

Abschlussbericht zum Verbundvorhaben

Entwicklung eines Abgassensors zur Regelung von Verbrennungsmotoren und
Abgasnachbehandlungssystemen- CatSens

Förderkennzeichen
Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)
BMBF Förderkennzeichen: 16SV913/2
Förderungsprogramm: "Mikrosystemtechnik 1994 - 1999"

Thema

Entwicklung eines Abgassensors zur Regelung von Verbrennungsmotoren und
Abgasnachbehandlungssystemen - CatSens

von

Dipl.-Ing. I. Milanovic

Projektleiter

Dr.-Ing. G. Lepperhoff

FEV Motorentechnik GmbH, Aachen

Mai 2002

Inhaltsverzeichnis

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	2
<u>I KURZDARSTELLUNG</u>	6
<u>1 Aufgabenstellung</u>	6
<u>2 Projektstruktur</u>	7
<u>3 Planung und Ablauf des Vorhabens</u>	8
<u>4 Stand der Wissenschaft und Technik</u>	9
<u>5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen</u>	11
<u>II. EINGEHENDE DARSTELLUNG</u>	12
<u>1. Ergebnisse</u>	13
<u>AP I: Konzeptphase Sensorgehäuse einschließlich Kühlsystem</u>	13
<u>AP II: Prüfstandstests an Diesel- und Ottomotoren und Optimierung des Sensorsystems</u>	17
<u>AP III: Ausarbeitung der Algorithmen zur Motorregelung</u>	38
<u>AP IV: Demonstrationstests mit Regelung auf Prüfstand</u>	42
<u>2 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen</u>	45
<u>3 Fortschritte auf dem Gebiet NO_x- Sensorik</u>	47
<u>Erweiterung der AP II</u>	47
<u>AP II a: Benchmarking- Analyse verfügbarer NO_x- Sensoren (Prototypen)</u>	47
<u>4. Geplante Veröffentlichung des Ergebnisses</u>	51
<u>III. LITERATUR</u>	52

I Kurzdarstellung

1 Aufgabenstellung

Im Rahmen des Verbundprojektes soll ein Sensorsystem zur Regelung der Verbrennungsprozesse in Kleinf Feuerungsanlagen und Verbrennungsmotoren sowie zur Regelung und Überwachung (On-Board Diagnose) von Abgasnachbehandlungseinrichtungen wie z.B. NO_x- Adsorberkatalysatoren in Kraftfahrzeugen, entwickelt werden.

Die Entwicklung des Sensorsystems umfasst folgende wissenschaftliche und technische Zielsetzungen:

- Messung der NO_x- Konzentration im Abgas von Kleinf Feuerungsanlagen und Verbrennungsmotoren
- zuverlässige Funktion bei Sauerstoffgehalten von 0,1 bis ca. 6 %
- Robustheit gegen Schwefelverbindungen, Schmieröladditive und Antiklopffmittel
- Langzeitstabilität des Nullpunktes
- geringe Querempfindlichkeit gegenüber CO und H₂,
- schnelles Ansprechverhalten (100 ms nach Signalsprung)
- geringer Eigenenergiebedarf
- geringer Baugröße
- zuverlässiger Betrieb bei extremen Umweltbedingungen (Temperatur, Vibration, Feuchte)
- hohe Lebensdauer (10 Jahre)
- niedriger Preis

Des weiteren sollen Algorithmen erarbeitet werden die es ermöglichen einen NO_x/HC- Sensor optimal in die Steuerung und Regelung eines Verbrennungsmotors mit Abgasnachbehandlung unter Berücksichtigung eines verbesserten Kraftstoffverbrauches zu integrieren. Zu diesem Zweck werden die erarbeiteten Algorithmen getestet und optimiert.

2 Projektstruktur

Die Entwicklung des Sensorsystems erfolgte unter Beteiligung folgender Projektpartner:

Projektpartner

- ETR: Elektrotechnik Rump, GmbH, Dortmund
- UST: Umweltsensortechnik GmbH, Geschwenda (Thüringen)
- IMS (FhG): Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Duisburg
- IAP: Institut für Angewandte Physik, Giessen
- FEV: FEV Motorentechnik GmbH, Aachen

Unterauftragnehmer

- IVAM: Interessengemeinschaft zur Verbreitung von Anwendungen der Mikrostrukturtechniken NRW. e.V., Dortmund
- VKA: Lehrstuhl für Verbrennungskraftmaschinen der RWTH, Aachen

Aufgaben der Partner

- ETR: Sensorentwicklung
- UST: Optimierung der Mikrostruktur der Sensorelemente (speziell Steigerung der thermischen Belastbarkeit und der Reaktionsgeschwindigkeit)
- IMS: Umsetzung der Auswertalgorithmen in eine elektronische Auswerteschaltung
- IAP: Untersuchung der Sensoren hinsichtlich Alterung und Schädigung im Abgasstrom
- FEV: Applikation der Sensorelemente im Abgas von Verbrennungsmotoren und Einbindung in die Regelkreise von Motoren und Abgasnachbehandlungssystemen

Aufgaben der Unterauftragnehmer

- IVAM: Unterstützung von ETR im Projektmanagement
- VKA: Unterstützung von FEV speziell bei grundlegenden Untersuchungen (z.B. Sensorkühlung)

3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Abbildung 1 stellt den ursprünglichen Zeitplan mit den Aufgaben der einzelnen Projektpartner dar. Im September 2001 erfolgte auf Antrag der Projektpartner eine Änderung dieses Zeitplans. Das auf Oktober 2001 gesetzte Projektende wurde auf den 31.12.2001 verschoben.

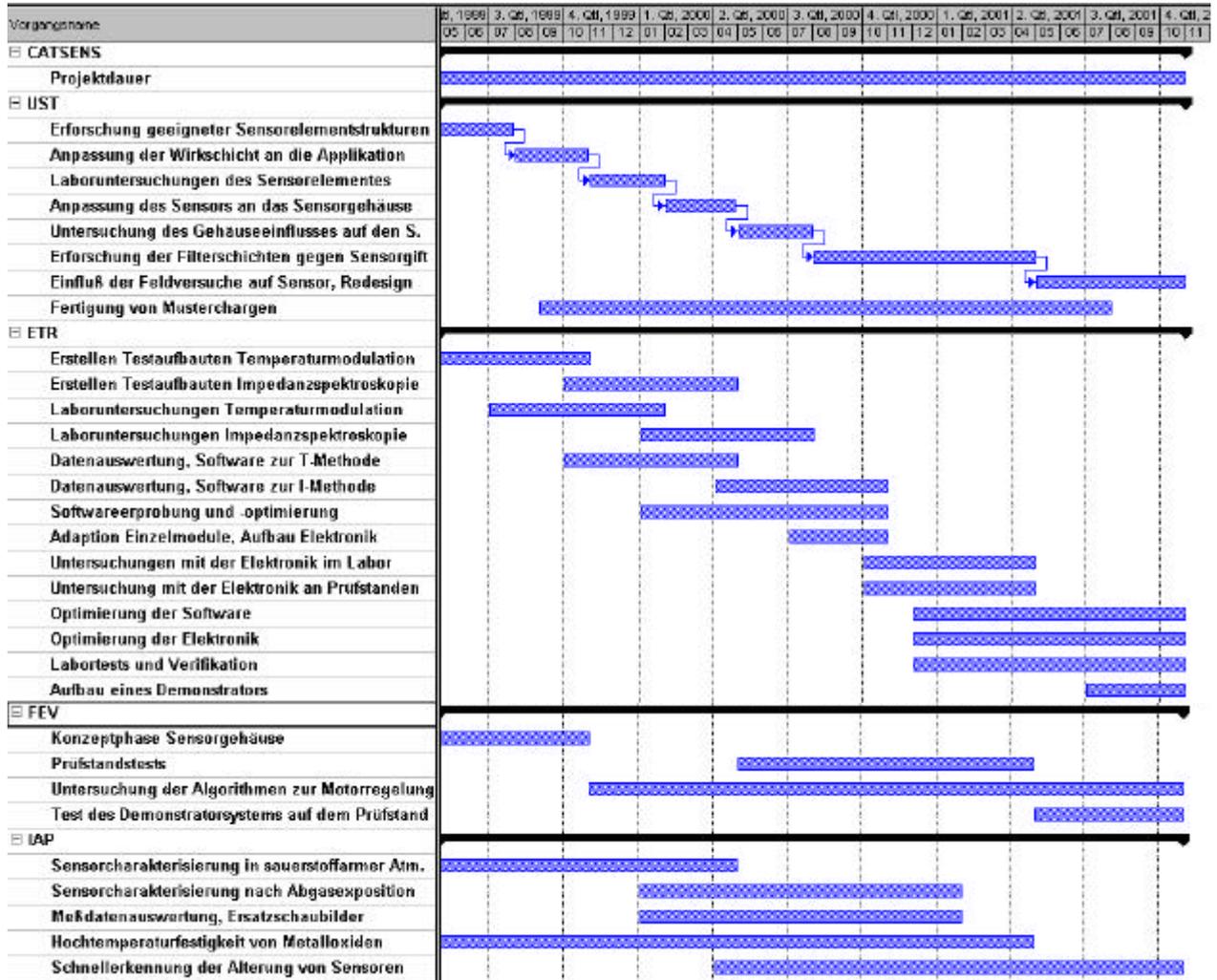


Abb. 1: Zeitplan und Aufgaben einzelner Projektpartner

4 Stand der Wissenschaft und Technik

Wissenschaftliche Basis

Auf der Oberfläche des Sensors adsorbieren im wesentlichen oxidierbare Substanzen. Diese wirken chemisch (reduzierend) auf das Metalloxid des Sensors und physikalisch auf die Oberflächengrenzübergänge zwischen den Korngrenzen der Oxid-Partikel ein. Dabei verändern die elektrischen Parameter die Schottky-Übergänge.

Halbleiter-Metallkontakte können als Sonderfall eines Heteroübergangs aufgefasst werden. Solche Kontakte können prinzipiell zwei mögliche Verhalten zeigen und heißen dann Schottky-Kontakt oder Ohmscher Kontakt. Ohmsche Kontakte die als Steuerelektroden ein ähnliches Gleichrichterverhalten wie eine pn-Diode aufweisen werden Schottky-Übergänge genannt.

Reduzierende Substanzen wirken chemisch auf das Metalloxid durch Aufoxidation und diffundieren in das Sensormaterial. Sie wirken an den Grenzflächenübergängen zwischen Platinkontaktierung und Korngrenzen. Ausschließlich an dieser Stelle verändern die elektrischen Parameter der Schottky-Übergänge.

Der Sensor ist Bestandteil einer Schwingschaltung deren Schwingungen durch das Umschalten frequenzbestimmender Bauteile verändert wird. Es ist möglich, die gasinduzierten Frequenzänderungen als Maß für Impedanzänderung heranzuziehen und im Spektrum zu diskriminieren. Dadurch lassen sich Aussagen über die jeweilige Gaskonzentration bzw. Gasgruppe machen. Entgegen der üblichen Methoden wird der elektrische Widerstand des Metalloxides hierbei nicht betrachtet.

Aufbau des Sensors

Der Sensor (Abbildung 2) besteht aus einem Platin-Heizelement, der sensitiven Schicht (dotiertes WO_3) und den Elektroden. Die Bauteile sind auf einem Al_2O_3 - Träger aufgebracht und werden durch Platinleitungen angesteuert.

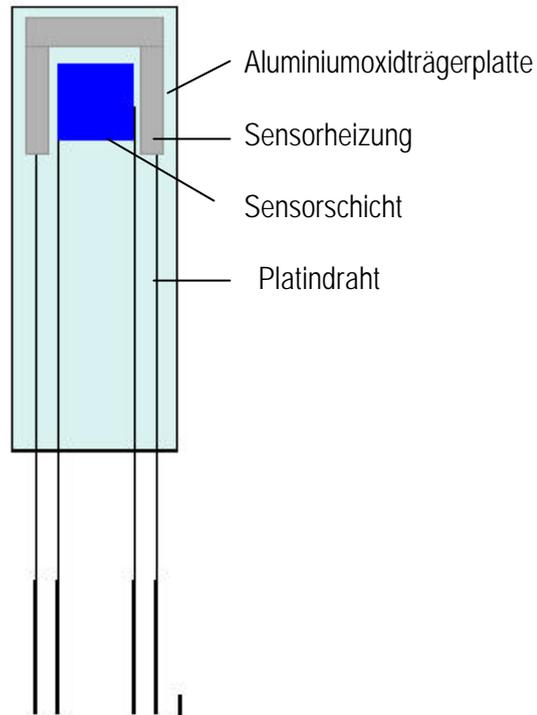


Abb. 2: Aufbau des Sensors

Wirkungsweise

Die Heizung hält die gassensitive Schicht bei einer konstanten Temperatur. Dafür sind die Platindrähte in hochreines Aluminiumoxid gebettet, das einen Wärmeleitwert von 30 - 40 W/mK hat. Die Heizung und die Widerstandsmessung am Sensor beeinflussen sich gegenseitig. Daher wird die Heizung getaktet und in den Pausen das Sensorsignal detektiert. Die Ansteuerung hat eine Frequenz von 1000 Hz. Nach Erkenntnissen von UST wird das NO in der sauerstoffreichen Atmosphäre an der Sensoroberfläche zu NO_2 oxidiert, welches dann den Potentialunterschied und somit das Sensorsignal verursacht.

5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Im Laufe des Projektes wurde der stetige Austausch von Erfahrungen und aktuellen Informationen durch regelmäßige Arbeitstreffen mit den Projektpartnern gewährleistet.

Tabelle 1 zeigt eine Übersicht der Arbeitstreffen der Projektteilnehmer ETR, UST,FEV, IAP:

Datum	Ort	Teilnehmer
13.05.1999	Geschwenda	UST, ETR
19.07.1999	Dortmund	UST, ETR
20.09.1999	Dortmund	UST,ETR
10.12.1999	Geschwenda	UST, ETR
15.12.1999	Dortmund	UST, ETR, FEV, IAP
28.01.2000	Dortmund	UST, ETR
01.02.2000	Gießen	UST, IAP
16./17.05.2000	Aachen	UST, ETR, FEV
15.06.2000	Geschwenda	UST, ETR
20.06.2000	Geschwenda	UST, IAP
27.07.2000	Dortmund	UST, ETR
20.10.2000	Dortmund	UST, ETR
03.11.2000	Geschwenda	UST, FEV
27.11.2000	Aachen	UST, FEV
15.12.2000	Geschwenda	UST, ETR
23.01.2001	Dortmund	UST, ETR, FEV, IAP
27.03.2001	Dortmund	UST, ETR
18.04.2001	Gießen	UST, IAP
12.07.2001	Berlin	UST, ETR
31.07.2001	Dortmund	UST, ETR
07.08.2001	Dortmund, Aachen	UST, ETR, FEV
22.08.2001	Dortmund	UST, ETR, FEV, IAP
23.11.2001	Aachen	UST, FEV
29.1.2002	Aachen	UST, ETR, FEV

Tabelle 1: Übersicht zu Arbeitstreffen der Projektteilnehmer

II. Eingehende Darstellung

Aufgabenstellung der Arbeitspakete API – AP IV der beteiligten Projektpartner FEV bzw. VKA wurde definiert wie folgt :

- AP I: Konzeptphase Sensorgehäuse einschl. Kühlsystem
- AP IIA: Prüfstandtests, Optimierung der Konstruktion
Untersuchung des Sensorhalters
Untersuchung des Sensors Entwicklungsstand Nr.1
Untersuchung des Sensors Entwicklungsstand Nr.2
- AP III: Ausarbeitung der Algorithmen zur Motorregelung
Modell zur Modellierung der NO_x- Adsorption und Reduktion
Benchmark von NO_x- Adsorberkatalysatoren
- AP IV: Demonstrationstests mit Regelung auf Prüfstand

Das zusätzlich eingeführte Arbeitspaket AP II B beinhaltet eine Analyse technischer Eigenschaften der FEV bekannten Sensorprototypen. Diese Analyse sollte dazu dienen, technische Maßstäbe und Entwicklungszielwerte bei der Entwicklung des CatSens- Sensors klar zu definieren:

- AP II B: Benchmark NO_x- Sensoren (Prototypen)

1. Ergebnisse

AP I: Konzeptphase Sensorgehäuse einschließlich Kühlsystem

Bei der Konstruktion des Sensorgehäuses, besonders im Automobilbau, sollen Anforderungen hinsichtlich der Einflüsse von Temperatur, Feuchtigkeit, Kondensation, aggressiven Stoffen im Abgasstrom und Schwingungen berücksichtigt werden.

Das Abgas von Verbrennungsmotoren kann Temperaturen von über 900 °C erreichen. Da die maximale Betriebstemperatur der Sensoren 450° C nicht überschreiten darf, ist ein Kühlsystem notwendig, welches kostengünstig, effektiv und langzeitstabil ist.

Des weiteren unterliegen Sensorelemente im Dauerbetrieb einer Drift. Zu Kompensation dieser Drift ist es erforderlich einen Abgleich, z.B. eine Nullpunktskalibrierung vorzunehmen.

In der Konzeptphase wurde das Gesamtgehäuse einschließlich Sensorelement, Abgas- und Luftführung entworfen und hinsichtlich seiner Adaption und Funktionsfähigkeit in mehreren Schritten verbessert. Dabei wurde berücksichtigt, dass das Gesamtgehäuse in das Abgassystem integrierbar und auswechselbar sein muss sowie dem Beschleunigungs- und Verzögerungsanforderungen des Abgassystems genügen muss. Die von dem Einsatzort abhängigen technischen Anforderungen an den Sensor sind in dem Kapitel 2: "Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen" näher erläutert.

Bei dem aus der Konzeptphase ausgewähltem Entwurf des Gesamtgehäuses wurde primär Wert auf die Funktionsfähigkeit des Gesamtsystems gelegt, während die Verkleinerung und die Fertigbarkeit des Systems einer weiteren Entwicklungsphase vorbehalten bleibt.

Die wichtigsten Merkmale des in der Konzeptphase entwickelten Sensorgehäuses sind:

- metrisches Gewinde zur gasdichten Befestigung an die Abgasanlage
- ausreichende Kühlwirkung durch optimierte Anzahl, Größe und Position der Kupferkühl lamellen für die Wärmeableitung
- elektrische Beheizung zur Vermeidung von Ablagerungen

Da der Sensor bei tiefer Abgastemperatur elektrisch auf Arbeitstemperatur gehalten wird ist dessen Betrieb im kalten Abgasstrang nicht kritisch. Im heißen Abgasstrang, oberhalb der Betriebstemperatur des Sensors, muss das Sensorgehäuse über eine ausreichende Kühlwirkung verfügen, um eine Schädigung des Sensors durch hohe Temperaturen zu verhindern. Zu diesem Zweck wurden Kupferlamellen für die Wärmeableitung an das Sensorgehäuse angebracht.

Um eine Ablagerung von Rußpartikeln durch Thermophorese auf der Oberfläche zu verhindern wurde in die Stirnflächenvertiefung ein Oberflächenheizelement integriert, das die Oberfläche auf ca. 400 °C hält.

Der Sensor und ein Minithermoelement wurden in den Innenraum des Gehäuses mittels einer Keramikmasse eingegossen. Das Thermoelement diente in der Entwicklungsphase zur Messung der Sensortemperaturen und wurde bei einer Serienproduktion entfallen.

