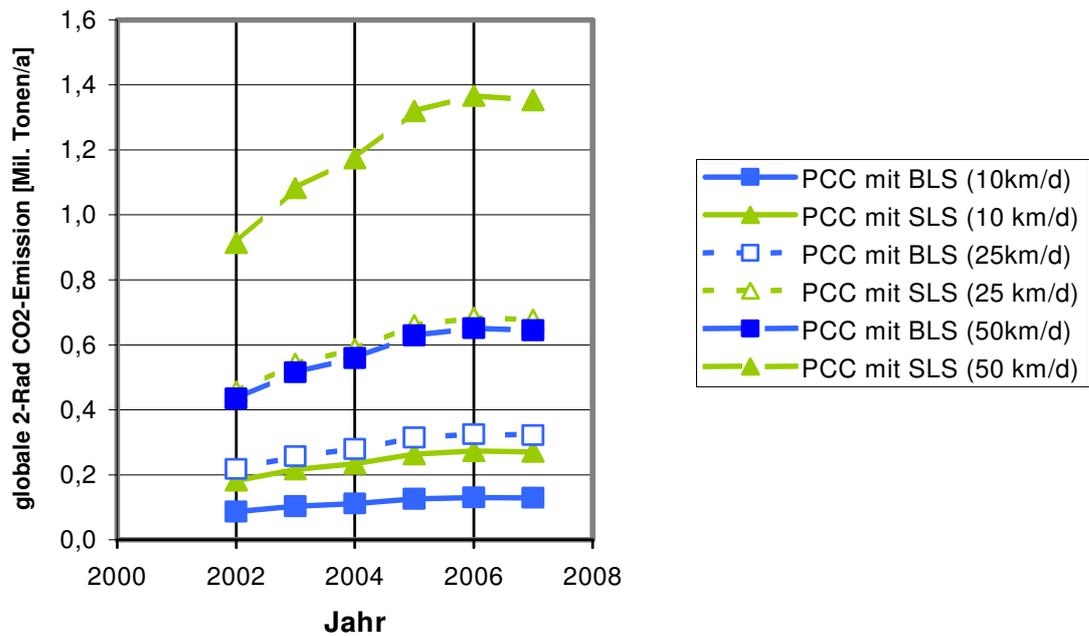


Abbildung 6.1: Jährliche CO₂-Einsparpotentiale bei 100% Einsatz der PCC Technologie mit unterschiedlichen Fahrleistungen

7. Literaturverzeichnis

- /2.1/ n.n., Richtlinie 97/68/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 16.12.1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emissionen von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L59, 27.02.1998
- /2.2/ n.n., Richtlinie 2002/88/EG des Europäischen Parlamentes und Rates vom 09.12.2002 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Maßnahmen zur Bekämpfung der Emissionen von gasförmigen Schadstoffen und luftverunreinigenden Partikeln aus Verbrennungsmotoren für mobile Maschinen und Geräte, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L35, 11.02.2003
- /2.3/ n.n., Richtlinie 2003/77/EG des Europäischen Parlamentes und Rates vom 11.08.2003 zur Änderung der Richtlinien 97/24/EG und 2002/24/EG des Europäischen Parlaments und des Rates über die Typgenehmigung für zweirädrige oder dreirädrige Kraftfahrzeuge, Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaft L211/24, 21.08.2003
- /2.4/ J. Neumann, Marktrecherche, VEMAC GmbH & Co. KG, 2005-2008
- /2.5/ M. Düsterhöft, M. Reke, R. Blum *„Präzise Gemischregelung für kleine Ottomotoren*, Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Vieweg Verlag, Jahrgang 68, Oktober 2007
- /4.1/ Univ. Prof. Dr.-Ing. S. Pischinger, *Verbrennungsmotoren*, Vorlesungsdruck Band 2, Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen RWTH Aachen, 21. Auflage, Oktober 2000
- /4.2/ www.kfztech.de
- /4.3/ n.n., Robert Bosch GmbH, *Ottomotor-Management*, Vieweg Verlag, 2. Auflage, 2005
- /4.4/ S. P. Grobosch, *Entwicklung und Untersuchung einer Regelungsmethode für elektronisch geregelte fremdgezündete Kleinmotoren*, Diplomarbeit RWTH Aachen & VEMAC GmbH & CO. KG, Juli 2007

