

Abschlußbericht zum Verbundvorhaben

"Verbundprojekt: Schadstoffarmer Stadtbusmotor – Teilprojekt: Common-Rail-Busmotor mit partikel- und verbrauchsoptmierter Verbrennung und NOx-Speicherkatalysatorertechnologie"

19U9924A/5

Thema

"Verbundprojekt: Schadstoffarmer Stadtbusmotor – Teilprojekt: Common-Rail-Busmotor mit partikel- und verbrauchsoptmierter Verbrennung und NOx-Speicherkatalysatorertechnologie"

von

Dr.techn A. Pfeifer
Dr.-Ing. M. Krüger
Dipl.-Ing. U. Grütering

Projektleiter

Dr.-Ing. G. Lepperhoff

April 2004

Inhaltsverzeichnis

INHALTSVERZEICHNIS	2
ZUSAMMENFASSUNG	3
I. KURZDARSTELLUNG ZU	5
1. Aufgabenstellung	5
2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	6
3. Planung und Ablauf des Vorhabens	6
4. Stand der Wissenschaft und Technik zum Zeitpunkt der Antragsstellung	6
5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen	15
II. EINGEHENDE DARSTELLUNG	16
1. des erzielten Ergebnisses	16
1.1 Arbeitspaket 1: Aufbau Einzylindermotor	16
1.2 Arbeitspaket 2: Stationäre Verbrennungsabstimmung	19
1.3 Arbeitspaket 3: Instationäre Abstimmung und Regelkonzept	49
1.4 Arbeitspaket 4: Demonstrationsmotor	62
2. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen	74
3. des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	75
4. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses	76

Zusammenfassung

Im Rahmen des Vorhabens war das Potenzial der NO_x-Adsorber Technologie am NFZ Motor darzustellen. Ziel war dabei die Darstellung von Emissionen im Bereich EURO 4/5 mit Einsatz der Adsorbertechnologie als Stickoxidnachbehandlung und Darstellung der Partikelemissionsgrenzwerte mit innermotorischen Maßnahmen. Die erzielten Ergebnisse waren im Hinblick auf den Einsatz in Fahrzeugen mit niedrigem Lastprofil (Stadtbusmotoren) zu bewerten.

Ein Einzylinder-Dieselmotor wurde aufgebaut und mit einem flexiblen Common-Rail-Einspritzsystem (CR) ausgerüstet. Mithilfe des CR-Systems in Kombination mit einer verbesserten Brennverfahrensstrategie konnten die Voraussetzungen (abgesetzte Nacheinspritzung) für einen Regenerationsbetrieb von Adsorberkatalysatoren geschaffen sowie ein Brennverfahren dargestellt werden, das die Emissionswerte eines herkömmlichen Brennverfahrens im NO_x-Partikel Trade off unterschreitet. Dazu wurde ein Hoch-AGR-verträgliches Verfahren mit einem angehobenen Drallniveau eingesetzt. Der erwünschte innermotorische Regenerationsbetrieb konnte auf Basis dieses Brennverfahrens in einem weiten Kennfeldbereich realisiert werden.

In Folge wurde ein Vollmotor mit vergleichbarem Brennverfahren aufgebaut. An dem Vollmotor wurden die Untersuchungen zum Regenerationsbetrieb durchgeführt. Neben der innermotorischen Regeneration, bei der mithilfe von luftseitigen Maßnahmen die Luftzufuhr reduziert und mithilfe von kraftstoffseitigen Maßnahmen die eingespritzte Kraftstoffmenge drehmomentneutral erhöht wird, war ein unterstöchiometrischer Betrieb zur Regeneration darzustellen. Weiterhin wurde die externe Anfettung zur Regeneration des NO_x-Adsorbers untersucht, die in den hochlastigen Betriebspunkten notwendig ist, da hier Bauteilgrenzen einen rein innermotorischen Regenerationsbetrieb verhindern.

Eine NO_x-Adsorberregeneration nur mit innermotorischen Maßnahmen ermöglicht eine Stickoxidreduktion im ESC von ca. 20 % bei dem verwendeten Prototypmotor. Nachteilig hierbei ist, dass oberhalb von ca. 50 % keine Regeneration erfolgt und der Motor nach der Sättigung des NO_x-Adsorbers die Rohemission emittiert.

Eine Regeneration des NO_x-Adsorbers im gesamten Motorkennfeld durch die Kombination von innermotorischen Maßnahmen und externen Regenerationsmaßnahmen ermöglicht NO_x-Reduktionsraten von ca. 80 % im ESC und ca. 50 % im ETC bei moderatem Kraftstoffverbrauch von unter 1 % im ESC bzw. 4 % im ETC, gemessen nach den Testregeln. Damit sind die in der Diskussion befindlichen EURO V-Grenzwerte für NO_x auch mit dem eingesetzten Motor erreichbar.

Verbesserungspotential ist dabei noch im Brennverfahren enthalten wie die 1Zylinderergebnisse zeigen.

Dagegen scheint es auch bei verbessertem Brennverfahren sehr schwierig, die Partikelgrenzwerte EURO V ohne Partikelfilter zu erreichen, bedingt durch den Anstieg der Partikelemission bei der innermotorisch durchgeführten NOx-Adsorberregeneration.

Muß aber ein Partikelfilter eingesetzt werden, kann durch eine partikellastige Motorabstimmung die Motor-NOx-Emission verringert und damit auch die Verbrauchsverschlechterung durch Verringerung der Adsorberregeneration abgesenkt werden.

Die auftretenden Temperaturen stellen hinsichtlich des Serieneinsatzes ein Problem dar, hier ist einerseits eine Verbesserung der thermischen Belastbarkeit von Abgasturbolader und Katalysatoren notwendig.

Für den Einsatz in Fahrzeugen mit Niedriglastbetrieb wie beispielsweise Stadtbusse, aber auch Verteilerfahrzeuge konnte das Adsorbersystem als geeignete Maßnahme zur Erreichung der zukünftigen Emissionsgrenzwerte erarbeitet werden, die Temperaturproblematik wirkt sich hier aufgrund des Lastprofils entsprechend geringer aus.

Ein weiteres Problem stellt die Verschwefelung der Adsorberkatalysatoren dar, die vom Gesetzgeber eingeleiteten Maßnahmen zur drastischen Reduktion des Kraftstoffschwefelgehaltes erweitern hier jedoch deutlich das notwendige Entschwefelungsintervall. Die Entschwefelung ist mit den dargestellten Motorbetriebszuständen (stöchiometrischer und unterstöchiometrischer Betrieb bei Temperaturen von ca. 750°C am Adsorber) ebenfalls möglich.

I. Kurzdarstellung zu

1. Aufgabenstellung

Aufgabe war die Darstellung des Potenzials der NO_x-Adsorber Technologie am NFZ Motor. Dazu war eine innermotorische Kalibrierung für niedrige Partikelemissionen vorzunehmen, um ausschließlich unter Einsatz der Adsorbertechnologie als Abgasnachbehandlung die Euro 4/5 Grenzwerte unterschreiten zu können.

Die Aufgabenstellung gliederte sich in vier Arbeitspakete, die im folgenden kurz beschrieben sind:

1. Konzeptphase:

Im Rahmen der Konzeptphase war ein Einzylinder-Versuchsmotor mit AGR und Fremdaufladung als Versuchsträger aufzubauen. Als Einspritzsystem war ein CR-System aufzubauen, welches das Potenzial zur freien Einspritzgestaltung konstruktionsbedingt aufweist.