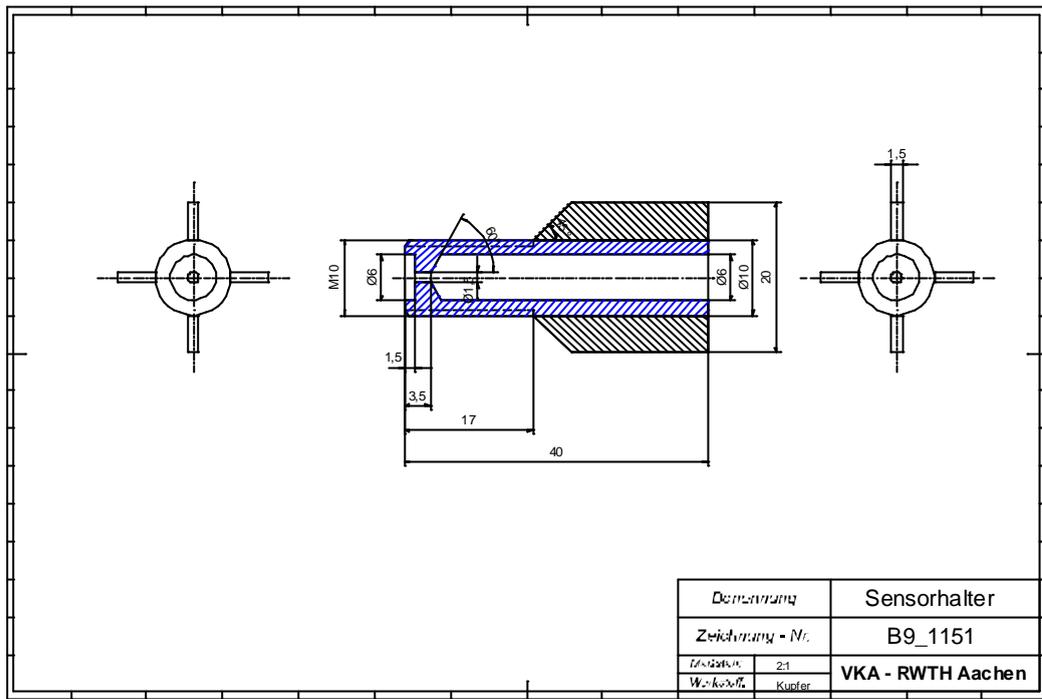


Abb. 3: Sensorgehäuse Version 1

Die Untersuchungen bezüglich der Anforderungen für Sensor und Sensorgehäuse ergab, dass ein rasches Ansprechen des Sensors essentiell für die praktische Anwendung ist. Diese Anforderungen führten zu dem Entwurf des Sensorgehäuses „Version 2“ (Abbildung 4).

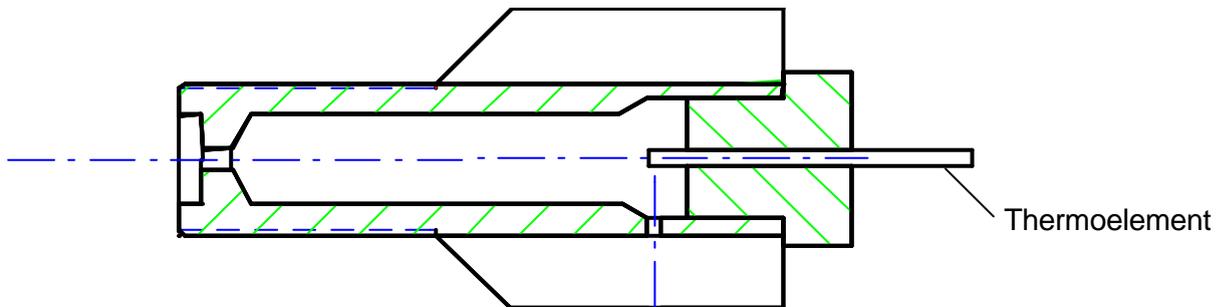


Abb. 4: Sensorgehäuse Version 2 mit einem Thermoelement

Diese Version unterscheidet sich von der Basisversion vorrangig durch eine zusätzliche Bohrung nahe der Position der aktiven Sensorschicht, die eine optimierte Gasströmung und damit ein rasches Ansprechen des Sensors durch Verkürzung der Gasströmungstotzeiten gewährleistet. An dieser Bohrung wurde nach der Herstellung ein passendes Röhrchen angelötet. Um den Gasstrom mittels der zweiten Öffnung zu variieren bzw. zu regulieren kann an dem Röhrchen eine Pumpe oder Drossel angeschlossen werden.

Untersuchung des Sensorgehäuses

Das Sensorgehäuse Version 2 wurde mit einem Thermoelement bestückt, welches die Temperatur an der Sensorposition detektiert. Entsprechend der mit Priorität verfolgten Applikation der Katalysatorsteuerung und Diagnose wurde dieses Sensorgehäuse anschließend in einem Versuchsfahrzeug mit direkteinspritzendem 1,8 l 4 Zylinder- Ottomotor nach dem Katalysator eingebaut. Dabei wurde die Temperatur des Thermoelements aufgezeichnet. Die Einbaulage des Sensorgehäuses ist in Abbildung 5 dargestellt.

- Versuchsträger
 - GDI 1.8l 4V, 4 Zylinder mit MMC Brennverfahren
- Einbaulage des CatSens Gehäuses – nach dem iridiumhaltigen DeNO_x- Katalysator

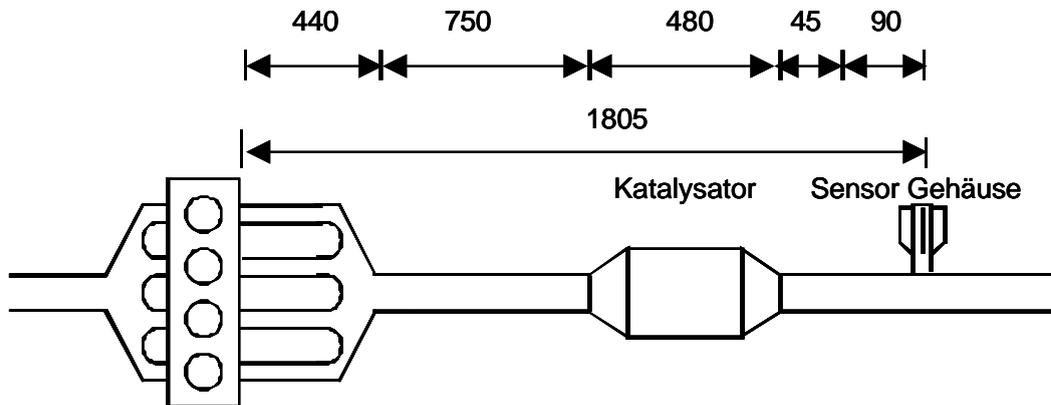


Abb. 5: Schematischer Aufbau der Abgasanlage mit Sensorgehäuse

In Abbildung 6 ist während des dynamischen Fahrbetriebs, das sowohl Vollastbeschleunigung als auch Teillastbetrieb umfasst, die Temperatur im Abgasstrang rot dargestellt, während die Temperatur im Sensorgehäuse blau gezeichnet ist.

Die starken Schwankungen der Abgastemperatur werden im Sensorgehäuse an der Sensorposition stark abgeschwächt registriert. Die Spitzentemperatur im Sensorgehäuse, abgesenkt durch Kühlwirkung der Kupferlamellen, liegt hier im geforderten Temperaturbereich von < 450 °C.

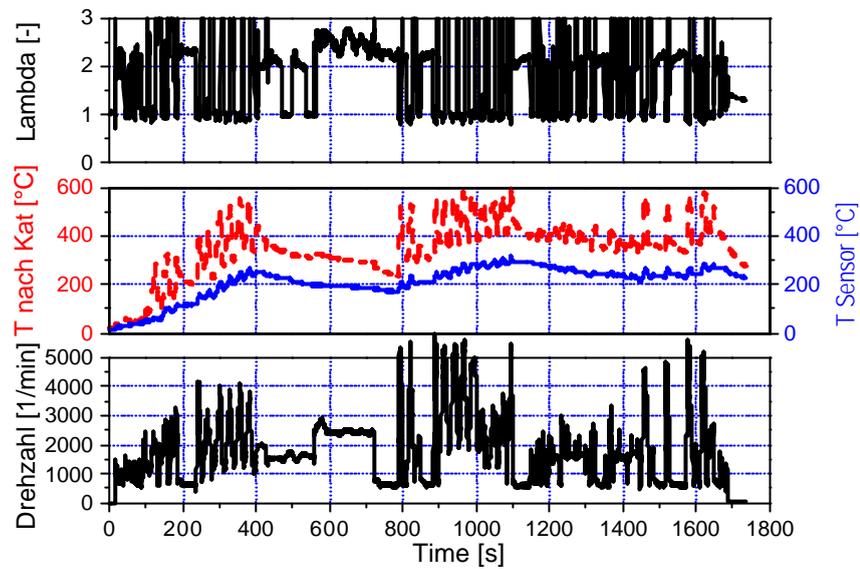


Abb. 6: Temperatur im Sensorgehäuse (blau) und im Abgas (rot) während des Fahrbetriebs.

Die Information über die thermische Sensitivität des Sensors, dank der Weiterentwicklung des Sensormaterials von Fa. UST, führte zu einem weiteren Konzept des Sensorgehäuses. Die eingesetzte technologische Lösung gewährleistet einen störungsfreien Betrieb des Sensors bei Temperaturen bis zu 700 °C. Daher konnte ein stark vereinfachtes Gehäuse ohne Kupferkühl lamellen für weitere Untersuchungen eingesetzt werden. Ein erster Demonstrator wurde gefertigt und mit dem von UST gelieferten Sensorelement versehen.

AP II: Prüfstandstests an Diesel- und Ottomotoren und Optimierung des Sensorsystems

Der erste CatSens Sensor Prototyp verfügte über eine Regel- und Auswerteelektronik die im Laufe des Projektes von der Fa. UST weiter entwickelt wurde. Im weiteren werden diese Entwicklungsstände als:

- Entwicklungsstand der Regel- und Auswerteelektronik des Sensors Nr.1 und
- Entwicklungsstand der Regel- und Auswerteelektronik des Sensors Nr.2

bezeichnet.

Entwicklungsstand der Regel- und Auswerteelektronik des Sensors Nr.1

In dieser Entwicklungsphase wurde der aktuelle CatSens- Abgassensor in dem Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand der FEV und in weiteren Versuchen im Fahrzeugbetrieb eines direkteinspritzenden Ottomotors getestet.

Der Versuchsträger wurde für die Messungen vorbereitet und mit Messtechnik zur Überwachung der Motorfunktion und der Verbrennung im Fahrbetrieb ausgerüstet. Über einen speziellen Kabelbaum wurden die Signale zur Datenaufzeichnungseinheit geleitet. Analog wurden die Signale des CatSens- Abgassensors aufgezeichnet.

Bei dem verwendeten Versuchsfahrzeug handelt es sich um einen Carisma GDI mit einem Hubvolumen von 1.8l, Baujahr 1997 der Mitsubishi Motor Company (MMC). Dies war das erste in Deutschland angebotene Fahrzeug welches serienmäßig mit direkteinspritzendem Ottomotor ausgerüstet ist.

- Versuchsträger
 - GDI 1.8l 4V, 4 Zylinder mit MMC Brennverfahren
- Abgasanlage- Serienstand
 - Iridiumhaltiger DeNO_x- Katalysator 4.64l
- Einbaulage des CatSens- Sensors nach dem iridiumhaltigen DeNO_x- Katalysator

In Abbildung 7 ist schematisch der Aufbau des Motors und der Abgasanlage mit eingebautem Sensor dargestellt.

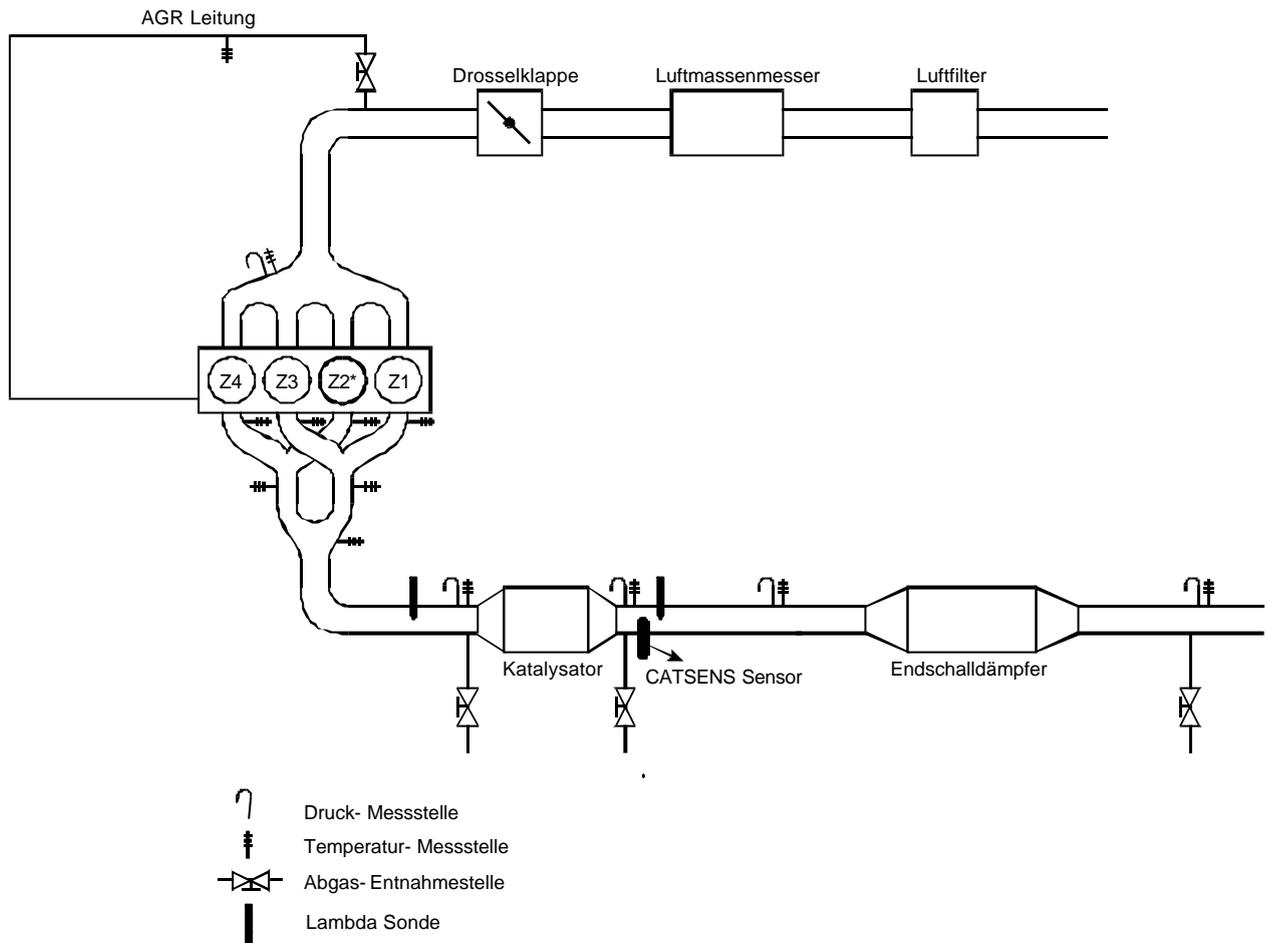


Abb. 7: Schematischer Aufbau des Motors und der Abgasanlage

Auf dem verwendeten Abgasrollenprüfstand können PKW- Abgastests von Otto- und Dieselfahrzeugen in den vom Gesetzgeber in Europa, Amerika und Japan vorgeschriebenen Fahrzyklen durchgeführt werden.

Um weitere Informationen zum Sensorverhalten zu erhalten wurden die Sensorsignale mit den Messwerten der konventionellen Abgasmessgeräte verglichen.

Für die Abgasmessung standen drei unabhängig voneinander arbeitende Messlinien zur Verfügung. Die Linie 1 war für Messungen im Rohabgas ausgelegt. In Linie 2 konnte sowohl Rohabgas als auch verdünntes Abgas gemessen werden. Linie 3 diente wahlweise zur Bestimmung des CO₂- Verdünnungsverhältnisses oder der AGR- Rate.

In der nachfolgenden Tabelle 2 sind die einzelnen Linien mit den vorhandenen Messgeräten und ihren zur Verfügung stehenden Messbereichen aufgeführt.

Messstelle	Messverfahren	Messbereich
Linie 1: Rohabgas vor oder nach Katalysator		
CO _{low}	NDIR	50 – 2500 ppm
CO _{high}	NDIR	0,5 – 10 Vol.%
CO ₂	NDIR	1 – 16 Vol.%
Nox	CLD	10 – 10000 ppm
HC	FID	10 – 10000 ppm
O ₂	PMD	2 – 25 Vol.%
Linie 2: Verdünntes Abgas oder Rohabgas nach Katalysator		
CO _{low}	NDIR	50 – 2500 ppm
CO _{high}	NDIR	0,5 – 10 Vol.%
CO ₂	NDIR	1 – 16 Vol.%
NOx	CLD	10 – 10000 ppm
HC	FID	10 – 10000 ppm
Linie 3: CO ₂ - Tracer oder AGR- Messung		
CO ₂	NDIR	1 – 16 Vol.%

Tabelle 2: Abgasmesstechnik

Während der Versuche wurden im Abgas die Konzentrationen von Kohlenwasserstoffen (HC), Stickoxiden (NO_x), Kohlenmonoxid (CO), Kohlendioxid (CO₂) und Sauerstoff (O₂) analysiert.

In Voruntersuchungen bei UST wurde der Sensor bereits erfolgreich in einem Dieselfahrzeug eingesetzt und getestet. Aus den Untersuchungen ging sowohl eine Korrelation der Sensorsignale mit der NO_x- Konzentration hervor als auch eine gute Stabilität des Sensormaterials.

In einem weiteren Entwicklungsschritt wurde der Sensor bei der FEV auf sein Verhalten im ottomotorischen Abgas untersucht. Im Gegensatz zum Dieselmotor wurde der verwendete Versuchsträger nicht ausschließlich mager, d.h. mit Sauerstoffüberschuss, sondern auch kurzzeitig mit fettem, d.h. mit Sauerstoffunterschuss, oder stöchiometrischem Luft- Kraftstoffgemisch betrieben. Ziel der ersten Untersuchungen im realen Abgas eines direkteinspritzenden Ottomotors war es, das Sensormaterial und die Sensorsignale unter typischen Bedingungen für den späteren Einsatz des Sensors bei Ottomotoren zu beobachten.

Für die Untersuchungen mit dem Mitsubishi Carisma wurde der neue europäische Fahrzyklus NEFZ, nach EU II Abgasnorm verwendet, da das Fahrzeug nach diesen Anforderungen zertifiziert wurde. Der Unterschied zwischen den Abgasnormen nach EU II gegenüber EU III bzw. EU IV ist der Vorlauf von 40 Sekunden Dauer nach dem Motorstart und vor der Befüllung der Abgasbeutel im CVS- System (Abbildung 8).

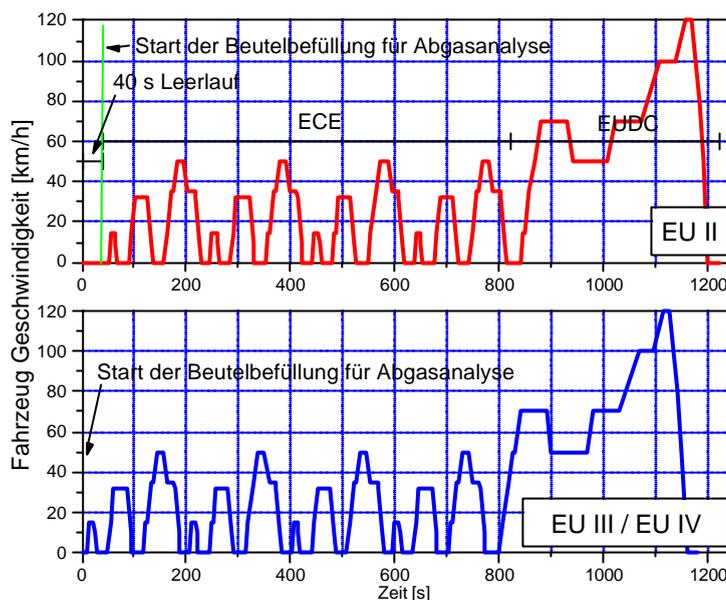


Abb. 8: Der neue europäische Fahrzyklus NEFZ

Da in diesen Untersuchungen das Testergebnis des Fahrzeugs nicht von Bedeutung ist, wird in den folgenden Diskussionen nur die kontinuierliche Messung der Schadstoffkomponenten betrachtet.