- /5.1/ www.siemens.de
- /5.2/ H. Obergünner, *Aufbau und Inbetriebnahme eines Motorprüfstandes für Kleinmotoren unter Berücksichtigung der Prüfstandsmess- und Automatisierungssoftware Vita*, Diplomarbeit FH Aachen & VEMAC GmbH & CO. KG, April 2008
- /5.3/ www.vemac.de
- /5.4/ n.n., *Piezo-Vergaser für aktuelle Abgasnorm von mobilen Arbeitsmaschinen*, Motortechnische Zeitschrift (MTZ), Vieweg Verlag, Jahrgang 69, Dezember 2008
- /5.5/ M. Düsterhöft, *Mechatronische Systeme, die Basis für zukünftige Mobilität, Im Blickpunkt, Deutschlands Elite-Institute*, ALPHA Informationsgesellschaft mbH in Zusammenarbeit mit Institut für Kraftfahrzeuge (IKA) RWTH Aachen, 1 Auflage, 2008
- /5.6/ www.koelnmesse.de
- /5.7/ M. Düsterhöft, *PCC Technology, NIMMSYS „Nanao-Technology Integrated Manufacturing and Microsystems for Automotive and Machine Tool Sectors“*, Indo-German Symposium at Central Manufacturing Technology Institute (CMTI), Bangalore (Indien) 11.-12. Februar 2008
- /5.8/ K. Krieger, U. Projahn, *Diesel-Kraftstoffqualität- Erkenntnisse aus Sicht des Einspritzsystemlieferanten*, 9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2000, Band II Seite 816, Oktober 2000
- /5.9/ D. Schöppe, G. Hardouin, F. Monnier, P. Lacey, V. Lafon, A. Rossi, A. Orlovic, S. Zuelch, *Herausforderungen an moderne Common Rail Einspritzsysteme beim Einsatz weltweiter Kraftstoffe*, 16. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2007, Band II Seite 1011, Oktober 2007

Anhang

Kurzprotokolle der IFM Essen

1. TÜV Protokoll Originalkonfiguration
2. TÜV Protokoll PCC Konfiguration mit Breitbandlambdasonde
3. TÜV Protokoll PCC –Konfiguration mit Sprunglambdasonde

Kurzprotokoll IFM Essen

Testbegleitdaten &97_24 EU3 > (&B) verd+Beutel

Bediener:	Michelmann	Fahrkurve:	97_24EU3
Fahrer:	Michelmann	Kilometerstand:	15
Schaltpunkttabelle:	krad	Testdatum:	28.09.2007
ASC Konfiguration:	OTTO		
Bemerkung 1:			
Bemerkung 2:			

Fahrzeugdaten VEMAC_Hero Honda

Auftraggeber:	VEMAC	Auftragsnummer:	
Hersteller:	Hero Honda	Motorcode:	
Fahrzeugmodell:	Glamour	Hubraum [cm³]:	125,000
Kennzeichen:		Getriebe:	
Fahrgestellnummer:	5LAMC16689	Reifengröße:	3.00-18

Rollendaten 97/24_EU3_SM200

Schwungmasse [kg]:	200	Coastdown [s]:	
F0 [N]:	17,6	F1 [N/(km/h)]:	0,000
F2 [N/(km/h)²]:	0,023	Simulationskoeffizient N:	

Kraftstoffdaten B-Referenz

Kraftstoffart:	Benzin	Heizwert [BTU/lb]:	18430
C Gehalt im Kraftstoff:	0,8669	Kraftstoffdichte[kg/l]:	0,754
	Benzin	HC Verhältnis:	1,800

Umgebungsdaten	Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt
Umgebungstemperatur:	[°C]	22,2	22,5	22,4		22,4
Luftdruck:	[mbar]	994,9	995,0	995,2		995,0
Relative Luftfeuchtigkeit:	[%]	49,4	48,4	48,1		48,5
NOX Korrekturfaktor:	[-]	0,927	0,927	0,925		0,926
Verdünnungsfaktor (Beutel):	[-]	120,49	137,79	231,93		163,40
CVS Volumen bei 20°C:	[m³]	81,103	162,060	70,238		313,401
CVS Volumen bei 0°C:	[m³]	75,570	151,005	65,447		292,022
Wegstrecke:	[km]	1,982	3,977	0,000		5,959
Fahrer Verletzung:	[s]	0,8	0,0	356,1		356,9
Anzahl Fahrerfehler:	[-]	2,0	0,0	1,0		3,0
Primärfilter Diff	[mg]					