2. Stationäre Verbrennungsabstimmung:

Mit dem aufgebauten Einzylindermotor war eine stationäre Verbrennungsabstimmung im Hinblick auf die Erfüllung eines Partikelgrenzwertes von 0,02 g/kWh im ESC zu finden. Das so erarbeitete Brennverfahren war auf den Vollmotor zu übertragen. Zusätzlich sollte die Fähigkeit eines unterstöchiometrischen Betriebes ohne nennenswerten Anstieg der Partikelemissionen gezeigt werden.

3. Instationäre Abstimmung und Regelkonzept:

Diese Phase umfasste die Applikation von Regenerationsbedingungen $\lambda < 1$ für einen Speicherkatalysator unter stationären und dynamischen Betriebsbedingungen. Dabei war insbesondere der Lambdasprung, d.h. der Wechsel zwischen magerem und fettem Motorbetrieb zu betrachten.

4. Demonstrationsmotor:

Basierend auf den vorhergehenden Arbeitspaketen wurde die Kalibrierung im gesamten Kennfeldbereich des Versuchsmotors durchgeführt. Das Potenzial hinsichtlich der Emissionsverbesserung wurde im Rahmen von dynamischen Tests (ETC) und des für eine Zertifizierung gemäß den europäischen Richtlinien ebenfalls erforderlichen Stationärtests (ESC) nachgewiesen.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Die ursprüngliche Planung des Versuchsvorhabens basierte auf einem Verbundvorhaben mit dem Partner MAN. Nach Absage des Partners wurde ein Ersatz-Vollmotor der Firma Deutz im Rahmen eines Kooperationsvertrages genutzt. Da hierbei ein Prototypmotor mit unveröffentlichter Verbrennungsabstimmung zum Einsatz kam, war eine Änderung der Verbrennungsausrüstung (Düsen, Kolben) nicht gestattet.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Ursprünglicher Zeitplan:

Für das erste Jahr waren Aufbau und Betrieb des Einzylindermotors vorgesehen, für das zweite Jahr die Untersuchungen am Prototyp-Vollmotor. Je nach Arbeitsfortschritt war abschließend geplant, auch einen Einsatz im Stadtbus unter realen Bedingungen zu verwirklichen.

Modifizierter und mit dem Projektbegleiter abgestimmter Zeitplan:

Aufgrund von Verzögerungen infolge der Absage des ursprünglichen Partners und anschließend aufgrund der Verhandlungen bis zur Anlieferung des Motors von Deutz verzögerte sich der Beginn der Vollmotorversuche um etwa ein halbes Jahr. Nach Inbetriebnahme des Prototyp-Vollmotors wurde rasch deutlich, dass vor allem das Prototyp-Aufladesystem extrem Ausfall-anfällig war und auch hier ein verlässlicheres Ersatzsystem beschafft werden musste. Diese Verzögerungen haben dazu geführt, dass eine Laufzeitverlängerung bewilligt wurde und im Einvernehmen mit dem Projektbegleiter der Umfang der Verifikationsmessungen neu definiert wurde (Entfall der Versuche in einem Demo-Fahrzeug, Konzentration auf die Emissionszyklen ESC und ETC).

4. Stand der Wissenschaft und Technik zum Zeitpunkt der Antragsstellung

Die Entwicklungsarbeiten am PKW wie auch am NFZ-Dieselmotor sind in den letzten Jahren zu einem entscheidenden Teil durch die Abgasemissionsgesetzgebung geprägt worden. Berücksichtigt man neben den zukünftig noch erreichbaren brennverfahrensspezifischen Fortschritten zusätzlich das Potenzial, das ein Kraftstoff mit reduziertem Schwefelanteil bietet, dann ist mit modernster NFZ-Dieselseltechnologie im neuen europäischen 13-Stufen-Test (ESC) eine NO_x-Emission von ca. 5 g/kWh bei einem Partikelemissionsniveau von < 0,1 g/kWh erreichbar. Diese Emissionswerte erfüllen die EURO III-Grenzwerte. Weitere Emissionsreduzierungen auf das Niveau der für das Jahr 2005 vorgeschlagenen Stufe EURO VI bzw. der für 2008 vorgesehenen Stufe EURO V erfordern aus heutiger Sicht den Einsatz von Stickoxid-Abgasnachbehandlungsmaßnahmen bzw. Partikelfiltersystemen.

Beim Dieselmotor macht - im Gegensatz zum stöchiometrisch betriebenen Ottomotor - der permanente Sauerstoffüberschuss im Abgas den Einsatz von Reduktionsmitteln im Abgas erforderlich. Stickoxide können bei Nutzfahrzeugmotoren z.B. durch SCR-Katalysatoren mit wässriger Harnstofflösung als Reduktionsmittel vermindert werden. Nachteilig im Stadtbetrieb, insbesondere bei modernen Niederflurfahrzeugen mit extrem beengten Einbauverhältnissen im Motorraum - ist zum einen die große Menge Reduktionsmittel, die im Fahrzeug untergebracht werden muss und zum anderen die zur katalytischen Reduktion notwendige hohe Abgastemperatur, die je nach Strecken- bzw. Betriebsprofil relativ selten erreicht wird. Dies kann zu Problemen in Bezug auf den Abfall des katalytischen Umsetzungswirkungsgrad der Stickoxidemission führen.

Daneben gibt es z. Zt. nur noch ein NO_x-Abgasnachbehandlungskonzept, das die gestellten Anforderungen erfüllen kann, und das gerade in Verbindung mit einer stark intermittierenden Auslastung im Stadtbetrieb aussichtsreich erscheint, nämlich den hier untersuchten NO_x-Speicherkatalysator.

Speicherkatalysatoren müssen von Zeit zu Zeit regeneriert werden, um das begrenzte Speichervermögen wiederherzustellen. Dies geschieht durch intermittierend angefetteten Motorbetrieb ($\lambda < 1$; $\lambda = 1$ Luftverhältnis bei stöchiometrischer Verbrennung). Die Vermeidung der bei einem Dieselmotor in diesen Betriebszuständen sonst auftretenden unvermeidbar hohen Rußemissionen sowie die Erreichung der zur NO_x- und Schwefelregeneration notwendigen Abgastemperaturen ist nur durch eine entsprechende Gestaltung des Einspritzverlaufs möglich. Hierzu bietet sich die Common-Rail-Technik mit elektronisch gesteuerten Einspritzventilen an, die eine Veränderung des dieselmotorischen Verbrennungsprozesses in sehr weiten Grenzen ermöglicht.

Von Untersuchungen mit Mager-Ottomotoren ist bekannt, daß die Speicherung von Stickoxiden in sauerstoffreichem Abgas mit NO_x-Speicherkatalysatoren möglich ist, wobei hohe Wirkungsgrade erreicht werden können [1-12]. Problematisch ist bei der NO_x-Speicherkatalysator-Technologie im besonderen die Vergiftung des Speichermaterials durch den im Kraftstoff vorkommenden Schwefel [1,5], denn die als Speichermaterial verwendeten Alkali- und Erdalkaliverbindungen zeichnen sich durch eine hohe Neigung zur Sulfatbildung aus. Bei Verwendung von Kraftstoffen mit einem Schwefelgehalt von teilweise mehr als 10 Gew.-ppm ist die NO_x-Speicherung infolge einer Schwefelvergiftung bereits nach kurzer Zeit (wenige Stunden) erschöpft [1]. Eine Desulfatisierung des Speichermaterials ist zwar bei hohen Temperaturen und gleichzeitig reduzierender Atmosphäre möglich, aber dabei muss eine irreversible thermische Schädigung des Speichermaterials vermieden werden. Ein

weiterer Aspekt der NOx-Speicherkatalysator-Technologie ist der mit der intermittierenden Anfettung verbundene Anstieg des Kraftstoffverbrauches. Durch eine sorgfältige Anpassung der Speicher- und Regenerationsparameter kann der Anstieg des Kraftstoffverbrauches bei Mager-Ottomotoren unter stationären Betriebsbedingungen bei etwa 90 %iger NOx-Konvertierung auf etwa 2 % begrenzt werden [9].