Das Versuchsfahrzeug wurde vor der Untersuchung mit dem CatSens- Sensor ausgerüstet und in der Konditionierhalle auf die gesetzlich vorgeschriebene Temperatur (20 °C) für den Abgastest gebracht. Der Start des Motors im EU II- Abgastest wurde auf der Zeitskala als Nullpunkt definiert. Ein Überblick über die gesamte Messung wird in Abbildung 9 gezeigt.

Die Messung des Sensorsignals wurde schon lange vor Motorstart begonnen. Der Sensorwiderstand liegt auf einem Niveau von ca. 3 kOhm an der Schicht 1 und über 30 kOhm an der Schicht 0. Werte in dieser Größenordnung wurden in der Vorentwicklungsphase mit diesem Sensortyp an Raumluft gemessen. Mit dem Motorstart zeigt sich ein sehr deutlicher Widerstandsabfall an den beiden sensitiven Schichten.

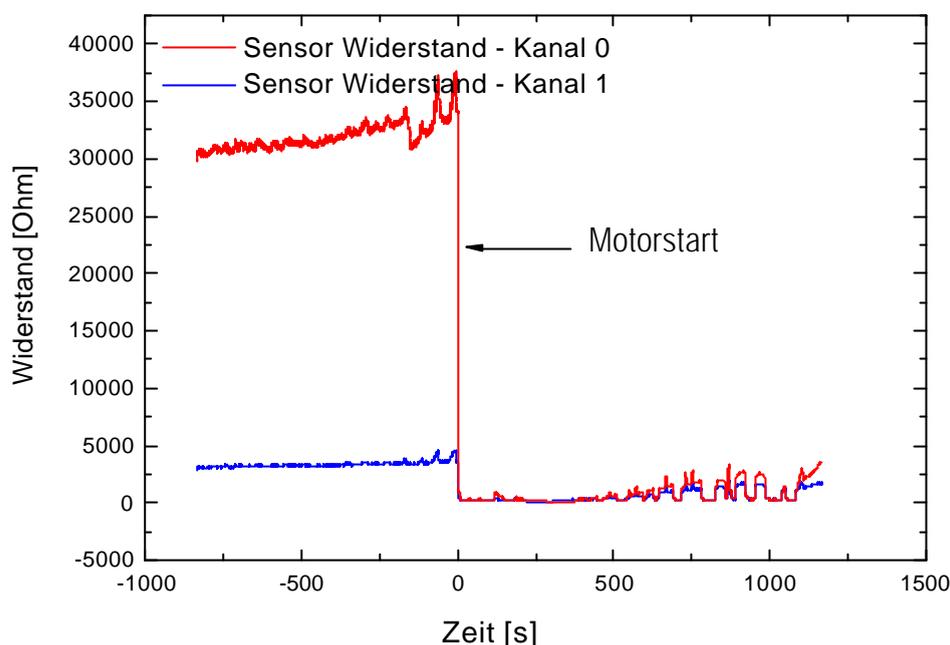


Abb. 9: Sensorwiderstand vor und während dem Fahrzyklus

Da das Fahrzeug vor der Untersuchung über 14 Stunden in der Konditionierhalle stand, kann davon ausgegangen werden, dass in der Abgasanlage vorwiegend Raumluft vorhanden war. Somit sind diese Werte plausibel.

Um das Verhalten des Sensors bei den sehr unterschiedlichen Bedingungen während des Fahrbetriebs besser interpretieren zu können und die maßgebenden Größen für das Sensorsignal zu bestimmen, werden im Folgenden die gemessenen Konzentrationen der einzelnen Schadstoffe im Abgas kurz dargestellt.

In Abbildung 10 ist im oberen Diagramm die Fahrgeschwindigkeit des Fahrzeuges im gefahrenen EU II- Fahrzyklus dargestellt. Das untere Diagramm zeigt auf derselben Zeitachse das Luft- Kraftstoffverhältnis Lambda, welches in der Abgasanlage mit einer konventionellen Breitband-Lambdasonde gemessen wurde. Die Lambdasonde wurde unmittelbar neben dem CatSens-Abgassensor eingebaut. Die Lambdamessung kann hier ab Motorstart direkt ausgewertet werden, da die Heiz- und Initialisierungsphase dieses Sensors durch vorzeitiges Freischalten der Sensorversorgungsspannung bereits vor dem Test abgeschlossen war.

Beim Motorstart wird der Ottomotor gewöhnlich fett, d.h. unterstöchiometrisch ($\lambda < 1$), betrieben, da der Motorlauf eine bessere Stabilität im kalten Zustand aufweist. In diesem Test erstreckte sich die Startphase auf etwas mehr als zwei Sekunden. Im weiteren Verlauf der Aufwärmphase bis ca. 200 Sekunden wird der Motor stöchiometrisch betrieben um den Katalysator schnell mit dem heißen Abgas auf Arbeitstemperatur zu bringen. Nach der Aufwärmphase erfolgt der Betrieb des Motors bevorzugt mit Sauerstoffüberschuss also magerem Gemisch. Für größeren Leistungsbedarf in den Beschleunigungsphasen wird der Motor mit stöchiometrischen Gemisch ($\lambda = 1$)

betrieben. Sobald vom Motor wenig Leistung gefordert wird schaltet die Motorsteuerung wieder auf den wirkungsgradvorteilhaften mageren Motorbetrieb um (Abbildung 10).

Um den Katalysator schnell auf Arbeitstemperatur zu bringen wurde die Kohlenwasserstoffemission des Mitsubishi Carisma 1.8l GDI in der Startphase durch eine späte Nacheinspritzung angehoben. Dabei erreicht während der Aufheizphase des Katalysators die Kohlenwasserstoffkonzentration sehr hohe Werte von über einem Volumenprozent. Nach zweihundert Sekunden ist die HC₃- Konzentration auf Werte von wenigen ppm (parts per million) abgesunken, da hier der Katalysator seine Betriebstemperatur erreicht hat. Eine weitere Absenkung der Emission ergibt sich aus der Oxidation der Kohlenwasserstoffe am betriebswarmen Katalysator, so dass gegen Ende des Abgastests nur noch wenige ppm Kohlenwasserstoffe nach Katalysator gemessen werden (Abbildung 10).

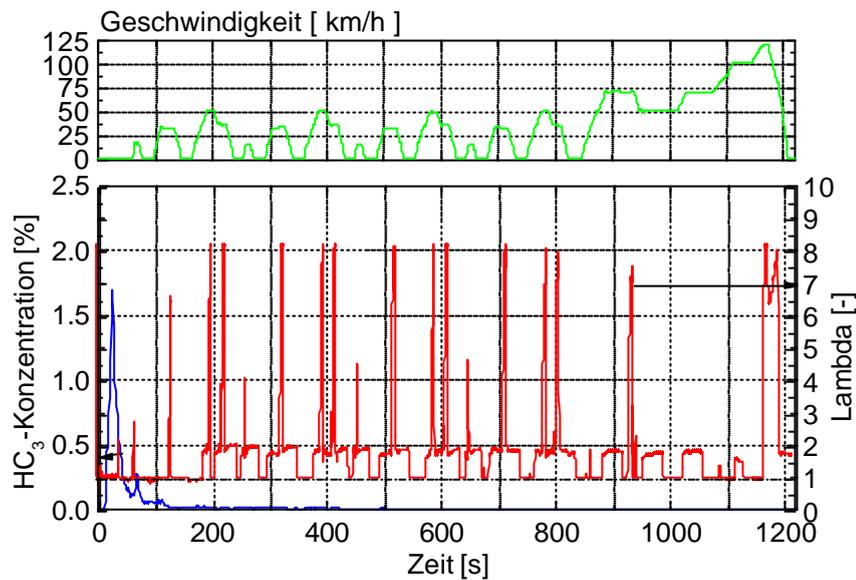


Abb. 10: Lambdaverlauf und Kohlenwasserstoffkonzentration im Abgas nach Katalysator im neuen europäischen Fahrzyklus

Die Kohlenmonoxidkonzentration sowie Kohlendioxidkonzentration des Fahrzeuges während des NEFZ Fahrzyklus sind in Abbildung 11 wiedergegeben.

Kohlenmonoxid ist ebenso wie die unverbrannten Kohlenwasserstoffe im Abgas besonders in der Start und Aufwärmphase in hohen Konzentrationen zu finden. Mit dem Erreichen der Katalysatorbetriebsstemperatur wird auch die Emission von Kohlenmonoxid nach Katalysator deutlich abgesenkt.

Charakteristisch für die Konzentration der Kohlendioxidemission eines Verbrennungsmotors ist der Anstieg während der Beschleunigung und die deutliche Absenkung der Kohlendioxidemission in den Schubphasen.

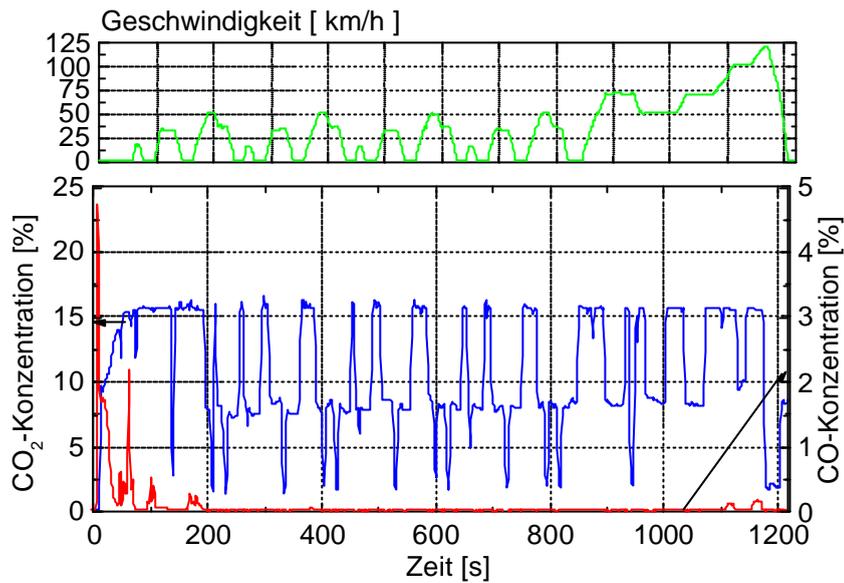


Abb. 11: CO- und CO₂- Konzentration nach Katalysator im neuen europäischen Fahrzyklus

Der Verlauf der Sauerstoffkonzentration im neuen europäischen Fahrzyklus ist in Abbildung 12 wiedergegeben.

Mit dem Motorstart sinkt die Sauerstoffkonzentration von über 20 Vol.-% ab, da hier der Sauerstoff für die Verbrennung verbraucht wird. In Abbildung 11 erkennt man an dieser Stelle einen sprunghaften Anstieg der CO₂- Konzentration im Abgas, was den Verbrauch von Sauerstoff durch die Verbrennung bestätigt. Die Konzentrationsverläufe von Sauerstoff und Kohlendioxid sind daher auch über den gesamten Test stets gegenläufig.

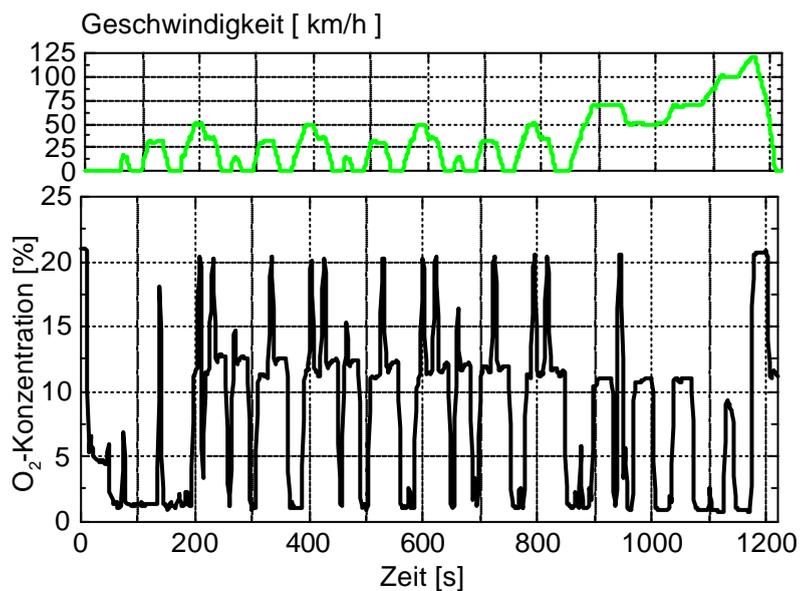


Abb. 12: Sauerstoffkonzentration vor Katalysator im neuen europäischen Fahrzyklus

Die Stickoxidkonzentration nach Katalysator im Fahrzyklus hängt von der Verbrennungsführung im Motor, der Katalysatortemperatur, der Strömungsgeschwindigkeit am Katalysator sowie von dem Katalysatorwirkungsgrad ab. Die starken Schwankungen der NO_x -Konzentration in Abbildung 13 lassen sich durch die unterschiedlichen Einflüsse der genannten Größen im Versuchsfahrzeug erklären. Die Messung zeigt, dass für heutige und zukünftige Fahrzeuge eine Messung der Stickoxidkonzentration nach Katalysator mit Messbereichen von ca. 1000 ppm NO_x ausreichend ist. Der Messbereich sollte aber auch für kleine NO_x -Konzentrationen, wie sie bei amerikanischen Fahrzeugen vorkommen werden (z.B. bei sog. Partial Zero Emission Vehicles (PZEV)) , abstimbar sein.

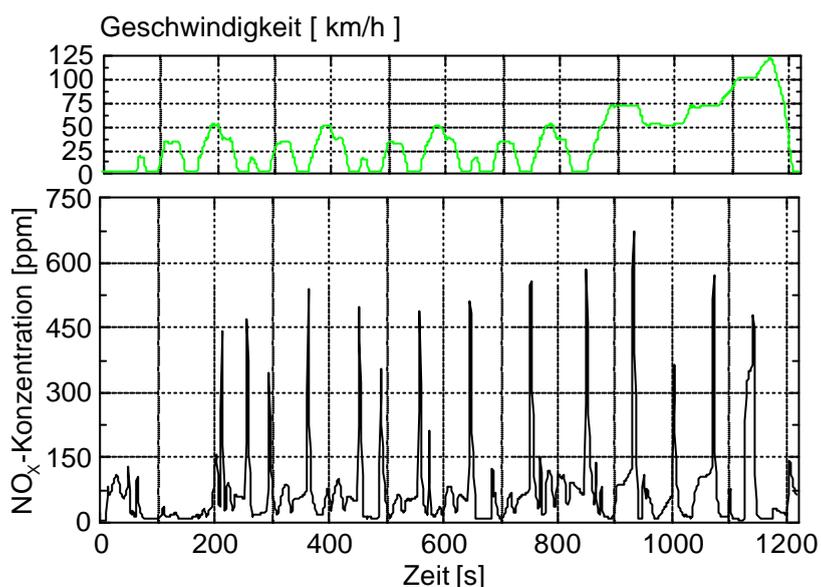


Abb. 13: Stickoxidkonzentration nach Katalysator im neuen europäischen Fahrzyklus

Der Partialdruck des Sauerstoffs auf einem Metalloxid sorgt für eine Änderung seiner Leitfähigkeit und somit für eine Abhängigkeit des Sensorwiderstandes von der Sauerstoffkonzentration. Sensorwiderstand und Sauerstoffkonzentration im außerstädtischen Teil des Fahrzyklus sind in Abbildung 14 dargestellt. Hier zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Verläufe der Sensorwiderstände und der Sauerstoffkonzentration.

Durch geschickte Kombination der beiden Signale der sensitiven Schichten muss nun die elektronische Steuereinheit die Informationen zur Stickoxidkonzentration selektiv verarbeiten.

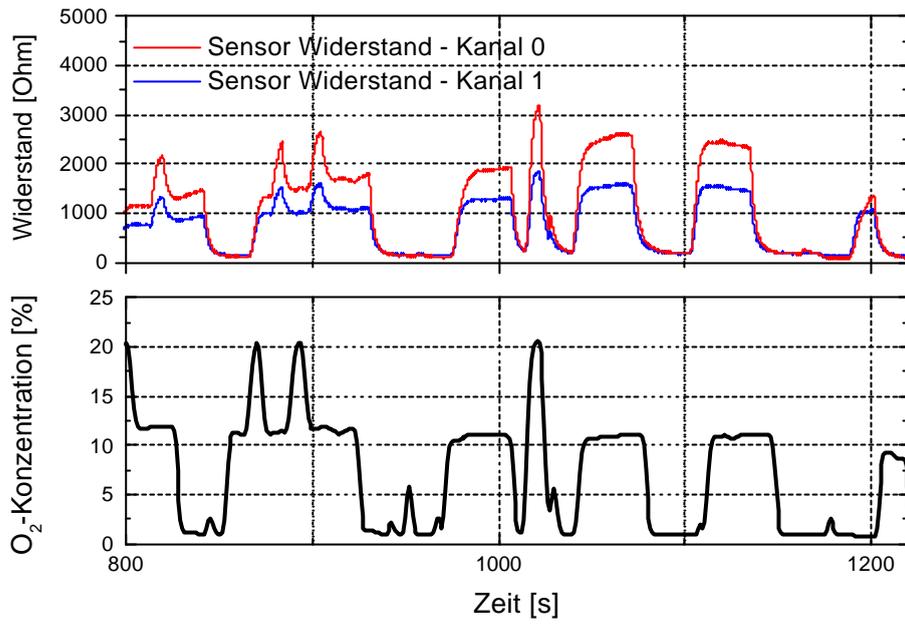


Abb. 14: Sensorwiderstand und Sauerstoffkonzentration im außerstädtischen Teil des Fahrzyklusses (EUDC)

Der weitere Entwicklungsschritt im Bereich der Regel- und Auswerteelektronik des Sensors ermöglicht die Ansteuerung sowie die Abfrage der mit dem Sensor gemessenen Größen über einen zwischen dem Sensor und Applikations- Tool geschalteten Hardware- Baustein. Im weiteren Text wird dieser Sensormodul genannt.

Des weiteren ermöglicht die weiterentwickelte Konfiguration der Elektronik mit dem Sensormodul die erforderliche Regelung der Parameter die den Sensorbetrieb beeinflussen :

- Anzahl der Temperaturzyklen (jeder Zyklus setzt sich aus Aufheiz- bzw. Abkühl- und Plateauphase zusammen)
- Zeitintervall eines Temperaturzyklus
- Angabe des Sensorheizwiderstandes bei 0 °C

Das Gerät verfügt über 2 Sensormesskanäle, mit denen parallel die Sensorsignale eingelesen werden. Aus einer großen Anzahl anfallender Messwerte werden nur die erforderlichen Werte herausgefiltert, welche hinreichend genau die Gaszusammensetzung bis in Konzentrationsbereiche < 5 ppm beschreiben. Der Sensor wird temperaturzyklisch betrieben. Im Temperaturkennlinienfeld ergeben sich gasspezifische Verhältnisse, wobei absolute als auch relative Messwerte betrachtet werden. Insgesamt werden 8 Messwerte in einem Zyklus ermittelt und über die serielle Schnittstelle ausgegeben.