Beutelmassen	Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt
HC	[g]	4,324	0,999			
NOX	[g]	0,290	0,525			
CO	[g]	7,083	3,739			
CO2	[g]	79,5	154,7			
Partikel	[mg]					

Beutelmassen/km	Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt	Limit 97/24_<150ccm_EU
HC	[g/km]	2,1821	0,2511			0,8932	0,800
NOX	[g/km]	0,1461	0,1321			0,1368	0,150
HC+NOX	[g/km]	2,3282	0,3832			1,0300	-
CO	[g/km]	3,5745	0,9401			1,8161	2,000
CO2	[g/km]	40,12	38,89			39,30	-
Partikel	[g/km]						

Verbrauch aus Beutel	Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt	Limit
Kraftstoffverbrauch	[l/100km]	2,200	1,720			1,880	
Kraftstoff-Wirtschaftlichkeit	[km/l]	45,452	58,136			53,199	
Kraftstoff-Wirtschaftlichkeit	[mi/gal]	107,040	136,910	0,000	0,000	125,284	

Grenzwertbetrachtung

Bemerkungen/Sonstiges

Kurzprotokoll IFM Essen

Testbegleitdaten		&97_24 EU3 > (&B) verd+Beutel						
Bediener:	Terschüren	Fahrkurve:	97_24EU3					
Fahrer:	Terschüren	Kilometerstand:						
Schaltpunkttabelle:	krad	Testdatum:	30.05.2008					
ASC Konfiguration:	OTTO							
Bemerkung 1:								
Bemerkung 2:								
Fahrzeugdaten		VEMAC_Hero Honda						
Auftraggeber:	VEMAC	Auftragsnummer:						
Hersteller:	Hero Honda	Motorcode:						
Fahrzeugmodell:	Glamour	Hubraum [cm³]:	125.000					
Kennzeichen:		Getriebe:						
Fahrgestellnummer:	5LAMC16689	Reifengröße:	3.00-18					
Rollendaten		97/24 EU3 SM200						
Schwungmasse [kg]:	200	Coastdown [s]:						
F0 [N]:	17,6	F1 [N/(km/h)]:	0.000					
F2 [N/(km/h)²]:	0.023	Simulationskoeffizient N:						
Kraftstoffdaten		B-Referenz						
Kraftstoffart:	Benzin	Heizwert [BTU/lb]:	18430					
C Gehalt im Kraftstoff:	0.8669	Kraftstoffdichte[kg/l]:	0.754					
	Benzin	HC Verhältnis:	1.800					
Umgebungsdaten		Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt	
Umgebungstemperatur:	[°C]	22.4	22.8	23.1			22.8	
Luftdruck:	[mbar]	999.1	999.2	999.2			999.2	
Relative Luftfeuchtigkeit:	[%]	53.5	52.4	52.0			52.6	
NOX Korrekturfaktor:	[-]	0.950	0.952	0.954			0.952	
Verdünnungsfaktor (Beutel):	[-]	132.45	139.53	299.53			190.50	
CVS Volumen bei 20°C:	[m³]	81.332	162.419	83.022			326.773	
CVS Volumen bei 0°C:	[m³]	75.784	151.339	77.358			304.481	
Wegstrecke:	[km]	1.968	3.957	0.000			5.925	
Fahrer Verletzung:	[s]	0.0	0.0	0.0			0.0	
Anzahl Fahrerfehler:	[-]	0.0	0.0	0.0			0.0	
Primärfilter Diff	[mg]							
Beutelmassen		Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt	
HC	[g]	1.084	0.932	0.000			2.016	
NOX	[g]	0.284	0.557	0.000			0.841	
CO	[g]	2.607	4.146	0.000			6.754	
CO2	[g]	79.1	147.9	0.0			227.0	
Partikel	[mg]							
Beutelmassen/km		Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt	Limit 97/24 <150ccm_EU
HC	[g/km]	0.5509	0.2356	#DIV/0!			0.3403	0.800 43%
NOX	[g/km]	0.1442	0.1409	#DIV/0!			0.1420	0.150 95%
HC+NOX	[g/km]	0.6951	0.3764	#DIV/0!			0.4823	-
CO	[g/km]	1.3249	1.0477	#DIV/0!			1.1398	2.000 57%
CO2	[g/km]	40.19	37.38	#DIV/0!			38.32	-
Partikel	[g/km]							
Verbrauch aus Beutel		Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt	Limit
Kraftstoffverbrauch	[l/100km]	1.839	1.662	#DIV/0!			1.721	mit Licht!
Kraftstoff-Wirtschaftlichkeit	[km/l]	54.368	60.169	#DIV/0!			58.109	
Kraftstoff-Wirtschaftlichkeit	[mi/gal]	128.036	141.697	#DIV/0!	0.000		136.847	
Grenzwertbetrachtung								