In [10,11] wurde die grundsätzliche Übertragbarkeit der NOx-Speicherkatalysator-Technologie auf Dieselmotoren demonstriert, wobei jedoch die Frage der Regeneration solcher Katalysatoren noch nicht zufriedenstellend gelöst wurde. Günstige Regenerationsbedingungen für den Speicherkatalysator sind beispielsweise unter stöchiometrischen oder fetten Bedingungen gegeben [6,9,10,11]. Durch eine saugseitige Drosselung wurden die zur NOx-Regeneration notwendigen CO- und HC-Konzentrationen bei gleichzeitiger Sauerstoffarmut erreicht. Dabei steigt die Rußemission auf inakzeptabel hohe Werte an und auch der Kraftstoffverbrauchsanstieg, der durch die Drosselung hervorgerufen wird, ist für einen Dieselmotor nicht akzeptabel.

Untersuchungen zur dieselmotorischen Verbrennungsprozeßführung haben gezeigt, dass mit einer gezielten Einspritzverlaufsformung die Abgasemissionen in weiten Grenzen beeinflusst werden können, ohne den Kraftstoffverbrauch und die Geräuschemission nennenswert zu beeinträchtigen [22-31]. Konventionelle Einspritzsysteme bieten die Möglichkeit der freien Einspritzverlaufsformung nicht. Mit Hilfe der neuen Diesel-Einspritztechnologien jedoch, wie z.B. Pumpe-Düse-Systemen oder der Common-Rail-Technologie [22-31], ist es möglich, den Einspritzverlauf in deutlich weiteren Grenzen zu formen als es mit den verfügbaren Pumpe-Leitung-Düse-Systemen bis etwa Anfang/Mitte der 90er Jahre möglich war. Gerade die Common-Rail-Technik mit piezoelektrisch gesteuerten Einspritzventilen - wie sie z.B. bei FEV eingesetzt wird [24] - ermöglicht eine weitreichende Veränderung des dieselmotorischen Prozessverlaufes.

Die FEV Motorentchnik arbeitet seit vielen Jahren auf dem Gebiet der dieselmotorischen Verbrennungsprozessführung und moderner Einspritzsysteme [24,32-42]. Auf dem Gebiet der dieselmotorischen Verbrennungsprozessführung konzentrieren sich die Arbeiten auf die Entwicklung motorischer Konzepte zur Erzielung niedrigster Emissionswerte verbunden mit guten Kraftstoffverbräuchen und guter Fahrdynamik. Beispielsweise war die FEV Motorentchnik an Untersuchungen mit dem ersten direkteinspritzende Pkw-Dieselmotor mit 4 Ventilen pro Zylinder beteiligt [38,39,40]. Weiterhin wurden gezielt die Einflüsse der Einspritzung und Gemischbildung auf den dieselmotorischen Verbrennungsprozess [34,36], die Mechanismen und Einflussgrößen der NOx-Bildung [33,41] sowie die Rußbildung im

Dieselmotor untersucht [35,41,42]. Diese Erfahrungen - im besonderen hinsichtlich der Rußbildungsmechanismen - fließen in das Vorhaben ein.

Aus eigenen Arbeiten auf dem Gebiet der dieselmotorischen Abgasnachbehandlung verfügt die FEV über Erfahrungen mit Abgasnachbehandlungssystemen zur Verminderung der Partikel- und Stickoxidemissionen von Dieselmotoren [13-20]. Mit dem realisierten Harnstoff-SCR-System konnten NO_x-Reduzierungen von über 65 % in gesetzlich vorgeschriebenen Abgastestzyklen erzielt werden [19]. Ein wesentlicher Beitrag zur Erreichung dieser hohen Wirkungsgrade wurde durch die Erarbeitung einer entsprechenden Kontrollstrategie geleistet. Die Erfahrungen aus diesem Programm fließen in das beantragte Vorhaben ein.

Die FEV Motorentchnik verfügt weiterhin über Erfahrungen auf dem Gebiet der selektiven katalytischen NO_x-Reduktion und der NO_x-Speicherkatalysatoren bei Mager-Ottomotoren [7,9]. Es wurden dabei Untersuchungen zum Speicher- und Regenerationsverhalten von NO_x-Speicherkatalysatoren durchgeführt und entsprechende Speicher- und Regenerationsstrategien ausgearbeitet. Dabei wurden Speicher- und Regenerationsstrategien unter besonderer Berücksichtigung einer optimalen Katalysatorregeneration bei gleichzeitig möglichst hoher NO_x-Reduzierung und möglichst geringem Anstieg des Kraftstoffverbrauches erarbeitet. Abbildung 1 zeigt exemplarisch das Speicher- und Regenerationsverhaltens eines mit schwefelhaltigem Kraftstoff gealterten NO_x-Speicherkatalysators an einem Mager-Ottomotor. Im dargestellten Fall konnte für den gealterten Katalysator ermittelt werden, dass bei der Unterschreitung einer Regenerationsdauer von etwa 2 sec keine vollständige Katalysatorregeneration mehr möglich ist.

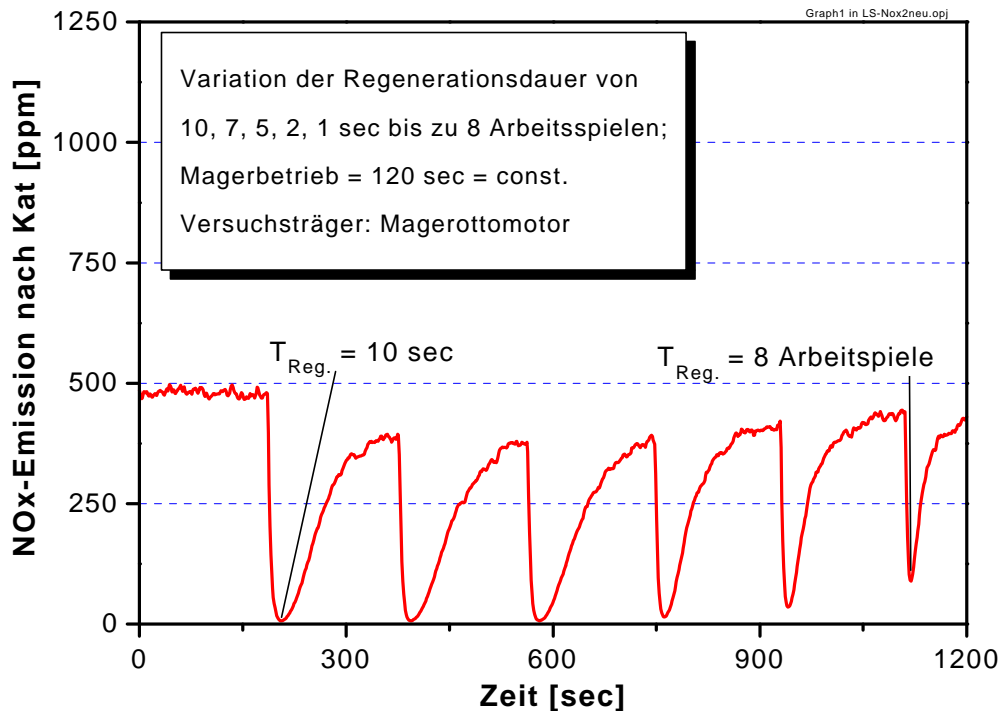


Abbildung 1: Speicher- und Regenerationsverhalten eines mit schwefelhaltigem Kraftstoff gealterten NOxSpeicherкатаlysators an einem Mager-Ottomotor bei variabler Regenerationsdauer