Für die Messwerteerfassung wird ein Terminalprogramm (Hyperterminal unter Win95) benötigt, welches Messwerte darstellen als auch in eine Datei abspeichern kann.

In dieser Entwicklungsphase wurde der Sensor in dem Abgas eines direkteinspritzenden DISI Motors mit FEV luftgeführten Brennverfahren sowie eines konventionellen, stöchiometrisch betriebenen Ottomotors untersucht.

Untersuchung des Sensors im stationären Betrieb - Entwicklungsstand Nr.2

Der Versuchsaufbau, im Gegensatz zu dem in der Abbildung 7 dargestellten, verfügt über eine zusätzliche Kühlungseinrichtung vor dem NO_x- Adsorberkatalysator.

Durch die im Abgasstrang befindlichen Drosselklappen ist eine Aufteilung des Abgasstromes sowie die Kühlung eines Teil- Abgasstromes und die Einstellung geförderter Temperatur vor dem NO_x- Adsorberkatalysator möglich. Der Versuchsträger wurde mit Messstellen versehen wobei der Sensor vor dem NO_x- Adsorber eingesetzt wurde. Der Versuchsaufbau ist in der Abbildung 15 dargestellt.

- Versuchsträger
 - 1.8 l, 4 Zylinder Prototypen Motor mit Benzin- Direkteinspritzung
- Abgasanlage Serienstand VW Lupo 1.4l FSI :
 - Motornaher 3- Wege Katalysator 0.3 l
 - NO_x- Adsorberkatalysator 1.4 l
- Einbaulage des CatSens Sensors vor dem NO_x- Adsorberkatalysator

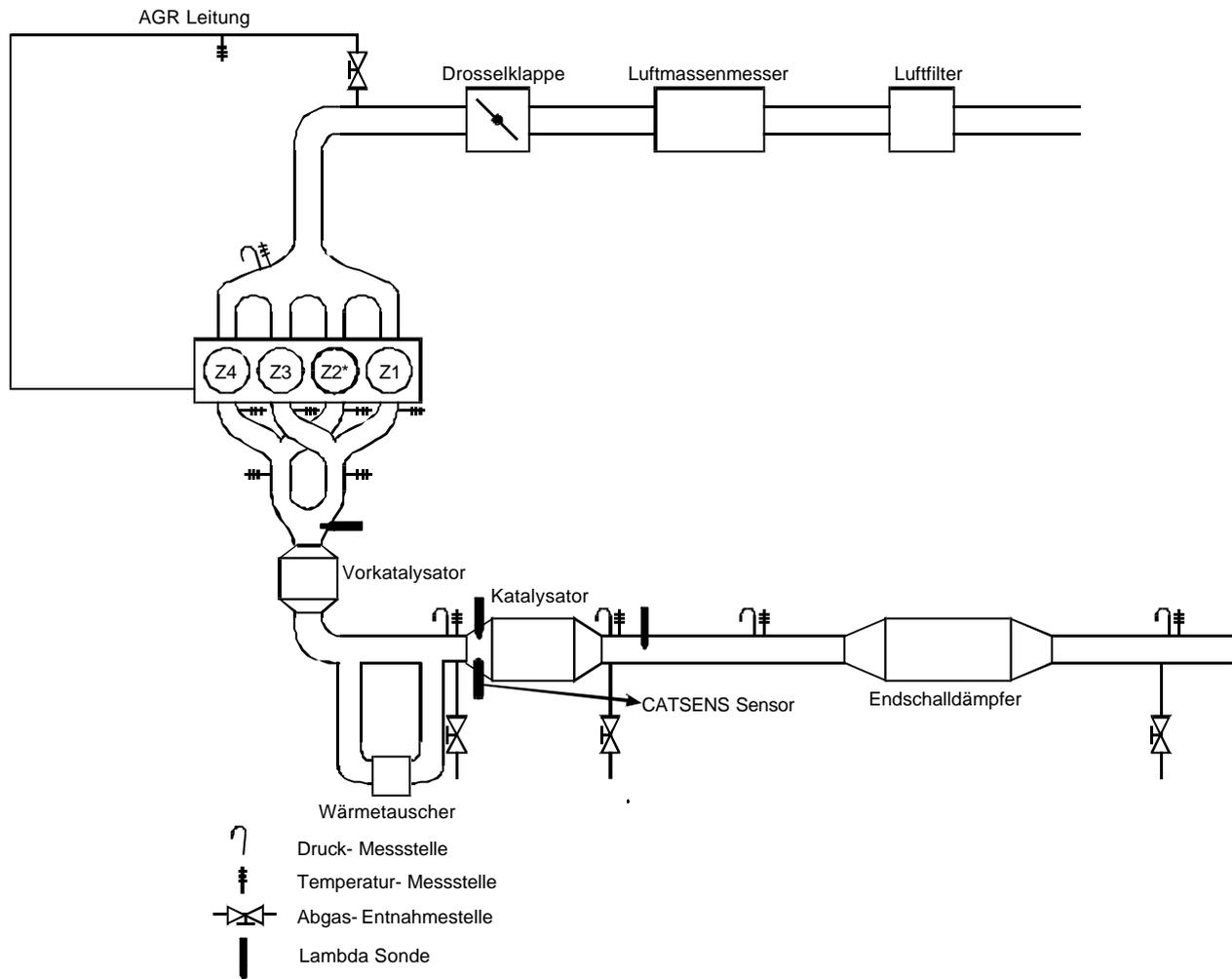


Abb. 15: Schematischer Aufbau des Motors und der Abgasanlage

In Abhängigkeit von der geforderten Last und abhängig von der Motordrehzahl wird der direktinspritzende Otto- Motor

- Stöchiometrisch
- Unterstöchiometrisch - fett
- Überstöchiometrisch – mager

betrieben.

Die Untersuchungen erfolgten unter stationären und quasidynamischen Betriebsbedingungen. Dabei wird ein stationärer Magerbetrieb des Motors mit Regenerationsspitzen als quasidynamischer Betrieb bezeichnet.

Die Regenerationsspitzen sind für ein Betrieb des mager betriebenen direktinspritzenden Ottomotors in Kombination mit einem NO_x- Adsorberkatalysator typisch. Intermittierend zudosierte Reduktionskomponenten (HC, CO) sorgen für Desorption der gespeicherten Nitrate, ihre Umsetzung zu Stickstoff N₂ und damit zur Entleerung des Adsorbers.

Der Sensor, Entwicklungsstand 2 wurde in den für einen direkteinspritzenden Motor typischen Betriebspunkten untersucht :

- $N_e = 2000 \text{ u/min}$, $\lambda = 1$
- $N_e = 2000 \text{ u/min}$, $\lambda \gg 1$
- $N_e = 2000 \text{ u/min}$, $\lambda > 1$; Stationärbetrieb mit Regenerationsspitzen

In der Abbildung 16 sind die Ergebnisse der Messung beim stöchiometrischen Luftverhältnis und einer Abgastemperatur vor NO_x - Adsorber von $500 \text{ }^\circ\text{C}$ dargestellt. Dabei wurde die Sensorchiptemperatur auf $570 \text{ }^\circ\text{C}$ eingestellt.

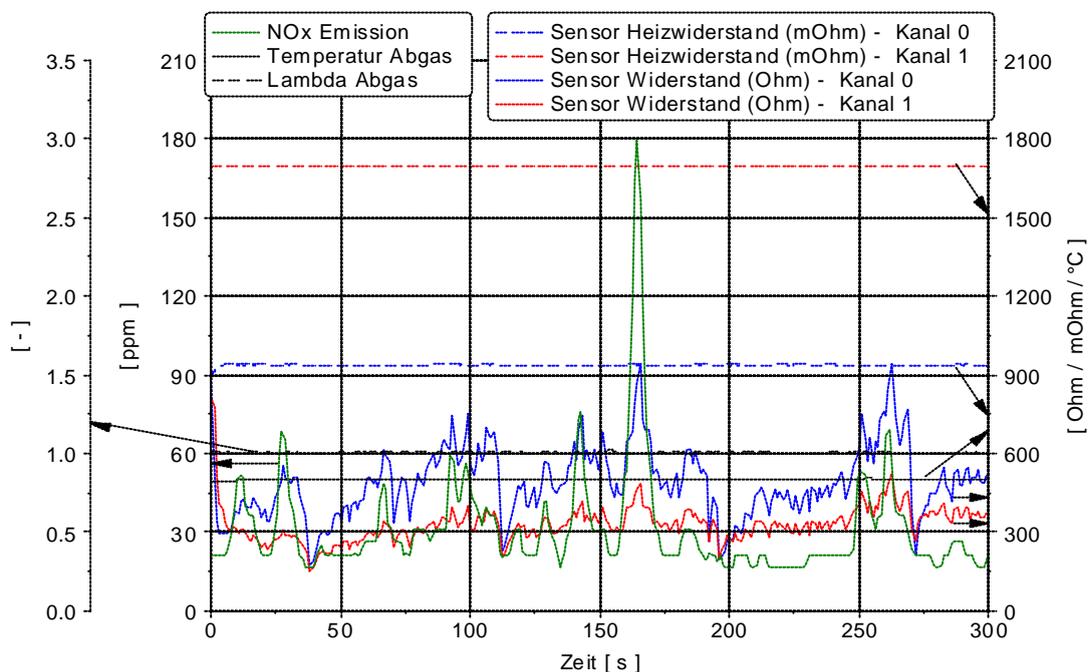


Abb. 16: Sensorwiderstand und NO_x - Konzentration beim stöchiometrischen Luftverhältnis, (Entwicklungsstand Nr. 2)

Dank der Reduktion am vorgeschalteten 3- Wege Vorkatalysator erreicht die NO_x - Emission an dem Sensor Werte von ca. 20-60 ppm. Nicht konstante NO_x - Emissionswerte sind auf die nicht immer gleich ablaufende Verbrennungszyklen zurückzuführen.

Aus dem Verlauf des Sensorsignals ist ersichtlich, dass das Signal den Schwankungen der NO_x - Emissionen sehr gut folgt. Die Genauigkeit bzw. das Auflösvermögen des Sensors ist potentiell besser als 10 ppm NO_x .

Einen Test mit überstöchiometrischen Luftverhältnis $\lambda = 3.3$ und einer Abgastemperatur vor NO_x - Adsorber von $180 \text{ }^\circ\text{C}$ zeigt die Abbildung 17. Niedrige Abgastemperaturen sind für den mager betriebenen Motor, dank dem höheren thermodynamischen Wirkungsgrad der Verbrennung, typisch.

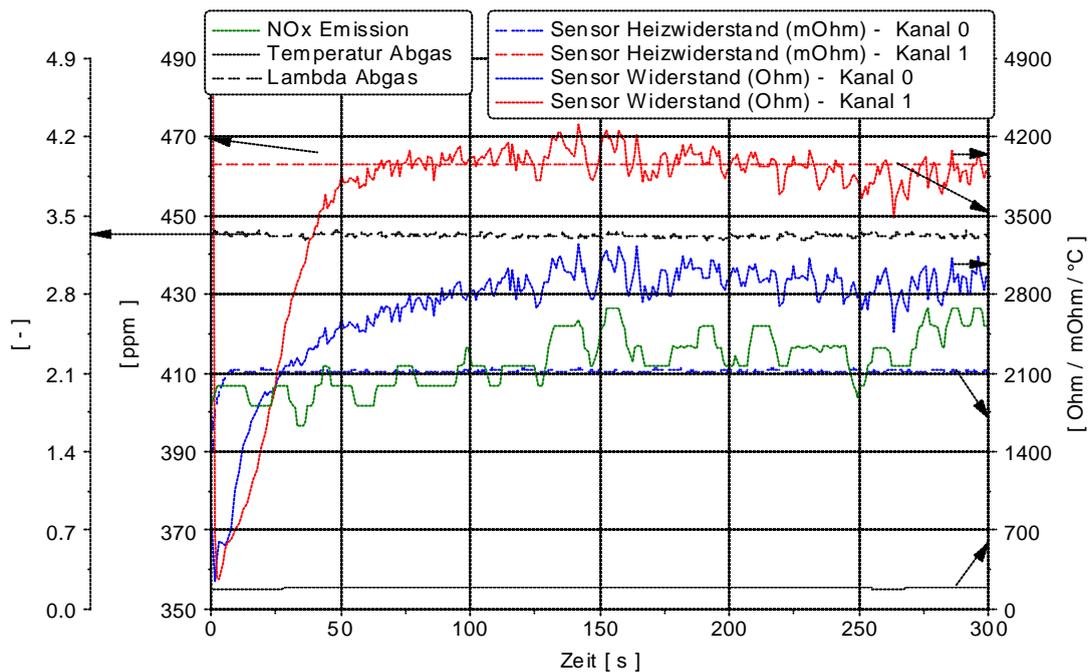


Abb. 17: Sensorwiderstand und NO_x -Konzentration beim überstöchiometrischen Luftverhältnis (Entwicklungsstand Nr.2)

Bei der gleichen Sensorchiptemperatur wurde die Betriebsbereitschaft des Sensors nach ca. 150-200 s erreicht. Während der Aufheizphase des Sensor kontinuierlich steigende Werte des Sensorwiderstandes folgen der gemessenen NO_x -Emissionen bis zum Erreichen der Betriebstemperatur kontinuierlich.

Durch eine Optimierung der Temperaturregelung, die einer weiteren Entwicklungsphase vorbehalten bleibt, wäre ein schnelleres Erreichen der Sensorbetriebsbereitschaft möglich.

Der Betrieb beim überstöchiometrischen Luftverhältnis (Abbildung 18) und Regenerationsspitzen zeigt in der Aufheizphase des Sensors gleiches Verhalten hinsichtlich erforderlicher Zeit bis zum Erreichen der Sensorbetriebsbereitschaft (ca. 150-200 s).

Während der Regenerationsspitzen mit einem Luftverhältnis von $\lambda = 0.9$ und einer Dauer von 5 s sind die erreichten NO_x -Emissionswerte (ca. 350 ppm) im Vergleich zu den in den Magerphasen des Motorbetriebs (ca. 600 ppm) deutlich niedriger. Die sprunghafte Änderung der NO_x -Emissionswerte hat einen deutlichen Widerstandsabfall der beiden sensitiven Sensorschichten zur Folge, während sich in dem mageren Betrieb an den Schichten unterschiedliche Widerstände einstellen.

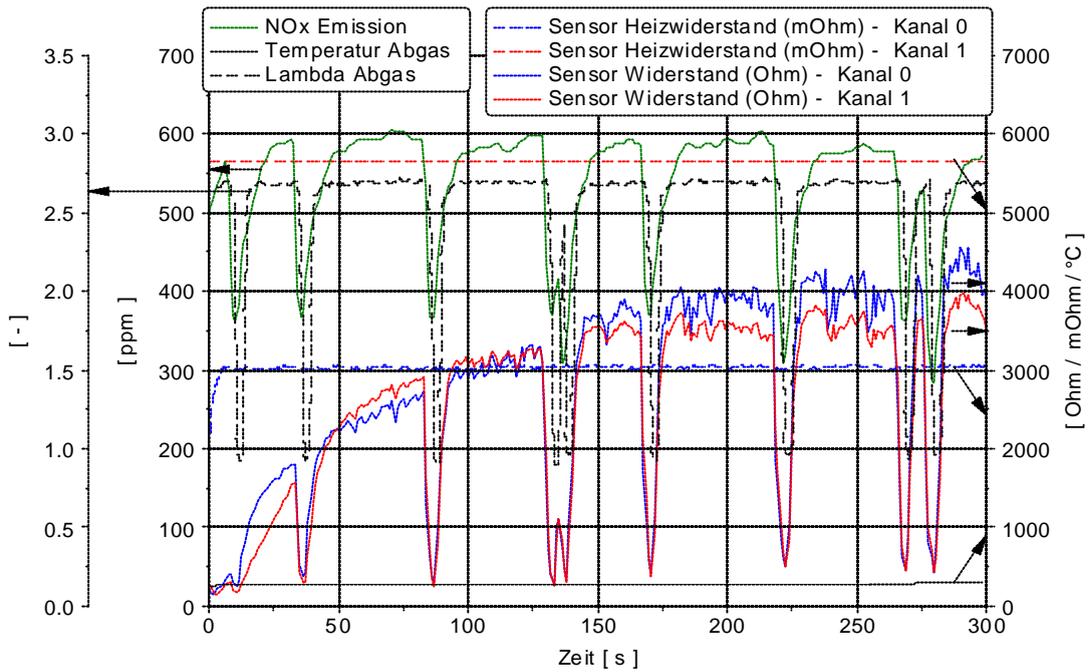


Abb. 18: Sensorwiderstand und NO_x- Konzentration beim überstöchiometrischen Luftverhältnis und einem Betrieb mit Regenerationsspitzen (Entwicklungsstand Nr. 2)

Untersuchung des Sensors im dynamischen Betrieb - Entwicklungsstand Nr.2

Dynamische Untersuchungen in dieser Phase erfolgten auf einem Abgasrollenprüfstand an einem Mittelklasse Fahrzeug mit einem stöchiometrisch betriebenen Ottomotor im neuen europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Der prinzipielle Aufbau eines Abgasrollenprüfstandes wurde bereits im Kapitel „Entwicklungsstand der Regel- und Auswerteelektronik des Sensors Nr.1“, beschreiben.