Bemerkungen/Sonstiges

Kurzprotokoll IFM Essen

Testbegleitdaten .&97_24 EU3 > (&B) verd+Beutel

Bediener:	Terschüren	Fahrkurve:	97_24EU3
Fahrer:	Terschüren	Kilometerstand:	
Schaltpunkttabelle:	krad	Testdatum:	30.05.2008
ASC Konfiguration:	OTTO		
Bemerkung 1:	Test 2		
Bemerkung 2:	andere Sonde		

Fahrzeugdaten	VEMAC Hero Honda		
Auftraggeber:	VEMAC	Auftragsnummer:	
Hersteller:	Hero Honda	Motorcode:	
Fahrzeugmodell:	Glamour	Hubraum [cm³]:	125.000
Kennzeichen:		Getriebe:	
Fahrgestellnummer:	5LAMC16689	Reifengröße:	3.00-18

Rollendaten	97/24 EU3 SM200		
Schwungmasse [kg]:	200	Coastdown [s]:	
F0 [N]:	17,6	F1 [N/(km/h)]:	0.000
F2 [N/(km/h)²]:	0.023	Simulationskoeffizient N:	

Kraftstoffdaten	B-Referenz		
Kraftstoffart:	Benzin	Heizwert [BTU/lb]:	18430
C Gehalt im Kraftstoff:	0.8669	Kraftstoffdichte[kg/l]:	0.754
	Benzin	HC Verhältnis:	1.800

Umgebungsdaten	Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt
Umgebungstemperatur:	[°C]	23.3	23.5	23.4		23.4
Luftdruck:	[mbar]	999.3	999.4	999.5		999.4
Relative Luftfeuchtigkeit:	[%]	51.1	50.3	50.4		50.5
NOX Korrekturfaktor:	[-]	0.952	0.952	0.951		0.951
Verdünnungsfaktor (Beutel):	[-]	133.74	137.13	294.70		188.53
CVS Volumen bei 20°C:	[m³]	81.261	162.311	83.357		326.929
CVS Volumen bei 0°C:	[m³]	75.718	151.239	77.671		304.627
Wegstrecke:	[km]	1.973	3.948	0.000		5.922
Fahrer Verletzung:	[s]	0.0	0.1	356.1		356.2
Anzahl Fahrerfehler:	[-]	0.0	1.0	1.0		2.0
Primärfilter Diff	[mg]					

Beutelmassen	Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt
HC	[g]	0.934	0.963	0.000		1.897
NOX	[g]	0.280	0.564	0.000		0.844
CO	[g]	2.803	5.141	0.000		7.944
CO2	[g]	74.8	145.5	0.0		220.3
Partikel	[mg]					

Beutelmassen/km	Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt	Limit 97/24_<150ccm_EU
HC	[g/km]	0.4733	0.2439	#DIV/0!		0.3203	0.800 40%
NOX	[g/km]	0.1420	0.1428	#DIV/0!		0.1425	0.150 95%
HC+NOX	[g/km]	0.6154	0.3866	#DIV/0!		0.4628	-
CO	[g/km]	1.4203	1.3021	#DIV/0!		1.3415	2.000 67%
CO2	[g/km]	37.89	36.85	#DIV/0!		37.20	-
Partikel	[g/km]						

Verbrauch aus Beutel	Einheit	Phase 1	Phase 2	Phase 3	Phase 4	Gesamt	Limit
Kraftstoffverbrauch	[l/100km]	1.739	1.658	#DIV/0!		1.685	mit Licht!
Kraftstoff-Wirtschaftlichkeit	[km/l]	57.493	60.329	#DIV/0!		59.354	
Kraftstoff-Wirtschaftlichkeit	[mi/gal]	135.397	142.076	#DIV/0!	0.000	139.778	

Grenzwertbetrachtung

Bemerkungen/Sonstiges