Mit dem FEV-eigenen Common-Rail-Dieselmotor (4-Zylinder mit 1,9 l Hubvolumen) konnte im Rahmen von Voruntersuchungen gezeigt werden, dass es nach sorgfältiger Abstimmung der Einspritzparameter und der Abgasrückführung grundsätzlich möglich ist, einen Dieselmotor unter stationären Betriebsbedingungen bei einem Luftverhältnis $\lambda < 1$ zu betreiben, ohne dass ein stark überhöhter Partikelaustritt in Kauf zu nehmen ist, (Abbildung 2). Beim Betrieb bei Luftverhältnissen $\lambda < 1$ ergeben sich für die Reduktionsmittel HC und CO die angestrebte Konzentration im %-Bereich, während die Schwärzungszahl nach Bosch von 0,03 im Normalbetrieb nur auf 0,3 im stöchiometrischen Betrieb ($\lambda = 1$) ansteigt.

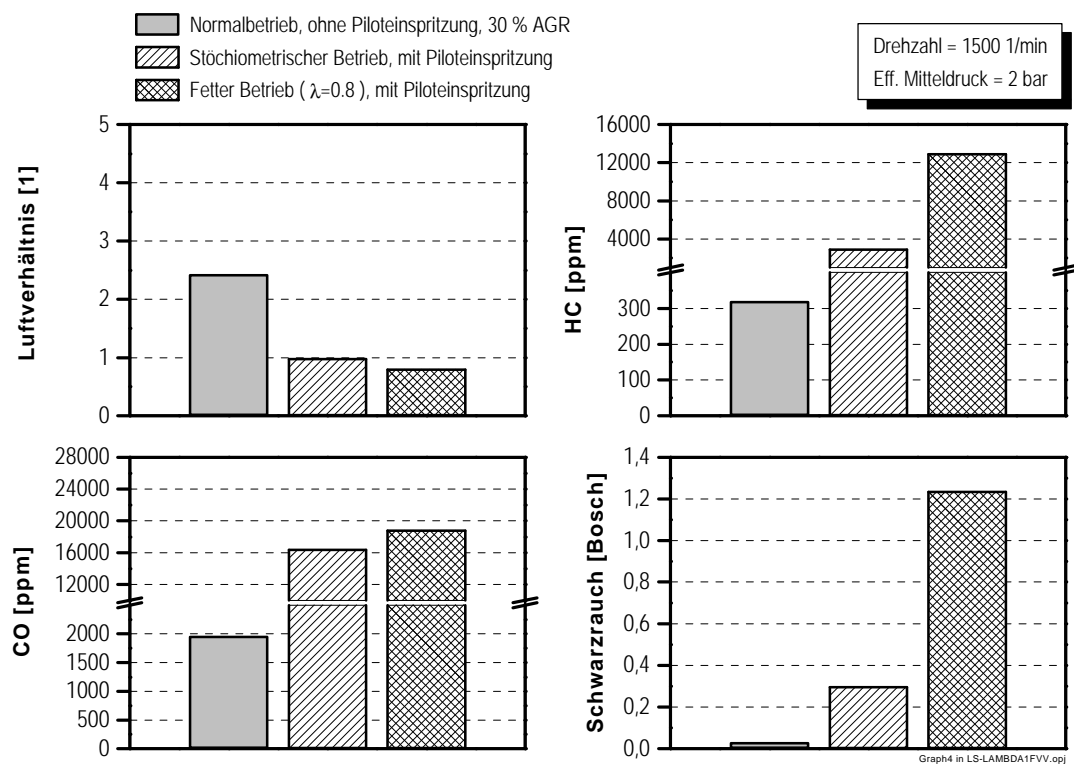


Abbildung 2: Emissionen eines Common-Rail-Dieselmotors bei verschiedenen Luftverhältnissen bei stationärem Betrieb (Versuchsträger: eigenentwickelter Common-Rail-Dieselmotor)

Literaturverzeichnis

- [1] Strehlau, W.; Höhne, J.; Göbel, U.; Trillaart, J. von, Müller, W. Lox, E.
Neue Entwicklungen in der katalytischen Abgasnachbehandlung von Magermotoren;
Tagung "Motor und Umwelt" (1997)
- [2] Burk, P.; Punke, A.; Dahle, U.
Zukünftige Abgasnachbehandlungsstrategien für mager betriebene Ottomotoren;
Tagung "Motor und Umwelt" (1997)
- [3] FVV-Vorhaben Nr. 664: Beurteilung der NO_x-Konversion mittels kontinuierlich arbeitender DeNO_x-Katalysatoren bzw. NO_x-Speicher-Katalysatoren an einem Otto-DI-Motor und Feststellung der limitierten und nichtlimitierten Emissionen (1997)
- [4] Kobayashi, T.; Yamada, T.; Kayano, K.
Study of NO_x Trap Reaction by Thermodynamik Calculation; SAE-Paper Nr. 970745 (1997)
- [5] Fekete, N.; Kemmler, R.; Voigtländer, D.; Krutzsch, B.; Zimmer, E.; Wenninger, G.; Strehlau, W.; Trillaart, J. van; Leyrer, J.; Lox, E.; Müller, W.
Evaluation of NO_x Storage Catalysts for Lean Burn Gasoline Fuel Passenger Cars; SAE-Paper Nr. 970746 (1997)
- [6] FVV-Vorhaben Nr. 624: Untersuchungen zum NO_x-Speicher-Reduktions-Katalysator (1996)
- [7] DFG-Vorhaben "Selektive katalytische Stickoxidreduktion für überstöchiometrischen Motorbetrieb bei Ottomotoren"
- [8] Brogan, M.S.; Brisley, R.J.; Moore, J.S.; Clark, A.D.
Evaluation of NO_x Adsorber Catalyst Systems to Reduce Emissions from Lean Running Gasoline Engines; SAE-Paper Nr. 962045 (1996)
- [9] Lütkemeyer, G.; Weinowski, R.; Lepperhoff, G.; Brogan, M.S.; Brisley, R.J.; Wilkins, A.J.J.
Comparison of DeNO_x and Adsorber Catalysts to Reduce NO_x-Emissions from Lean Burn Gasoline Engines; SAE-Paper Nr. 960246 (1996)
- [10] Brogan, M.S.; Will, N.S.; Twigg, M.V.; Wilkins, A.J.J.; Jordan, K.; Brisley, R.J.
Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der DeNO_x-Katalyse Technologie für Diesel- und Magermotoren; 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentchnik (1997)
- [11] Bailey, O.H.
NO_x Adsorbers for Diesel Applications - General Considerations and Operational Issues; ASEC Publikation (1997)
- [12] Pischinger, S.; Bögner, W.; Krämer, M.; Krutzsch, B.; Voigtländer, D.; Wenninger, G.; Wirbeleit, F.; Brogan, M.S.; Brisley, R.J.; Webster, D.E.
Removal of Nitrogen Oxides from the Exhaust of a Lean-Tune Gasoline Engine; Applied Catalysis B7, S. 153 - 171 (1995)