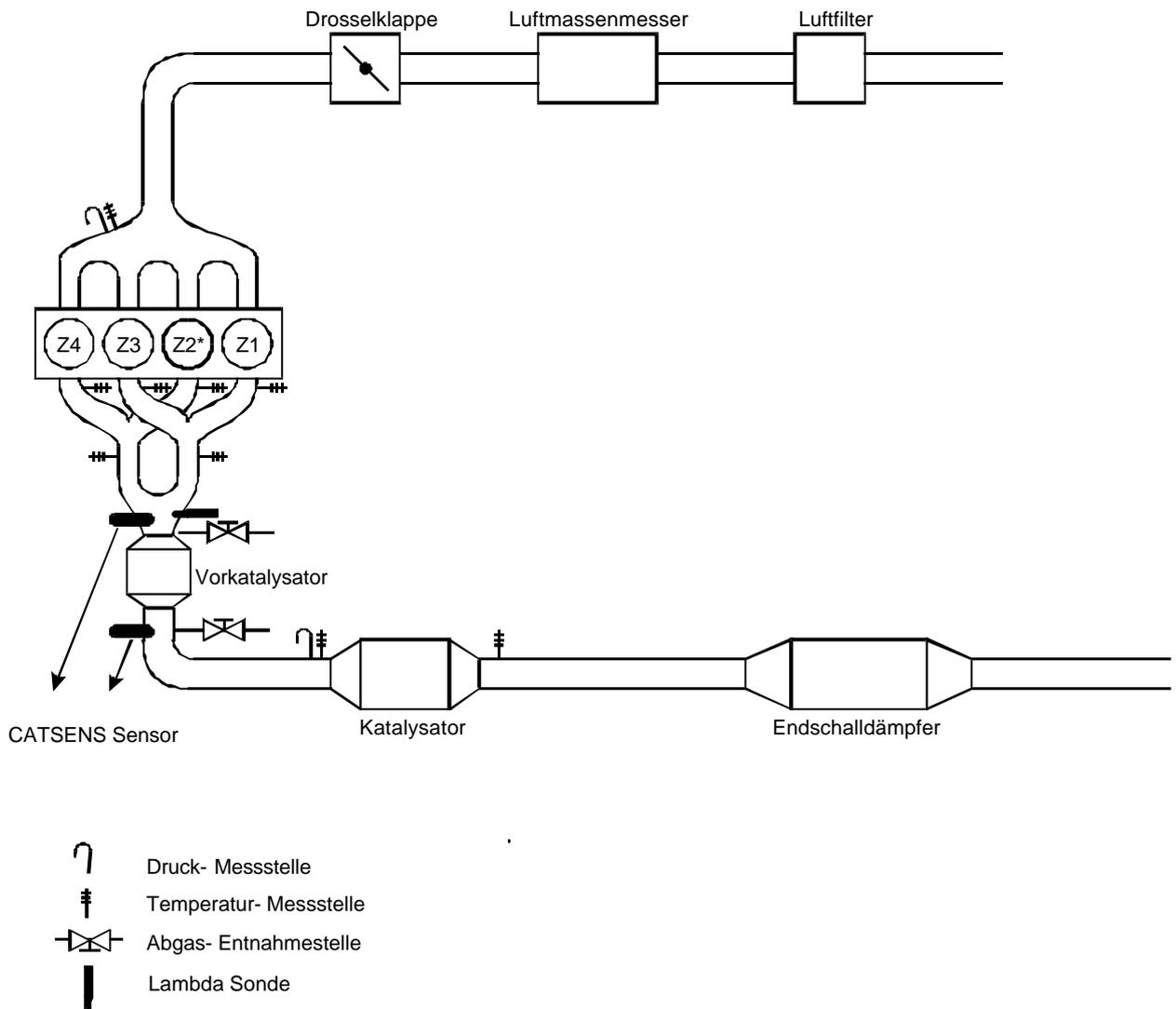


Abb. 19: Schematischer Aufbau des Saugsystems, des Motors und der Abgasanlage

- Versuchsträger
 - Mittelklassefahrzeug mit Ottomotor und Saugrohreinspritzung
- Abgasanlage
 - Motornaher 3- Wege Katalysator und
 - Unterboden 3- Wege Katalysator 1.9 l
- Einbaulage des CatSens Sensors – vor und nach dem motornahen 3 – Wege Katalysator

Der Motorstart erfolgt bei einer Motor-, Öl – und Wassertemperatur von 20 °C. Der gesamte Verlauf des Fahrzyklusses wurde bereits in der Abbildung 8 dargestellt.

Aus dem Vergleich der Messwerte der Sensorwiderstände im ECE1 (1 - 200 s) und ECE4 (580 - 780 s) Teil des Fahrzyklus wird ersichtlich, dass die beiden sensitiven Schichten nach dem Erreichen der Sensorbetriebstemperatur ein gleiches Verhalten aufzeigen. Eine nicht proportionale Abhängigkeit der Sensorwiderstände der beiden Schichten von der NO_x-Konzentration im Abgas wird in dem ECE1 Teil des Zyklus beobachtet.

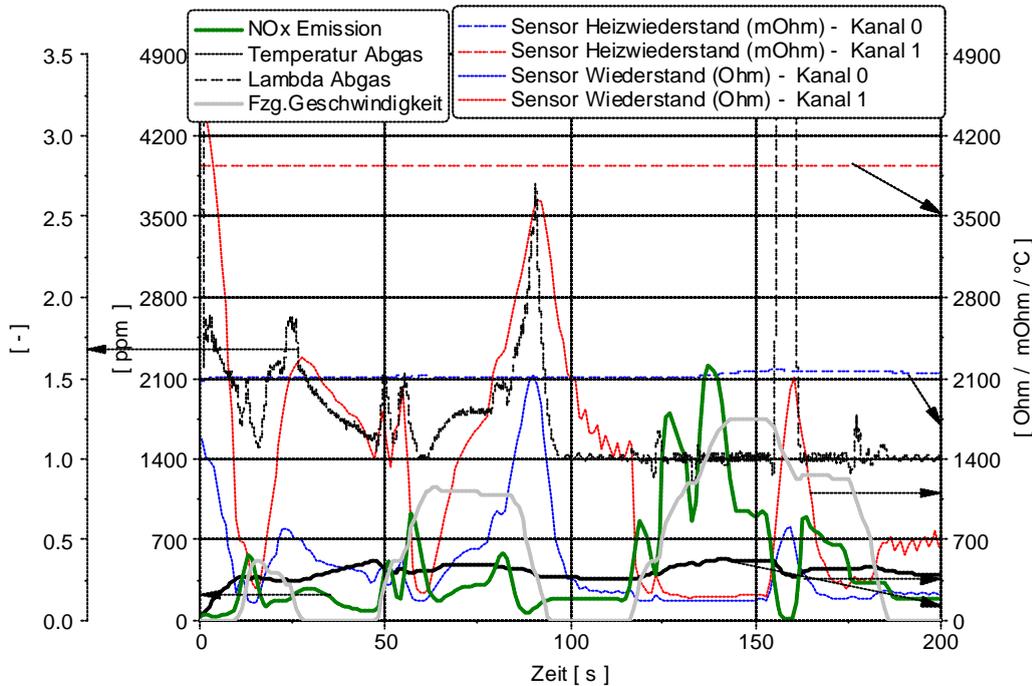


Abb. 20: Sensorwiderstand und NO_x-Konzentration im ECE1 Teil des NEFZ Zyklus (Entwicklungsstand Nr.2)

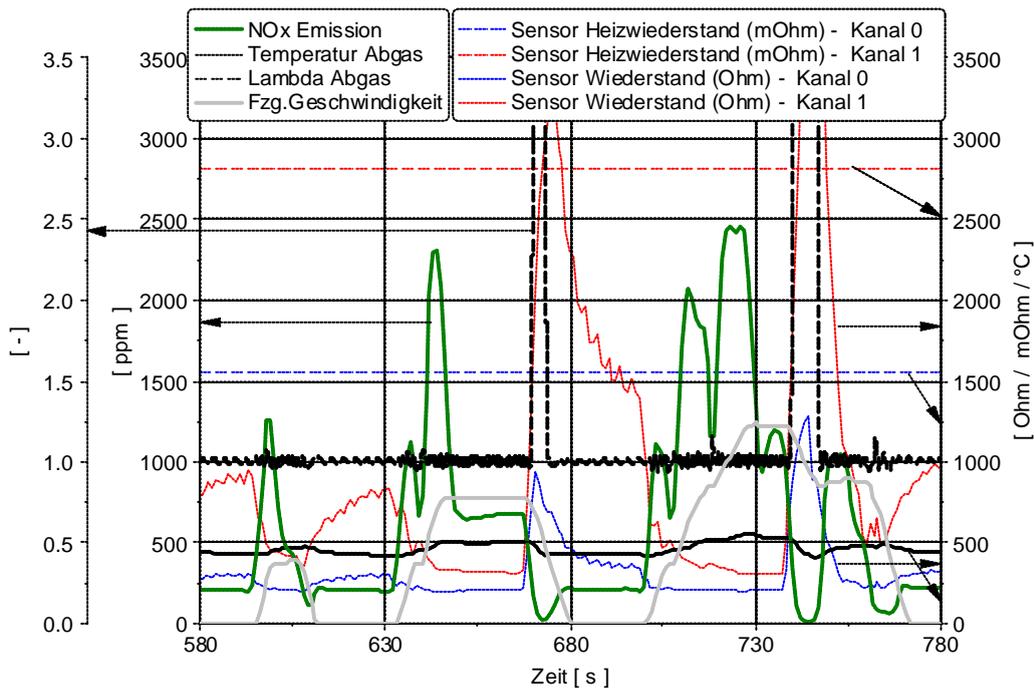


Abb. 21: Sensorwiderstand und NO_x -Konzentration im ECE4 Teil des NEFZ Zyklus (Entwicklungsstand Nr.2)

In dem EUDC Teil (780 - 1187 s) des Zyklus ist die temperaturbedingte Betriebsbereitschaft des Sensors erreicht. Höhere NO_x -Konzentrationen haben einen Abfall der Widerstandswerte zur Folge.

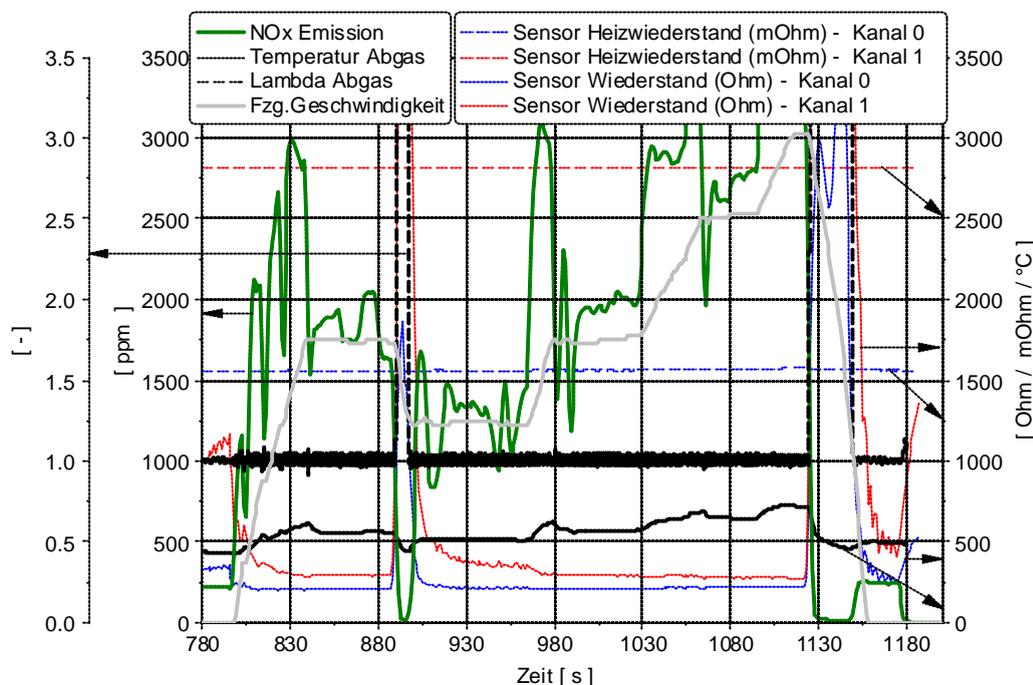


Abb. 22: Sensorwiderstand und NO_x -Konzentration im EUDC Teil des NEFZ Zyklus (Entwicklungsstand Nr. 2)

Die Analyse der Auswertbarkeit der Messsignale

Aus den vorangegangenen Versuchen wird deutlich, dass eine direkte Korrelation zwischen den mit CLD gemessenen NO_x -Emissionen und den Widerständen R_0 und R_1 nur teilweise vorhanden ist.

Im Folgenden wird die Korrelation zwischen dem CatSens-Sensor und der Abgasmessstechnik wie in der Tabelle 2 aufgeführt (NO_x , HC, CO, CO_2 und O_2) im Abgas untersucht.

Die Korrelation wurde in dem NEFZ-Zyklus eines stöchiometrisch betriebenen Ottomotors ermittelt. Um den Einfluss der Abweichungen des Sensorsignals durch eine nicht optimierte Temperaturregelung und spät erreichte Betriebsbereitschaft des Sensors auszuschließen, wurden die ersten 200 s des Test nicht berücksichtigt. Bei den Versuchen betrug die eingestellte Temperatur des Sensorchips 630 °C.

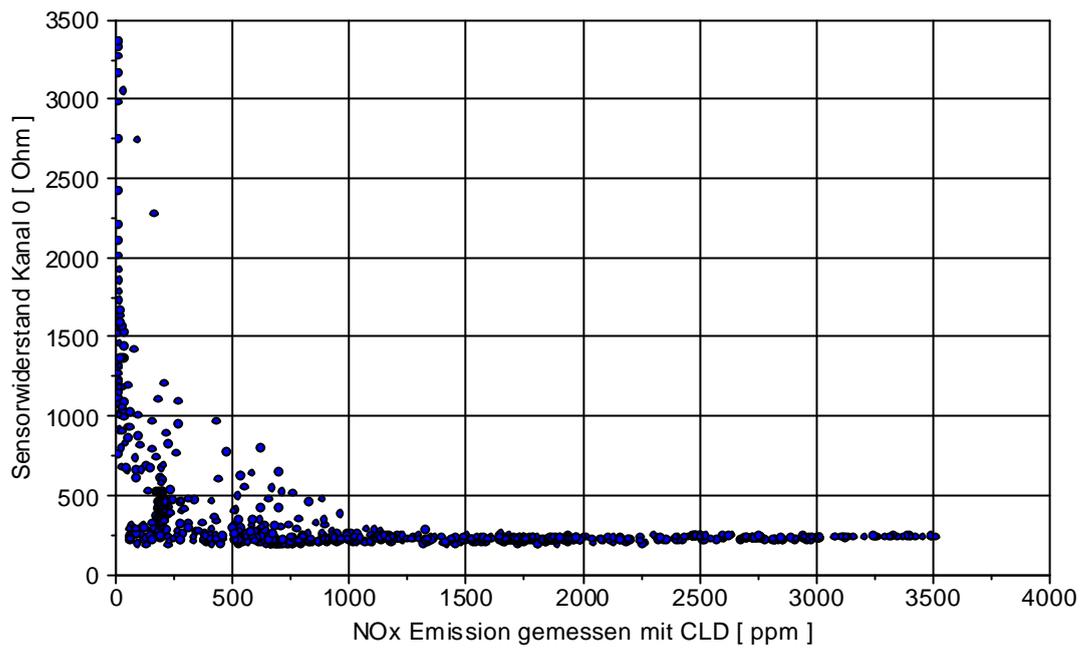


Abb. 23: Korrelation der mit CatSens und der mit einem CLD gemessenen NO_x- Konzentration im Messbereich 0 < NO_x < 3500 [ppm] – vor Katalysator

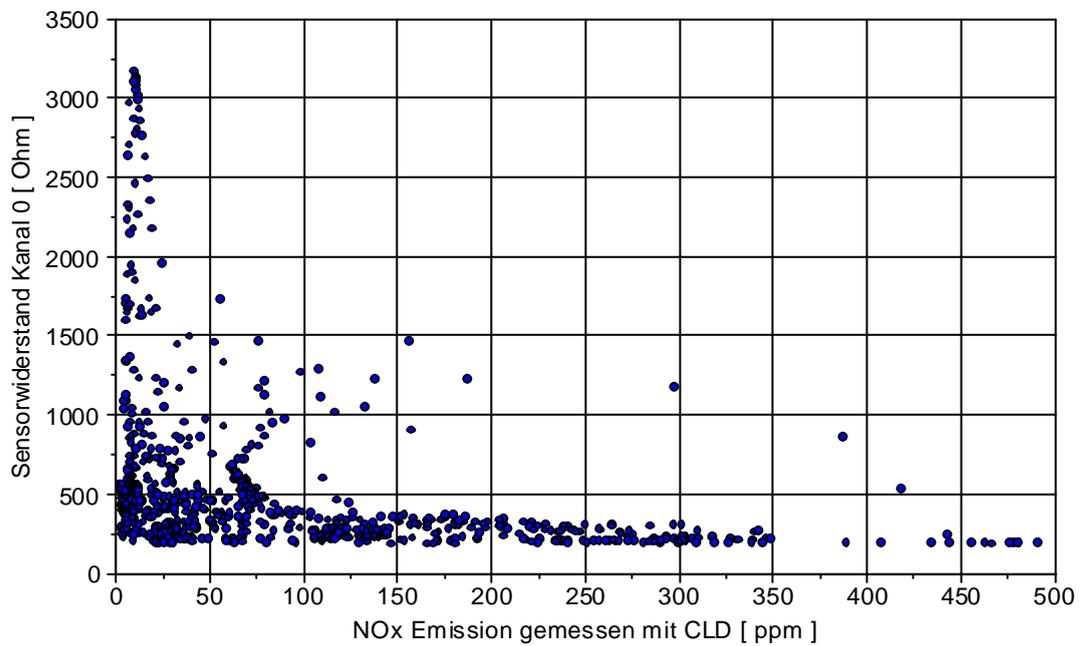


Abb. 24: Korrelation der mit CatSens und der mit einem CLD gemessenen NO_x- Konzentration im Messbereich 0 < NO_x < 350 [ppm] – nach Katalysator

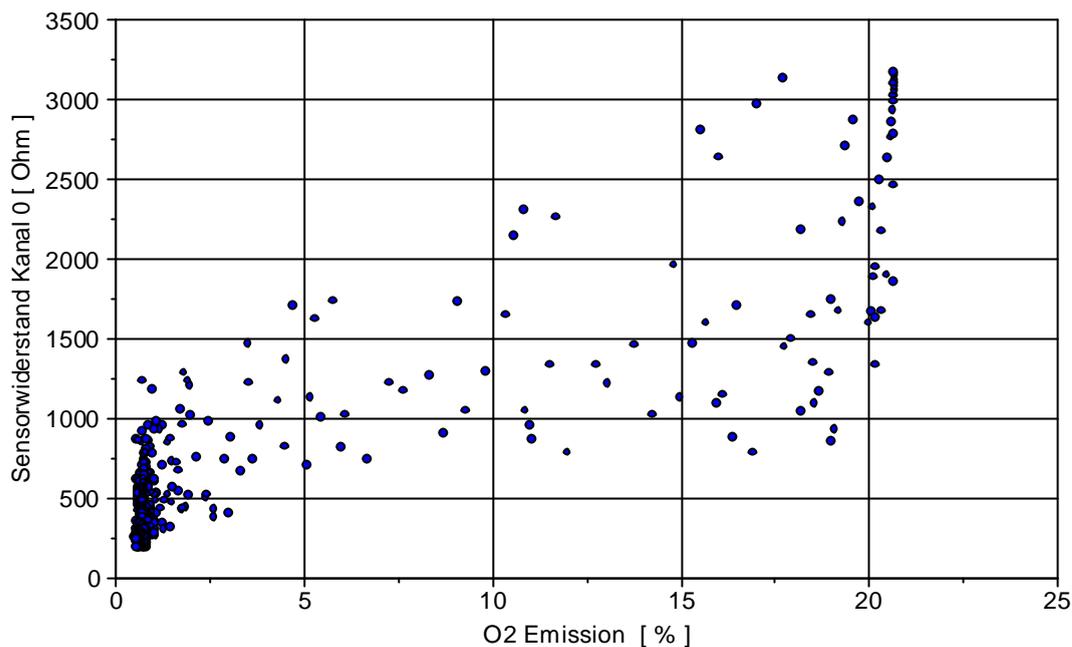


Abb. 25: Korrelation der mit CatSens und der mit einem PMD gemessenen O₂- Konzentration im Messbereich 0 < O₂ < 21 [%] – vor Katalysator

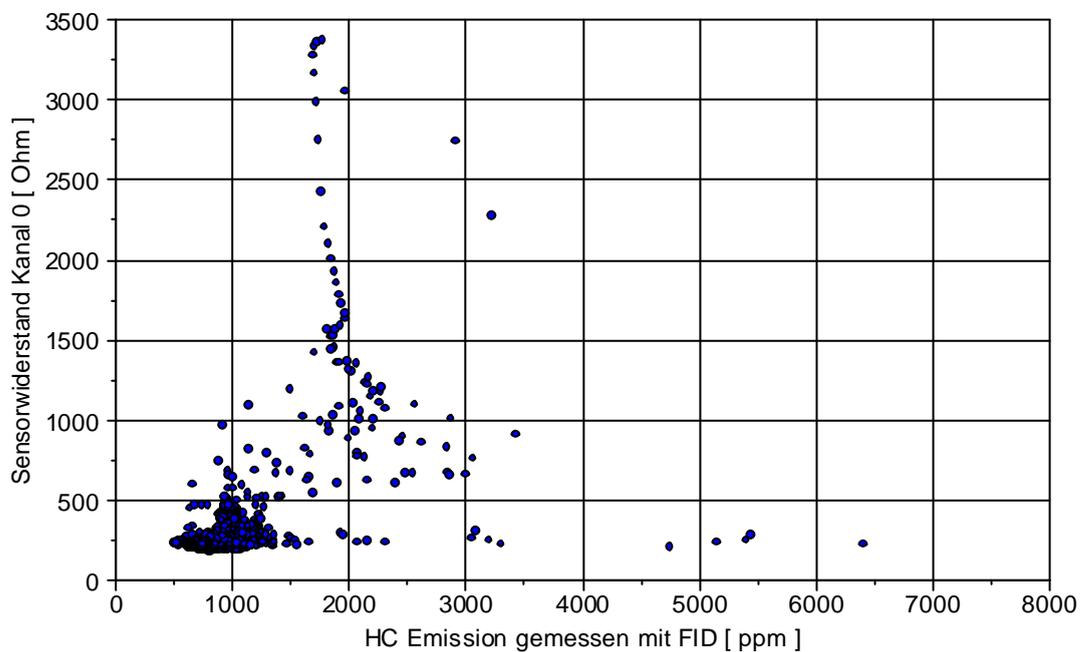


Abb. 26: Korrelation der mit CatSens und der mit einem FID gemessenen HC- Konzentration im Messbereich 0 < HC < 6500 [ppm] – vor Katalysator

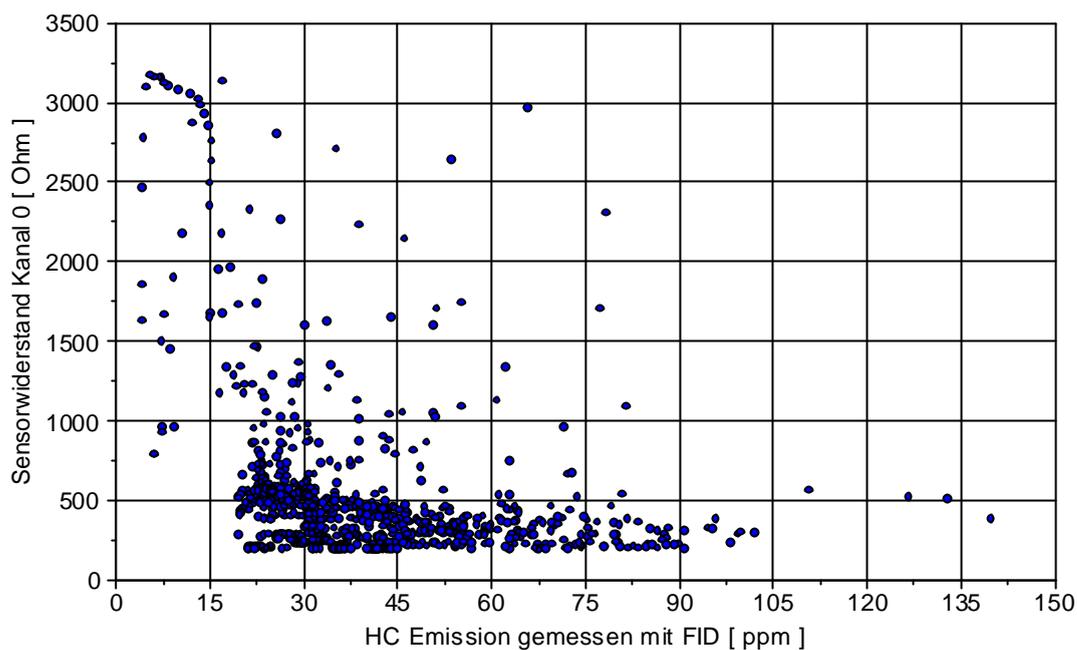


Abb. 27: Korrelation der mit CatSens und der mit einem FID gemessenen HC- Konzentration im Messbereich $0 < HC < 150$ [ppm] – nach Katalysator

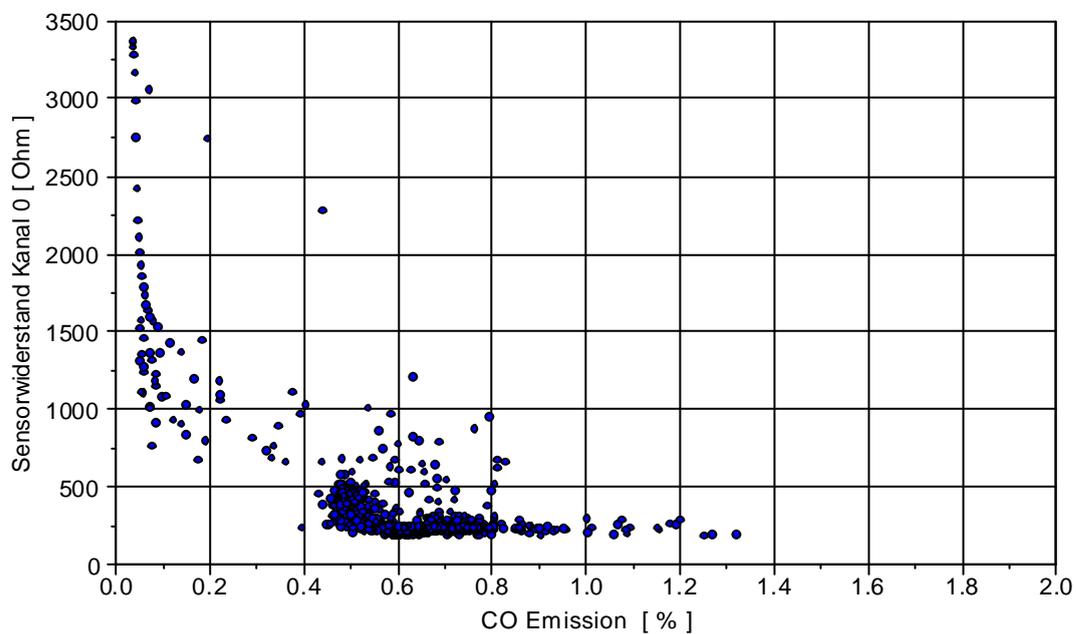


Abb. 28: Korrelation der mit CatSens und der mit einem NDIR gemessenen CO- Konzentration im Messbereich $0 < CO < 1.5$ [%] – vor Katalysator

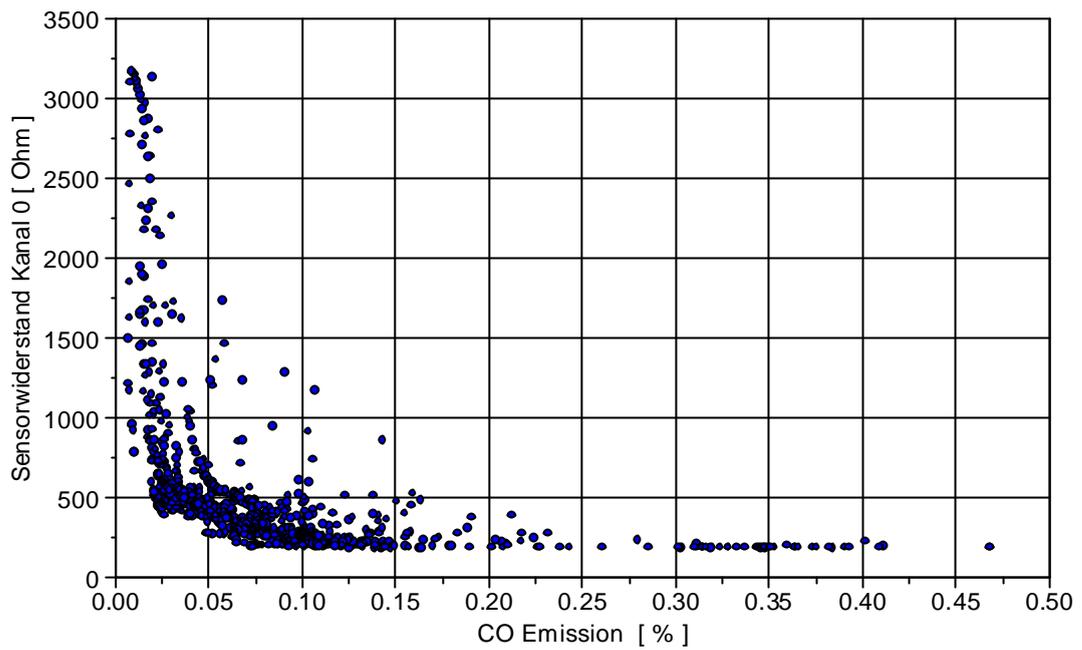


Abb. 29: Korrelation der mit CatSens und NDIR gemessenen CO- Konzentration im Messbereich $0 < CO < 0.5$ [%] – nach Katalysator

Aus den Korrelationsbildern wird ersichtlich, dass unterschiedliche Abgaskomponenten den Widerstand der sensitiven Sensorschichten unterschiedlich beeinflussen. Die dargestellten Rohsignale der Widerstandswerte gewährleisten ohne einer abgestimmten Signalaufbereitung keine direkte qualitative Aussage über die Konzentration einzelner Emissionskomponenten in dem Abgas. Dies war auch nach den vorausgegangenen Untersuchungen (UST) nicht zu erwarten. Die Analyse der Auswertbarkeit der Messsignale bzw. Sensorwiderstände R0 und R1 und eine qualitative Aussage über die Konzentration einzelner Komponenten erfordert eine Regressionsrechnung unter Berücksichtigung aller Emissionskomponenten sowie Temperaturen, etc. als unabhängige Einflussparameter.

AP III: Ausarbeitung der Algorithmen zur Motorregelung

Die Kenntnis der gespeicherten NO_x - Masse ist notwendig, um die Regenerationsdauer im Mager/Fett- Wechselbetrieb so vorzusteuern, dass sich ein minimaler Kraftstoffverbrauch bei gleichzeitig geringen Schadstoffemissionen ergibt. Das vorgestellte massenbezogene Modell zur Modellierung der NO_x - Adsorption berechnet die während der Magerphase gespeicherte NO_x - Masse. Der Vergleich zwischen der rechnerisch ermittelten und der gemessenen Speicherdauer ermöglicht weiterhin, die Beurteilung der aktuellen NO_x - Speicherkapazität und erlaubt so eine Diagnose des NO_x - Adsorbers.

Für 3- Wege Katalysatoren existieren bereits Modellansätze, mit deren Hilfe das Verhalten dieser bei $\lambda = 1$ arbeitenden Systeme unter stationären und instationären Bedingungen beschrieben werden kann [3, 5, 6]. Neben reaktionskinetischen Berechnungen und Berechnungen des Stofftransports werden dabei auch empirische Größen verwendet, um das Katalysatorverhalten abzubilden.

Für den mager betriebenen DI Ottomotor ist zusätzlich die abgasrelevante Problematik der Reduktion der emittierten Stickoxide typisch. Die Einhaltung der vom Gesetzgeber vorgeschriebenen NO_x - Emissionsgrenzwerte erfordert die Einführung:

- motorischer Maßnahmen sowie
- Abgasnachbehandlungsmaßnahmen

Die Abbildung 30 zeigt ein Abgasnachbehandlungssystem, das für den Einsatz an einem direktinspritzenden Benzinmotor vorgesehen ist. Der Vorkatalysator erreicht nach dem Kaltstart bei diesem Konzept relativ schnell die Betriebstemperatur und erfüllt bei stöchiometrischen Motorbetrieb eine konventionelle 3- Wege Funktion. Im Magerbetrieb, also bei einer überstöchiometrischen Luftzahl ($\lambda \gg 1$), konvertiert der Vorkatalysator Kohlenwasserstoffe sowie Kohlenmonoxid und unterstützt darüber hinaus die für den Adsorber relevante Oxidationsreaktion von NO zu NO_2 .

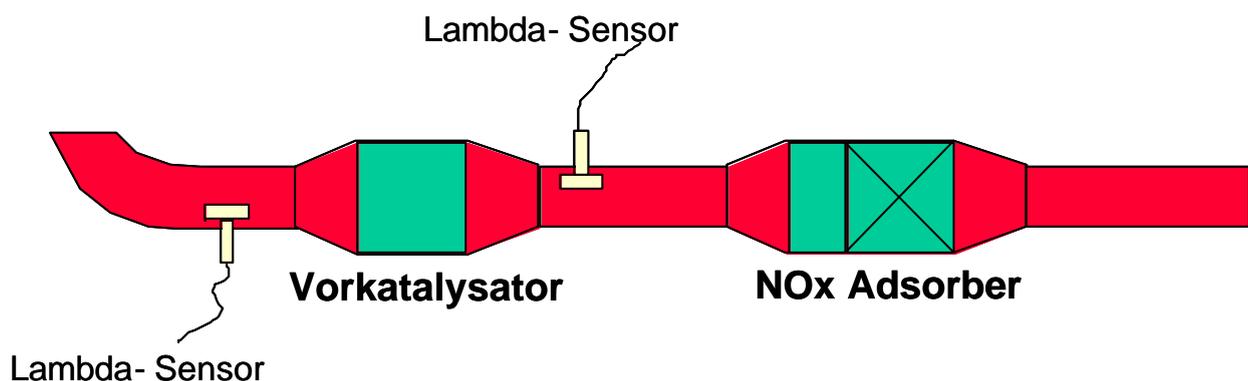


Abb. 30: Abgasnachbehandlungssystem mit NO_x - Adsorber und 3- Wege Vorkatalysator

Die Hauptaufgabe eines NO_x - Adsorbers liegt während des Magerbetriebes in der NO_x - Speicherung und in der Oxidation des sog. HC- und CO- Schlupfes des Vorkatalysators. Die Adsorptionsfähigkeit des NO_x - Speicherkatalysators wird im wesentlichen durch die Parameter

- Abgastemperatur,
- Abgaszusammensetzung
- NO_x- Massenstrom
- Beladungs- bzw. Vergiftungszustand (durch Schwefel im Kraftstoff) des Speicherkatalysators

bestimmt.

Die Abgastemperatur kann durch einen entsprechenden Sensor direkt gemessen werden. Die anderen Größen müssen jedoch heute noch auf Basis geeigneter Modelle ermittelt werden. Eingangsgrößen dieser Modelle sind, neben der direkt messbaren Abgastemperatur, die Signale der Breitbandlambdasonde vor dem Vorkatalysator und der Zweipunkt- Lambdasonde nach dem Adsorberkatalysator. Hierüber lassen sich die Anteile der Abgaskomponenten HC und CO abschätzen.

Regelungsmodul

Das folgende Regelungsmodul basiert auf dem Einsatz eines NO_x- Sensors und sieht den Einsatz motorischer sowie Abgasnachbehandlungsmaßnahmen vor, wobei die einzelnen Modulkomponenten auch unabhängig voneinander eingesetzt werden können.

Die Abbildung 31 zeigt die aus den möglichen Anwendungen von NO_x Sensoren in PKW folgende Regelungsmodulkomponenten :

- Regelung AGR
- On board Diagnose AGR
- Adaption AGR
- On board Diagnose für den 3- Wege Katalysator
- Steuerung NOx Adsorber
- On board Diagnose für den NOx Adsorber

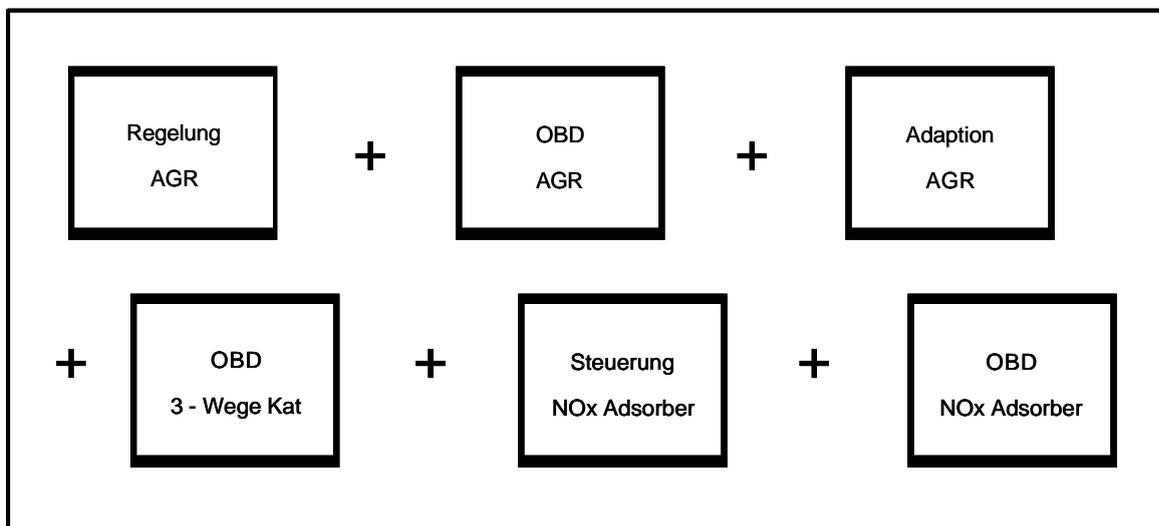


Abb. 31: Regelungsmodul

Im Folgenden werden einzelne Komponenten des Regelungsmoduls näher erläutert.

Optimierung der Abgasrückführrate

Als motorische Maßnahme für die Absenkung der vom Motor emittierten Stickoxide sieht das Modul den Einsatz einer optimierten Abgasrückführung vor.

Die vom Motor erzeugten Stickoxide sind in erster Linie vom:

- Partialdruck des Sauerstoffs im frischen Gemisch sowie
- der Verbrennungsspitzen­temperatur

abhängig.

Der Restgasanteil im Frischgemisch beeinflusst unmittelbar durch Absenkung der Verbrennungsspitzen­temperatur die NO_x - Emissionen, verringert gleichzeitig die Drosselverluste beim Ottomotor und sorgt damit für einen höheren Wirkungsgrad der Verbrennung. Der wesentliche Vorteil hinsichtlich Minimierung der NO_x - Emission und Kraftstoffverbrauches wird mit steigender AGR- Rate von den Nebeneffekten wie:

- steigende HC- Emissionen
- schlechte Laufkultur mit der Überschreitung der Zündaussetzergrenze

begleitet.

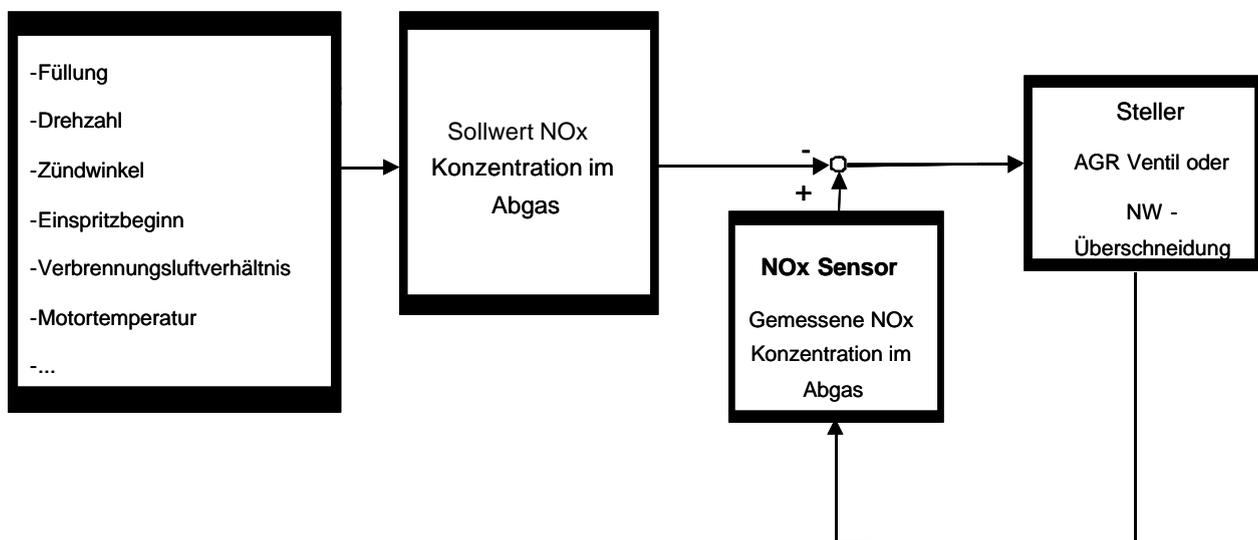


Abb. 32: Modul zur Regelung der Abgasrückführ­rate

Strategie zur Regelung der Abgasrückführ­rate

Das Modul zur Regelung der Abgasrückführ­rate basiert auf einer, nach einer Abstimmung optimaler NO_x - Konzentration im Abgas im Bezug auf motorische Betriebsparameter (Füllung, Drehzahl...), im Motorsteuerungskennfeld abgelegten Information über die aktuell vom Motor gelieferten NO_x - Konzentration.