- [13] Lepperhoff, G.
NO_x-Reduktion in DeNO_x-Katalysatoren durch Kohlenwasserstoffe im Abgas von Ottomotoren; Technische Akademie Esslingen (1994)
- [14] Spicher, U.; Lepperhoff, G.
Instationärverhalten des Abgaskatalysators; Motortechnische Zeitschrift MTZ 56, Nr. 6 (1995)
- [15] FVV-Vorhaben Nr. 443: Untersuchung der NO_x-Reduzierung im Abgas von Dieselmotoren durch SCR-Katalysatoren (1991)
- [16] FVV-Vorhaben Nr. 323: Verminderung der Partikelemission von Dieselmotoren durch Abgasnachbehandlung (1990)
- [17] Lepperhoff, G.
Verfahren zur Abgasnachbehandlung bei Kolbenbrennkraftmaschinen mit Kraftstoffdirekteinspritzung; Patentanmeldung DE 197 46 855.1 (1997)
- [18] Dürnholz, M.; Strobel, M.
Selbstzündmotor mit Dieselsaugrohreinspritzung für Fahrzeug- und Stationäranwendung; Patent DE 197 17 805.7 (1997)
- [19] Lüders, H.; Backes, R.; Hüthwohl, G.; Ketcher, D.A.; Horrocks, R.W.; Hurley, R.G.; Hammerle, R.H.
An Urea LeanNO_x Catalyst System for Light Duty Diesel Vehicles; SAE-Paper Nr. 952493 (1995)
- [20] Stommel, P.; Strobel, M.; Lauga, V.; Pouille, J.-P.
Applikationsstrategien für Pkw-Diesel-LeanNO_x-Katalysatoren; 6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik (1997)
- [21] FVV-Vorhaben Nr. 561: VTG-Regelung und AGR-Steuerung
- [22] FVV-Vorhaben: Einspritzverlaufsformung
- [23] Dürnholz, M., Diehl, P.
Einspritzverlaufsformung als Maßnahme zur Reduzierung der Schadstoffemission von direkteinspritzenden Dieselmotoren; Haus der Technik, Essen (1993)
- [24] Dürnholz, M.; Gürich, G.; Laumen, H.J.; Stommel, P.
Piezoelektrisch gesteuertes Einspritzsystem zur Verbesserung des Emissionsverhaltens von direkteinspritzenden Dieselmotoren; 14. Internationales Wiener Motorensymposium (1993)
- [25] Eberle, M.K.
Common Rail Einspritzsysteme - Gegenwart und Zukunft; Internationale Konferenz der ETH Zürich (1997)

- [26] Hiereth, H.; Schwarz, V.
Status von Common Rail Einspritzsystemen für Nutzfahrzeugmotoren; Internationale Konferenz der ETH Zürich (1997)
- [27] Schöni, A.; Signer, M.
Möglichkeiten und Grenzen des Common Rail Systems am Beispiel des schnelllaufenden IVECO Kleindieselmotors mit direkter Einspritzung; Internationale Konferenz der ETH Zürich (1997)
- [28] Hoffmann, K.-H.; Hummel, K.; Maderstein, Th.; Peters, A.
Das Common-Rail-Einspritzsystem - Ein neues Kapitel des Dieseleinspritztechnik; MTZ Motortechnische Zeitschrift 10, S. 572 - 591 (1997)
- [29] Härle, H.
Anwendung von Common-Rail-Einspritzsystemen für Nkw-Dieselmotoren; Internationale Konferenz der ETH Zürich (1997)
- [30] Pierpont, T.; Reitz, R.D.
Reducing Particulates and NO_x Emissions by Using Multiple Injections in a Heavy-Duty DI Diesel Engine; SAE-Paper Nr. 940897 (1994)
- [31] Nehmer, D.A.; Reitz, R.D.
Measurement of the Effect of Injection Rate and Split Injections on Diesel Engine Soot and NO_x Emissions; SAE-Paper Nr. 940668 (1994)
- [32] FVV-Vorhaben Nr. 562: Diesel-Gemischbildung II (1994)
- [33] Dürnholz, M.; Strobel, M.
Motorische Maßnahmen zur Reduzierung der Stickoxidemissionen von Nutzfahrzeugmotoren; 5. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik (1995)
- [34] Dürnholz, M.; Strobel, M.
Brennverfahrenstechnische Maßnahmen zur Schadstoffemissionsverminderung moderner aufgeladener Nutzfahrzeugdieselmotoren; Gemeinschaftstagung "Emissionen des Straßenverkehrs" (1995)
- [35] Dürnholz, M.; Bäcker, H.; Wiartalla, A.
Investigation of Spray Propagation, Combustion and Soot Formation by Optical Measurement Techniques for Diesel Engine Fuels in a Model Combustion Chamber, CIMAC (1995)
- [36] Dürnholz, M.; Strobel, M.
Untersuchung des Potentials der Brennverfahrensparameter Drall und Einspritzung zur Erfüllung Anforderungen an hochaufgeladenen Dieselmotoren mit direkter Kraftstoffeinspritzung; Abschlußbericht zum FVV-Vorhaben Nr. 562 (1995)
- [37] Stommel, P.; Dürnholz, M.
Grundlagenuntersuchungen zur Gemischbildung im hochaufgeladenen direkteinspritzenden Dieselmotor; Motortechnische Zeitschrift MTZ 11 (1994)

- [38] Dürnholz, M.; Hermann, H.-O.; Endres, H.
Das Potential der Vierventiltechnik beim Pkw-Dieselmotor mit direkter Kraftstoff-
einspritzung; 4. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik (1993)

- [39] Dürnholz, M.; Hermann, H.-O.
Der direkteinspritzende Pkw-Dieselmotor als Vierventiler - Ein Motorkonzept zur
Erfüllung zukünftiger Anforderungen; HdT Essen (1995)
- [40] Schwaderlapp, M.; Bick, W.; Pieper, M., Dürnholz, M.
Eine zukunftsweisende konstruktive Lösung für den direkteinspritzenden Vierventil-
Pkw-Dieselmotor; Wiener Motorensymposium (1995)
- [41] Wölfle, M.
Untersuchung der Schadstoffbildung im Zylinder eines direkteinspritzenden Pkw-
Dieselmotors, Dissertation RWTH Aachen (1994)
- [42] Wiartalla, A.P.
Untersuchung der Rußbildung bei der dieselmotorischen Verbrennung in einer
Modellbrennkammer; Dissertation RWTH Aachen (1996)

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Aufgrund des Ausstieges der Firma MAN AG aus dem Verbundprojekt beschränkte sich die Zusammenarbeit auf die Firmen Deutz im Rahmen der Überlassung des Vollmotors, auf OMG, heute Umicore, als Lieferant für Speicherkatalysatoren und Oxidationskatalysatoren und auf BorgWarner Turbosystems, die einen Prototyp-Abgasturbolader für den Prototyp Deutz-Motor bereitstellten.

II. Eingehende Darstellung

1. des erzielten Ergebnisses

1.1 Arbeitspaket 1: Aufbau Einzylindermotor

Im Rahmen des Arbeitspaketes 1 wurde der Einzylindermotor wie im Antrag beschrieben aufgebaut. Wesentliche technische Merkmale des Motors sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Der Motor wurde mit der in Abbildung 3 dargestellten Brennraum- und Einspritzstrahlgeometrie betrieben. Bei dem eingesetzten Einspritzsystem handelte es sich um ein auf Einzylinderbetrieb adaptiertes Bosch-CR System.