Anhand der Abweichung der mit dem NO_x - Sensor gemessenen und kennfelddefinierten Sollwerten der NO_x - Konzentration im Abgas, unter der Voraussetzung einer kurzen Ansprechzeit des Sensors, wird die Abgasrückführ­rate korrigiert.

Die Regelung der NO_x - Konzentration im Abgas erfolgt dabei über

- Ansteuerung der AGR- Ventilposition (externe Abgasrückführung) und/oder
- Einstellung einer bestimmten Nockenwellenüberschneidung (interne Abgasrückführung)

Strategie zur Regelung des Motorbetriebs im System Motor- NO_x - Adsorberkatalysator

Die Strategie zur Regelung des Motorbetriebs im System Motor- NO_x- Adsorberkatalysator basiert zunächst auf einer Abstimmung optimaler NO_x- Speicher/Regenerationsdauer im Bezug auf motorische Betriebsparameter (Füllung, Drehzahl...). Diese Informationen werden in Motorsteuerungskennfeldern abgelegt.

Der aktuelle Beladungszustand des Katalysators wird anhand folgender Informationen berechnet:

- aktuell vom Motor gelieferte NO_x- Konzentration (berechnet oder gemessen)
- mit NO_x- Sensor gemessene NO_x- Konzentration hinter Adsorber

In Abhängigkeit von dem Beladungszustand wird eine optimierte kennfelddefinierte Regenerationsphase eingeleitet. Die Regelung der NO_x- Speicher/Regenerationsvorgänge erfolgt über die Ansteuerung der motorischen Parameter wie Verbrennungsluftverhältnis und Zündzeitpunkt.

Des weiteren bietet das Modul die Möglichkeit einer Diagnose des aktuellen NO_x- Adsorber-Zustandes. Der aktuelle Zustand zeichnet sich durch vorliegende NO_x- Speicherfähigkeit des Adsorbers aus, welche abhängig von den Vergiftungs- bzw. Alterungsprozessen vermindert werden kann. Das massebezogene Modell zur Modellierung der NO_x Adsorption liefert zu jedem Motorbetriebspunkt die Information über die Speicherfähigkeit eines neuen Adsorbers. Die Diagnose erfolgt nach dem Vergleich der Beladungszustände bzw. Speicherfähigkeiten die aktuell vorliegen und die des neuen Adsorbers.

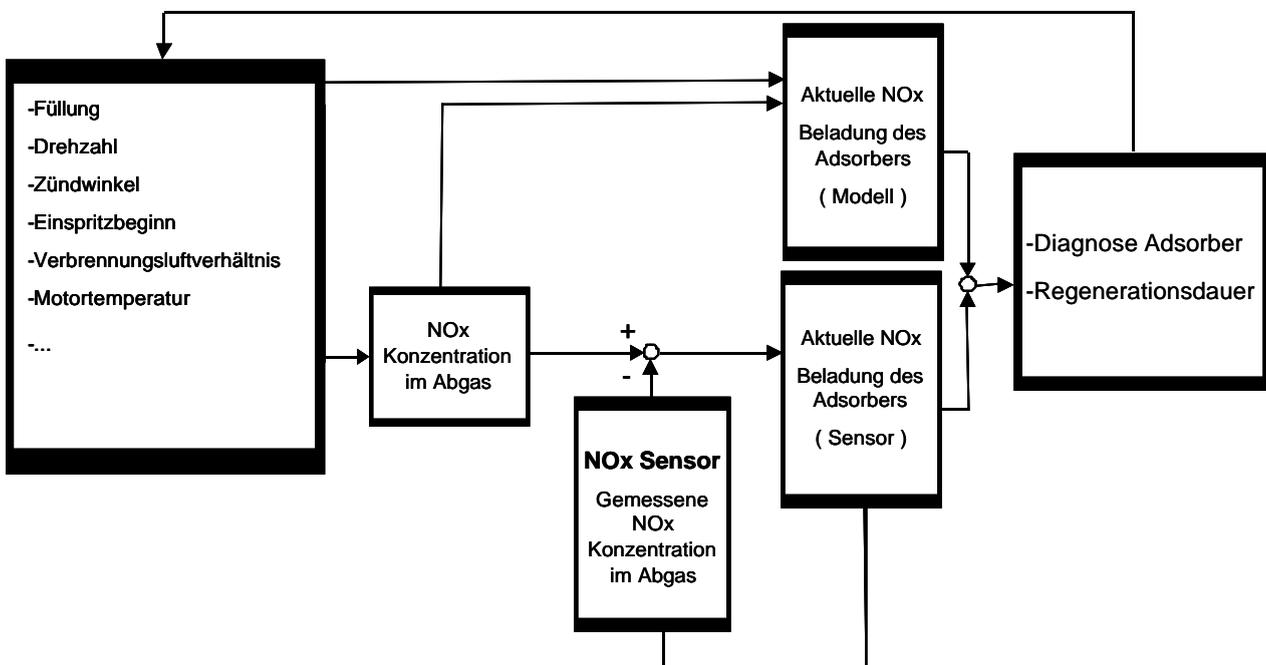


Abb. 33: Modul zur Regelung des Systems Motor- NO_x- Adsorberkatalysator

AP IV: Demonstrationstests mit Regelung auf Prüfstand

Das massebezogene Modell zur Modellierung der NO_x- Adsorption wurde an einen NO_x- Adsorber, betrieben im System mit direkteinspritzendem MMC Motor, abgestimmt und untersucht.

- Versuchsträger
 - GDI 1.8l 4V, 4 Zylinder mit MMC (Mitsubishi Motor Corporation) Brennverfahren
- Abgasanlage
 - Motornaher 3- Wege Katalysator 1.3 l,
 - NO_x- Adsorberkatalysator 2.46 l

Die dargestellte Untersuchung umfasst eine Variation der NO_x- Konzentration vor Adsorber bei konstanter Raumgeschwindigkeit sowie eine weitere Raumgeschwindigkeit bei einer höheren NO_x- Konzentration in einem Temperaturfenster von 330 bis 380 °C.

Untersuchte Betriebspunkte:

- 1. RG = 13 500 1/h
NO_x vor Adsorber = 325 ppm
Temperatur im Adsorber 330 °C
- 2. RG = 13 500 1/h
NO_x vor Adsorber = 615 ppm
Temperatur im Adsorber 340 °C
- 3. RG = 20 200 [1/h]
NO_x vor Adsorber = 835 ppm
Temperatur im Adsorber 380 °C

In der Modellrechnung wurde die Messung der vom Motor gelieferten NO_x- Konzentration zugrunde gelegt. Vor der Umschaltung auf Magerbetrieb erfolgte eine vollständige Regeneration des Adsorbers durch eine 120 s lange Phase mit einem $\lambda = 0.9$. Damit ist eine Annahme der konstanten Speicherkapazität in der Berechnung zulässig.

Die empirischen Parameter des Modells wurden an das Betriebsverhalten des Katalysators angepasst. Die im Modell verwendeten Koeffizienten sind :

• Zeitkonstante Grenzschichtdiffusion	τ_1	0.0010	[s]
• Zeitkonstante Porendiffusion	τ_2	0.0025	[s]
• Zeitkonstante NO ₂ - Bildung	τ_3	0.0010	[s]
• Zeitkonstante Nitratdiffusion in Struktur	τ_4	5	[s]
• NO _x Speicherkap. an der Oberfläche	C_{Obfl}	0.42	[g/l]
• NO _x Speicherkap. in den Poren	C_{Pore}	1.45	[g/l]
• Verhältnis Speicherkap. Bulk/Oberfläche	q	0.15	[-]

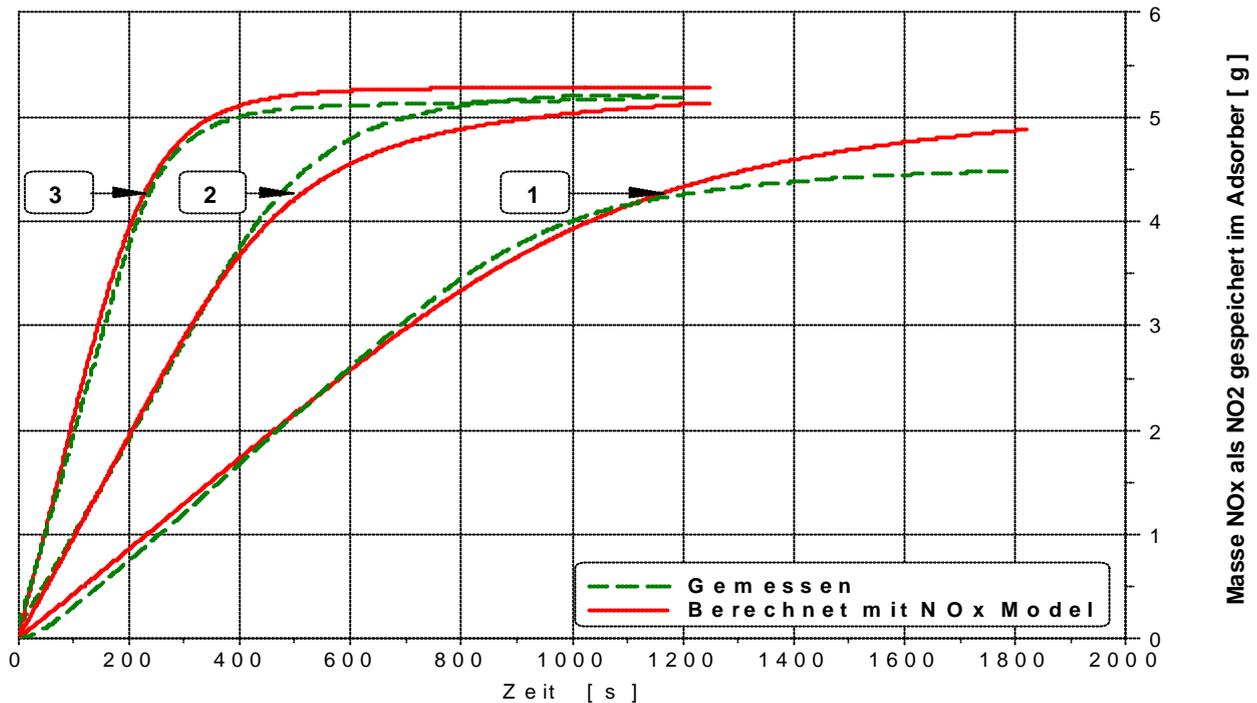


Abb. 34: Vergleich zwischen Messung und Modellberechnung der NO_x -Speicherkapazität eines zuvor vermessenen Adsorber Katalysators

Das Modell bildet die Speicherfähigkeit eines neuen Adsorber gut ab und gewährleistet zu jedem Zeitpunkt die Vergleichbarkeit der im Adsorber rechnerisch ermittelten und tatsächlich gespeicherten Massen. Das Modell erweist sich damit als geeignet für den Einsatz in den im Kapitel „Ausarbeitung der Algorithmen zur Motorregelung“, beschriebenen Regelmodulen.

Weiterhin wurde das Betriebsverhalten des Adsorbers unter veränderten Randbedingungen, wie z.B. einer verminderten Speicherfähigkeit, verursacht durch eine Schwefelvergiftung, untersucht.

Das Ziel dieser Untersuchung war die Darstellung eines Verschwefelungszustandes des Adsorbers sowie die Analyse des Erfolgs- /Teilerfolgs einer Entschwefelung unter bestimmten für die Entschwefelung günstigen Randbedingungen.

Dieses hatte eine vollständige Entschwefelung des Adsorbers als Ziel, wie auch Klärung der Frage ob der ursprüngliche Zustand des Adsorbers, hinsichtlich seiner Konvertierungsrate und Speicherkapazität wieder herstellbar ist.

- Entschwefelung bei 700°C Temperatur im Adsorber
- Lambda 0.95 [-]
- Dauer der Entschwefelung bestimmt nach dem aktuellen Schwefelaustrag aus Adsorber gemessen mit CIMS Massenspektrometer

Die Analyse des erzielten Ergebnisses (Abbildung 35) zeigt einen deutlichen Einbruch der NO_x -Speicherfähigkeit von 1.3 g als Folge der Verschwefelung während 3 g Schwefel vom Motor geliefert wurden. Die anschließende Entschwefelung sorgt für eine Steigerung der NO_x - Speicherfähigkeit auf 4.1 g und damit eine nicht 100 %ige Wiederherstellung der Adsorber- Speicherfunktionalität.

Unterschiedlich erfolgreiche Desulfatisierungsvorgänge sind für den Betrieb des NO_x- Adsorberkatalysator typisch. Dieses deutet noch mal darauf hin, dass der Einsatz eines NO_x- Sensors in den zukünftigen Abgasnachbehandlungssystemen mager betriebener Motoren nötig ist.

In der Praxis wird die Speicherkapazität des Adsorber, abhängig von dem Motorbetriebspunkt nicht vollständig ausgenutzt. In der Regel wird der Adsorber nicht mit einem Wirkungsgrad von unter 80 % betrieben, da sonst der hohe NO_x- Austrag aus dem Adsorber zu einer Überschreitung der vorgeschriebenen Abgasgrenzwerte führen würde.

Bei einem praxisnahen unteren Grenzwert des Katalysatorwirkungsgrades von beispielsweise 80 % bedeutet eine Vergiftung durch ein Betrieb mit Schwefelhaltigem Kraftstoff, in diesem Beispiel, eine Minderung der Speicherkapazität von:

- 45 %, als Folge der Verschwefelung
- 9 %, als Folge einer unvollständigen Entschwefelung

Der Einsatz eines NO_x- Sensors würde ein Betrieb mit optimaler Ausnutzung der aktuell vorhandenen Speicherkapazität gewährleisten und somit wäre ein optimierter Motorbetrieb hinsichtlich Emissionen und Kraftstoffverbrauch erzielt.

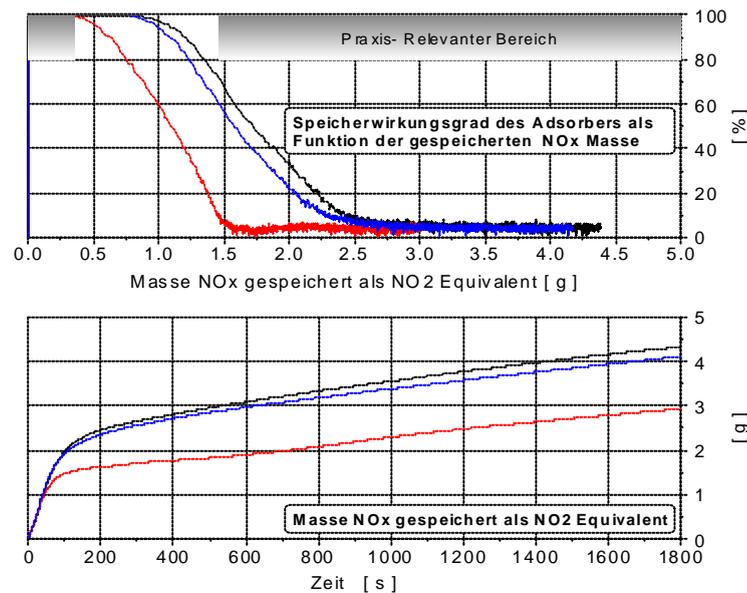


Abb. 35: Veränderte NO_x- Speicherkapazität als Folge der Ver- /Entschwefelung des Adsorbers

2 Verwertbarkeit der Ergebnisse und der Erfahrungen

Ein Überblick über die Einsatzmöglichkeiten und die damit verbundenen Anforderungen an den Sensor ist in Tabelle 3 gegeben.

Einsatzmöglichkeiten	Auflösung	Temperatur	Dynamik	Messbereich
Regelkreis einer aktiven Abgasnachbehandlung	~ 5 ppm	< 850 °C	~ 100 ms	~ 700 ppm
Kontrolle der motorischen Verbrennung	~100 ppm	~ 950 °C	~ 10 ms	~1000 ppm
Katalysatorfunktionskontrolle (OBD)	< 5 ppm	< 970 °C	~ 100 ms	~100 ppm
Katheizmaßnahmen Kontrolle (OBD)	~100 ppm	< 970 °C	~1 s	~1000 ppm
Fehlzündungserkennung (OBD)	~100 ppm	~ 950 °C	~ 10 ms	~1000 ppm
Geregelte AGR	~100 ppm	~ 950 °C	~ 10 ms	~5000 ppm

Tabelle 3: Einsatzmöglichkeiten des Sensors

Sensoren mit weniger schneller Ansprechzeit können für eine Regelung der Abgasnachbehandlung verwendet werden. Neben der Ansprechzeit ist der Messbereich ein weiterer wichtiger Parameter, der die Einsatzmöglichkeiten des Sensors mitbestimmt. So kann ein hochauflösender Sensor zur Funktionskontrolle der Abgasnachbehandlung verwendet werden, während ein Sensor mit geringerer Empfindlichkeit und größerem Messbereich die Emission des Motors vor der Abgasreinigung überwachen kann, um zum Beispiel die erforderliche Reduktionsmitteldosierung anzusteuern.

Die VW- AG hat für den sog. FSI- Motor ein Konzept vorgestellt, welches einen NO_x- Sensor verwendet und damit auf eine zweite Lambda Sonde verzichten kann. Dieses Konzept basiert auf einem NO_x- Sensor mit integrierter λ - Sondenfunktion.

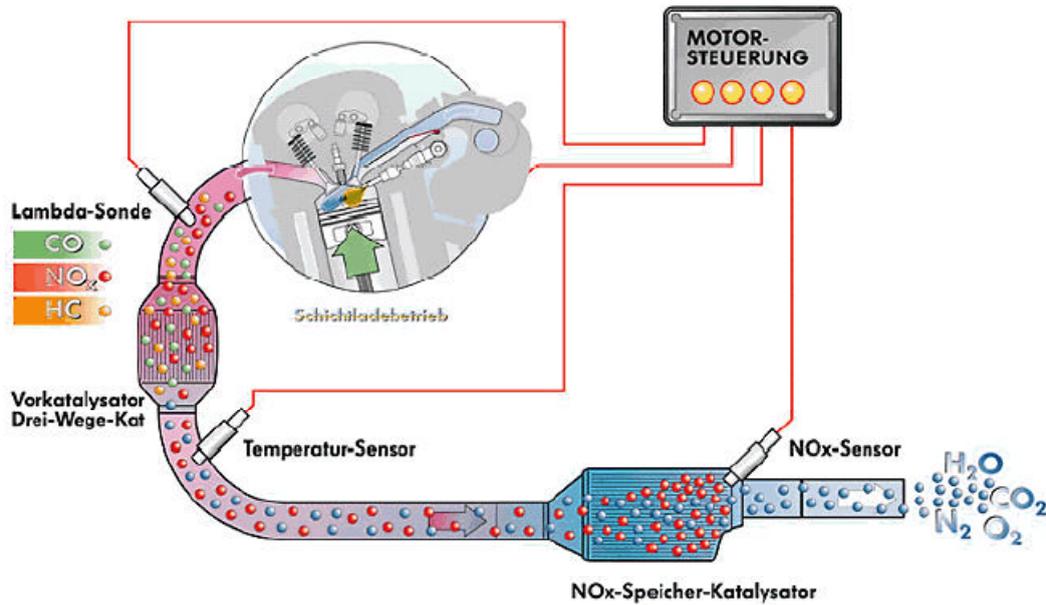


Abb. 36: Einsatz eines NO_x- Sensors beim FSI- Motor von Volkswagen [10]

Zur optimalen Bestimmung des NO_x- Massenstroms ist ein NO_x- Sensor wünschenswert, um den Beladungszustand des Speicherkatalysators direkt zu messen, statt über ein Modell zu ermitteln.