Tabelle 1: Daten Einzylinder Forschungsmotor

Bohrung	127 mm
Hub	137.8 mm
Hubraum	1.75 l
Spitzendruck	180 bar
Aufladeverfahren	4 V, Fremdaufladung

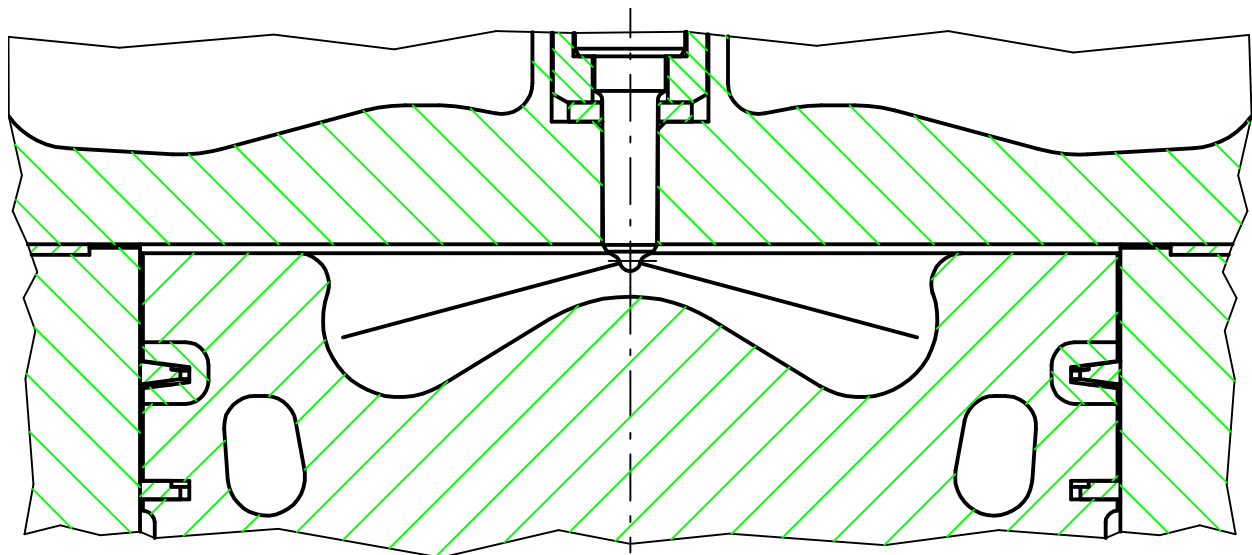


Abbildung 3: Brennraumgeometrie mit Einspritzstrahlage beim EZ-Forschungsmotor

Der Motor wurde mit verschiedenen Zylinderköpfen betrieben, die sich insbesondere im Drall- und Durchflussverhalten voneinander unterschieden. Dabei wurden die in Abbildung 4 gezeigten Kennwerte für Drall und Durchfluss ermittelt.

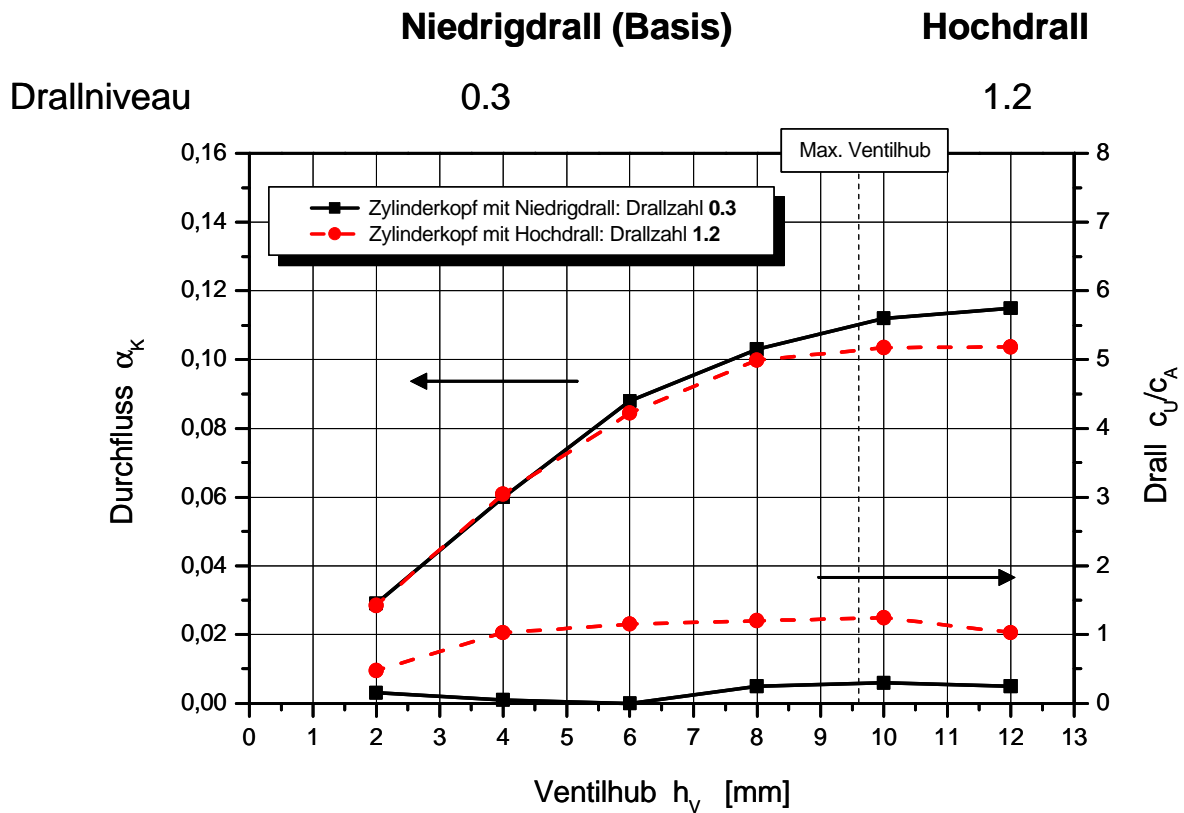


Abbildung 4: Dralluntersuchung Zylinderkopf EZ-Forschungsmotor

Einen Überblick über den gesamten Aufbau des Einzylinder-Motors gibt Abbildung 5.

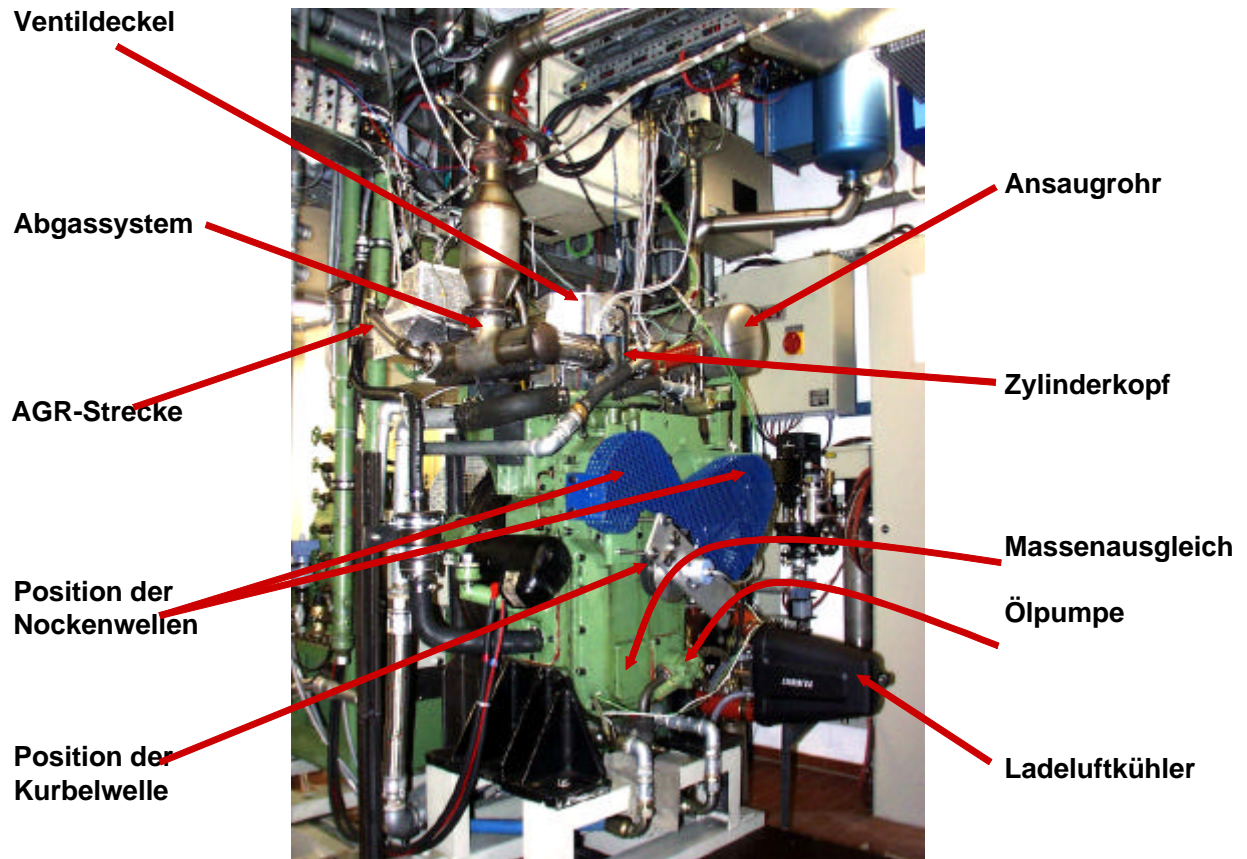


Abbildung 5: Ansicht EZ-Forschungsmotor

1.2 Arbeitspaket 2: Stationäre Verbrennungsabstimmung

1.2.1 Einzylinderuntersuchungen

Im Rahmen des Arbeitspaketes 2 war zunächst eine Verbrennungsabstimmung am Einzylindermotor zu ermitteln, die eine möglichst niedrige Partikelemission ermöglicht. Dabei war als Referenz ein bekannter Motor mit Pumpe-Düse-Einspritzsystem und einem Emissionsniveau von EURO 3 vorhanden.

Im Rahmen der Entwicklung war ein Brennverfahren zu finden, das niedrige Stickoxidemissionen bei sehr niedrigen Partikelemissionen darstellen kann. Dazu wurde zur Verminderung der Stickoxidemissionen insbesondere Abgasrückführung eingesetzt. Ziel hierbei ist, durch ein niedriges NO_x-Rohemissionsniveau das Verhältnis von NO-Speicher- zu Regenerationszeit positiv zu beeinflussen und einen möglichst breiten Kennfeldbereich zur innermotorischen Regeneration abzudecken. Dementsprechend war ein Hoch-AGR verträgliches Brennverfahren zu ermitteln, das nur geringe Sensitivität der Partikelemissionen bei stark angehobene AGR-Raten besitzt. Um dies zu erreichen wurde die in Abbildung 3 dargestellte Kolbenmulde vergleichsweise tief ausgeführt und zusammen mit einer Einspritzdüse mit angepasster, tiefer Strahlage eingesetzt. Die Versuche zeigten, dass ein Hochdrallverfahren bedingt durch die verbesserte Luftausnutzung eine bessere AGR Verträglichkeit ermöglicht.

Grundlage der Untersuchungen war der in Kapitel 1.2.2 beschriebene europäische Stationärtest ESC. In ausgewählten Betriebspunkten des ESC wurden AGR-Variationen durchgeführt. In Abbildung 6 sind Ergebnisse einer AGR-Variation im Niedriglast-Betriebspunkt A/25% dargestellt.

Hierbei wird deutlich, dass das Hochdrallverfahren - bei Einsatz einer rußoxidierenden Nacheinspritzung - das Potenzial besitzt, die im Vergleich zu den anderen Brennverfahrens-Ansätzen niedrigsten Partikelemissionen zu erzielen.

Dieses Verhalten zeigt sich auch in Hochlastpunkten, wie in Abbildung 7 am Beispiel des ESC-Punktes C/100% dargestellt ist. Hier ist insbesondere im Bereich niedrigster Stickoxidemissionen eine signifikante Verringerung der Rußemission und der Partikel gegenüber den auf ähnlichem Niveau befindlichen Verfahren mit Pumpe-Düse und Niedrigdrall-CR zu vermerken.