Der Einsatz eines NO_x- Sensors bietet die Möglichkeit der Abstimmung einer optimierten Speicher/ Regenerationsdauer und eines Motor/ Adsorber Betriebs mit:

- minimalen Kraftstoffverbrauch
- geringen Schadstoffemissionen

Das Model zur Berechnung des NO_x- Adsorberbeladungszustandes zeigt eine gute Übereinstimmung mit den am Prüfstand gemessenen Werten.

Basierend auf dem in der Abbildung 34 vorgestellten Modell ermöglicht der Einsatz eines NO_x- Sensors über den Vergleich zwischen der rechnerisch ermittelten und der gemessenen Speicherkapazität weiterhin die:

- Diagnose des NO_x- Adsorberkatalysators

Anhand der Diagnose des NO_x- Adsorberkatalysators könnte die erforderliche Entschwefelung des Katalysators eingeleitet werden oder im Falle einer irreversiblen Schädigung des Katalysators dieser ausgetauscht werden.

3 Fortschritte auf dem Gebiet NO_x- Sensorik

Erweiterung der AP II

AP II a: Benchmarking- Analyse verfügbarer NO_x- Sensoren (Prototypen)

Eine Analyse der verfügbaren NO_x- Sensorprototypen erfolgte mit dem Ziel einer Aufklärung technischer Eigenschaften der umgesetzten Konzepte und Festlegung der Kriterien bei der Entwicklung eines weiteren konkurrenzfähigen NO_x- Sensors.

Das Messprinzip des untersuchten NO_x- Sensors basiert auf der Gesetzmäßigkeit des chemischen Gleichgewichtes der chemischen Stoffe NO, N₂ und O₂.



Wird die O₂- Konzentration auf der rechten Seite dieser Gleichung vermindert, so verändert sich der chemische Gleichgewichtszustand. Dadurch kann eine O₂- Bildung aus den anfallenden NO gefördert werden. Die Konzentration des so gebildeten Sauerstoffs ist ein Maß für die NO_x- Konzentration im Abgas.

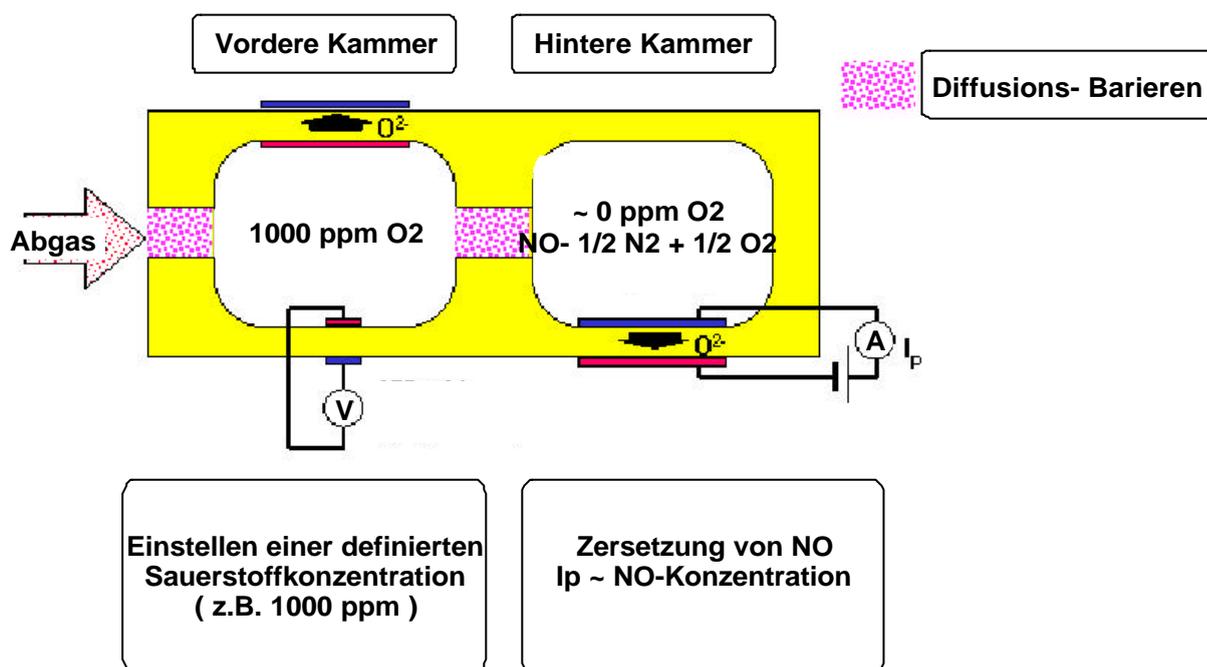


Abb. 37: Funktionsprinzip des untersuchten NO_x- Sensorprototypen

Das Abgas durchströmt den ersten Raum und die erste Pumpzelle regelt die O₂- Konzentration auf einen bestimmten O₂- Level ein. In dieser sauerstoffreichen Atmosphäre werden in der Zelle HC, CO und H₂ aufoxidiert, aber kein NO reduziert.

Das Abgas ohne „fette“ Abgaskomponenten dringt in den zweiten Raum ein. Mit dem Ziel der Zerlegung des NO in Sauerstoff und in Stickstoff wird in dem zweiten Raum die Sauerstoff-

konzentration weiter verringert. Um dies zu erreichen, wird die katalytische Aktivität der Messelektrode benutzt. Der dabei frei gesetzte Sauerstoff wird als Maß für NO_x-Konzentration im Abgas gemessen. Gleichzeitig bietet der untersuchte NO_x- Sensor die Funktionalitäten einer :

- λ - Sprungsonde (sehr hohe Genauigkeit im Bereich $0.99 < \lambda < 1$)
- λ - Breitbandsonde (hohe Genauigkeit im Bereich $\lambda > 0.7$)

Die Analyse der NO_x- Sensorprototypen erfolgte an einem DI Diesel Motor in unterschiedlichen Betriebspunkten.

- n = 3000 u/min mit AGR und bei
- unterschiedliche Lasten

Die Analyse (Abb. 38 - 41) zeigt relativ gute Übereinstimmung der gemessenen Werte im Bereich höherer Konzentrationen.

Dabei wurden folgende Problemstellen festgestellt:

- niedrige Konzentrationen < 100 ppm
- niedrige Temperaturen < 330 °C
- NH₃- Querempfindlichkeit bei fettem Motorbetrieb

Die Benchmarking- Analyse führte zu Festlegung erforderlicher Eigenschaften und folgender Entwicklungszielwerte:

- Lineare Kennlinie nach elektronischer Verarbeitung
- Streubreite- Abweichung zwischen Soll / Ist Wert kleiner +/- 3 %
- Temperaturstabilität bis 750 °C

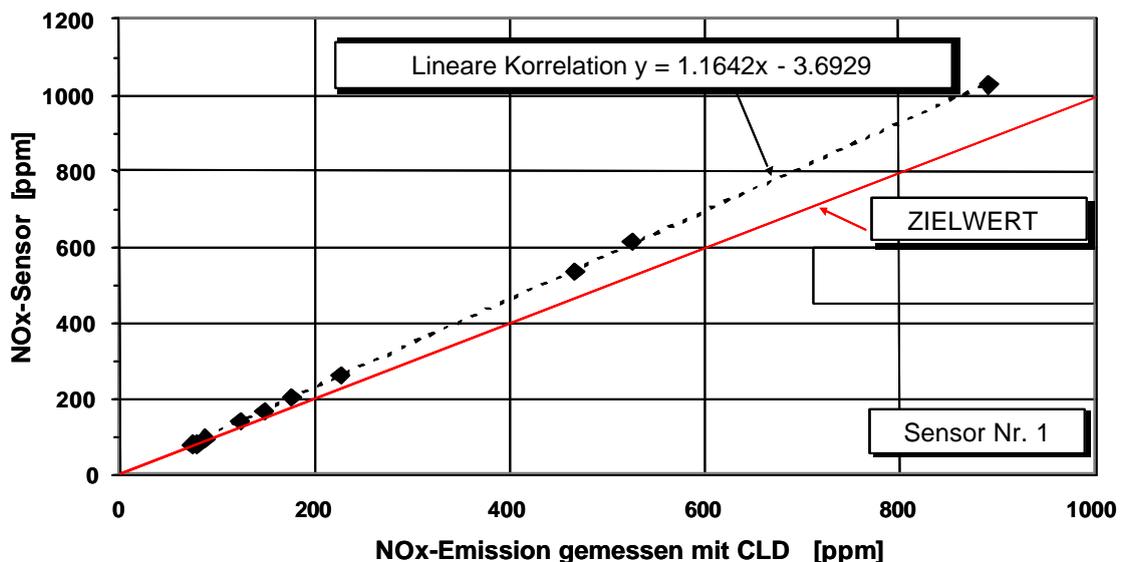


Abbildung 38: Analyse gemessener NO_x- Konzentrationen im motorischen Abgas – Sensor 1

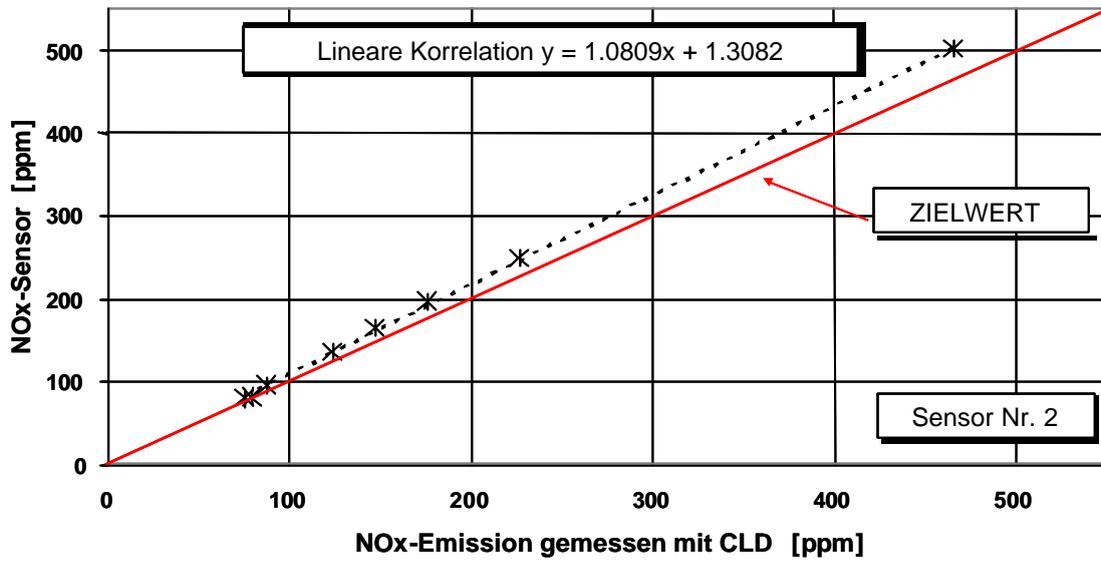


Abbildung 39: Analyse gemessener NO_x- Konzentrationen im motorischen Abgas - Sensor 2

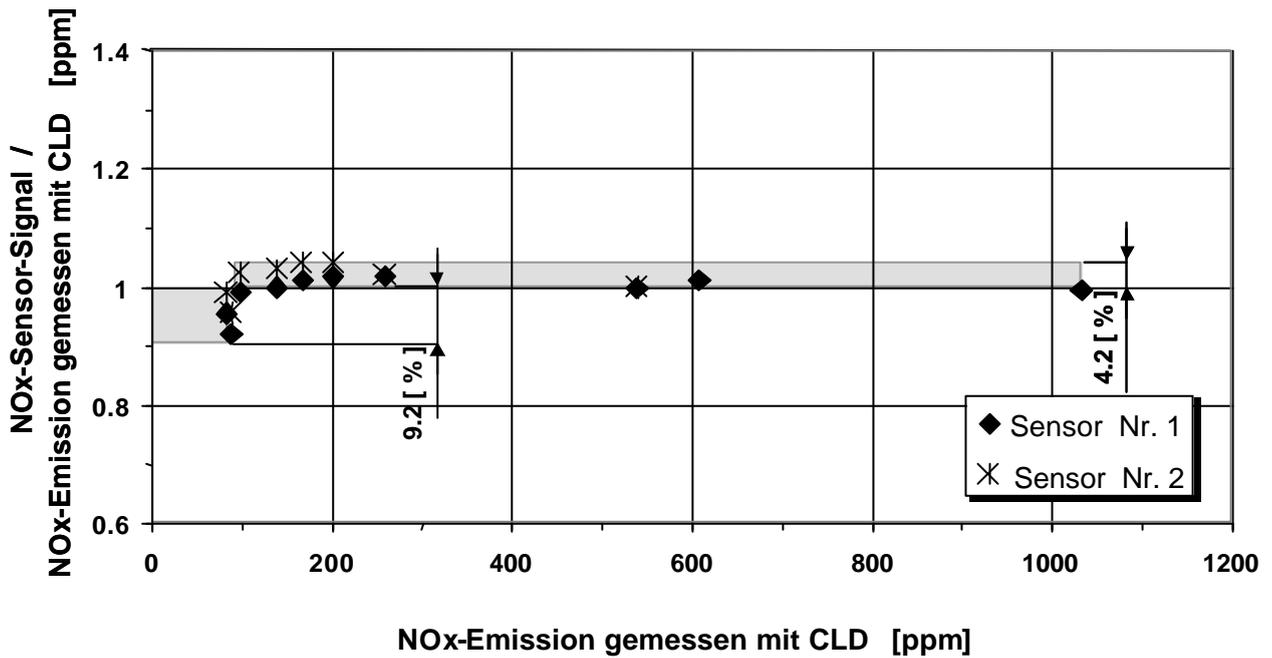


Abbildung 40: Streuband analysierter NO_x- Sensorenprototypen als Funktion der NO_x- Konzentration

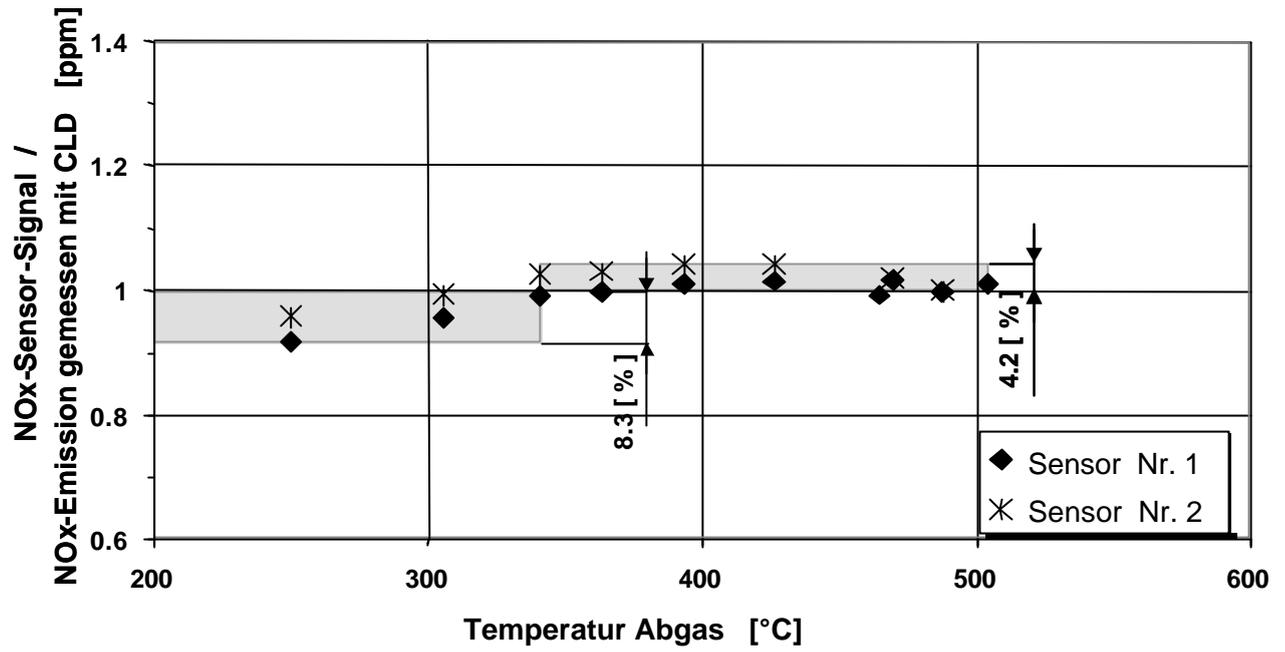


Abbildung 41: Streuband analysierter NO_x- Sensorenprototypen als Funktion der Temperatur

4. Geplante Veröffentlichung des Ergebnisses

Am 25. April 2002 erfolgte die öffentliche Abschlusspräsentation der Arbeiten aller Projektpartner beim IAP in Giesen.

III. LITERATUR

- [1] J.S. Hepburn, E. Thanasiu, D.A. Dobson, W.L. Watkins
„Experimental and Modeling Investigations of NOx Trap performance“
SAE Technical Paper Series 962051 (1996)
- [2] R.M. Heck, R.J. Farrauto:
„Catalytic Air Pollution Control“,
Chapman & Hall GmbH, Weinheim (1995)
- [3] U. Spiecher, G. Lepperhoff
„Instationärverhalten des Abgaskatalysators“
MTZ Motortechnische Zeitschrift 56, (1995)
- [4] I. Gottberg
„Principles of heterogeneous Catalysis as in the example of the 3- Way Catalytic Converter for SI- Engines“
Haus der Technik Essen, (1996)
- [5] J. Abthoff, H.D. Schuster, N. Pelz, G. Loose
„Berechnung der Abgasemissionen in definierten Fahrzyklen in Abhängigkeit von relevanten Einflußgrößen“
MTZ Motortechnische Zeitschrift 53, (1992)
- [6] E. Jobson, O. Hjortsberg, S.L.Andersson, I. Gottberg
„Reaction over a Double Layer tri-Metal Three Way Catalyst“
SAE Technical Paper Series 960801 (1996)
- [7] G. Wedler
„Lehrbuch der Physikalischen Chemie“
VCH-Verlag, Weinheim, 1985
- [8] J. Hagen
„Chemische Reaktionstechnik“
VCH-Verlag, Weinheim, 1992
- [9] H. Wallentowitz, D. Neunzig
„Reduzierung der Schadstoffbelastungen“
Institut für Kraftwesen Aachen der RWTH Aachen
- [10] J. Wiesinger
„Kfz-Technik und den Berufsschulunterricht“
<http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/otto/fsi.htm>
- [11] D. Voigtländer
„Untersuchungen zur Stickoxidminderung an mager betriebenen Ottomotoren mit NOx-Speicher-Katalysatoren“
Dissertation TU Dresden, 1998