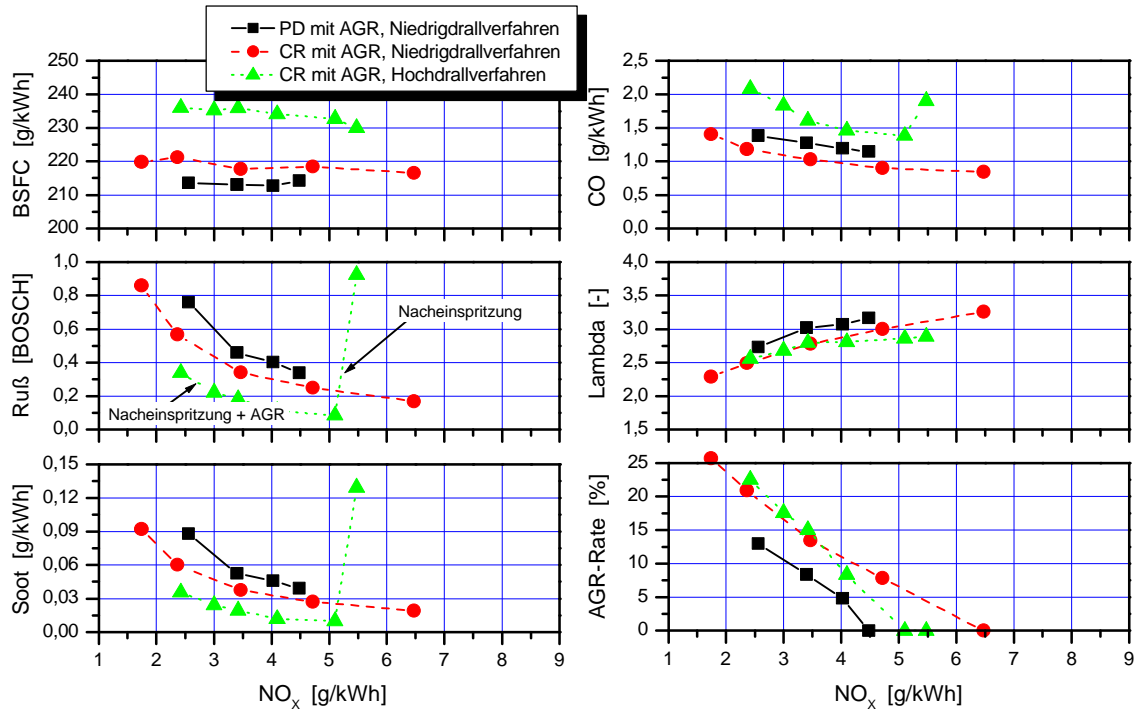


Abbildung 6: Versuchsergebnisse EZ-Forschungsmotor A/25%

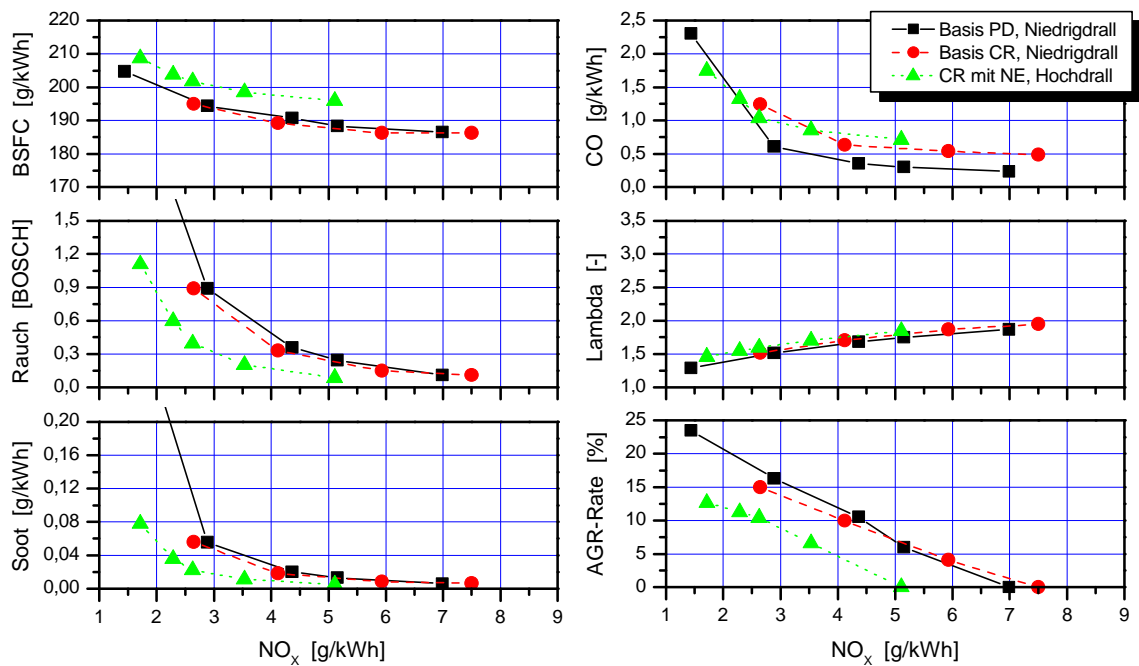


Abbildung 7: Versuchsergebnisse EZ-Forschungsmotor C/100%

Damit konnte ein Brennverfahren dargestellt werden, das im ESC ein gegenüber dem Referenzsystem signifikant verbessertes Emissionsverhalten zeigt. In Abbildung 8 ist das hochgerechnete Emissionsergebnis für einen Vollmotor auf Basis der ermittelten Einzylinder-Daten dargestellt. Hierbei zeigt sich deutlich, dass das gewählte Hochdrallverfahren mit CR-Einspritzung die Ziele im Hinblick auf eine geringe Partikelemission bei zugleich gutem NOx Trade-Off Verhalten erfüllte.

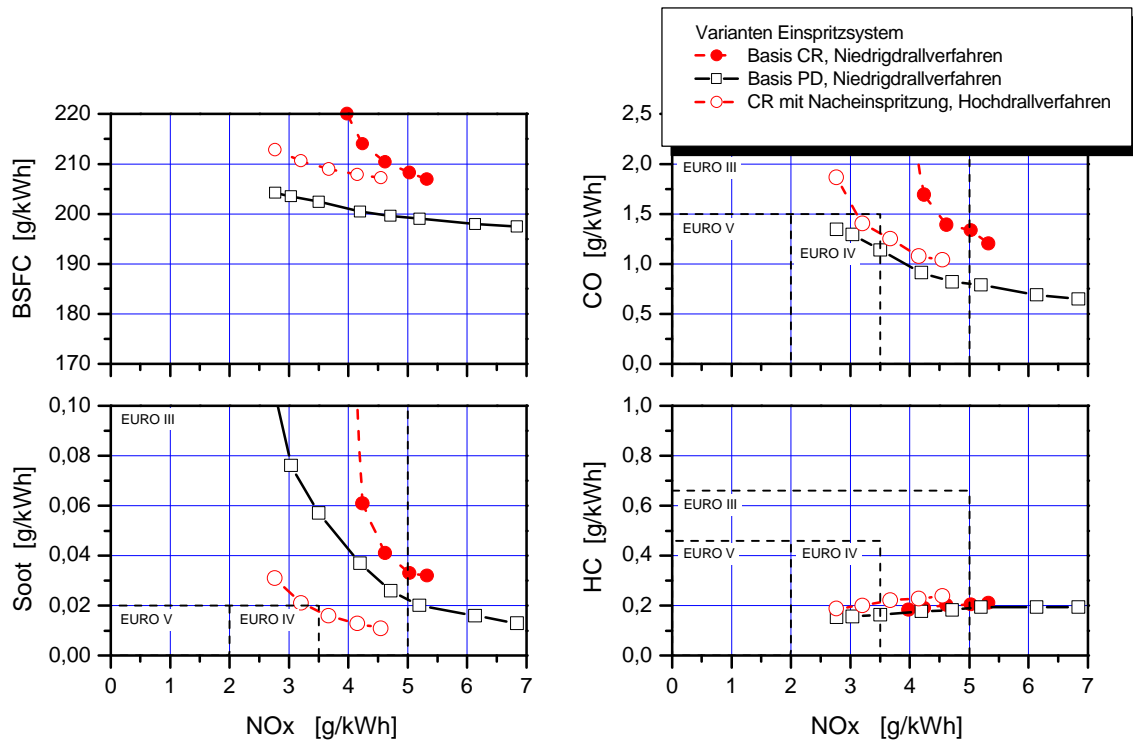


Abbildung 8: Versuchsergebnisse EZ-Forschungsmotor – Hochrechnung ESC

1.2.3: Emissionsvorschrift: ESC

Der ESC ist ein 13-stufiger europäischer Stationärtest, der mit der Einführung der EURO 3 Abgasemissionsgesetzgebung zur Zertifizierung von Nutzfahrzeugmotoren für den europäischen Markt zu verwenden ist.

Die Motordrehzahlen A, B und C werden wie folgt berechnet:

$$\text{Drehzahl A} = n_{l_0} + 25 \% (n_{h_i} - n_{l_0})$$

$$\text{Drehzahl B} = n_{l_0} + 50 \% (n_{h_i} - n_{l_0})$$

$$\text{Drehzahl C} = n_{l_0} + 75 \% (n_{h_i} - n_{l_0})$$

Darin bedeuten n_{l_0} die niedrigste Motordrehzahl, bei der sich 50 % und n_{h_i} die höchste Motordrehzahl, bei der sich 70 % der angegebenen Höchstleistung einstellen. Abbildung 9 zeigt die Testpunkte des ESC.

Der Motor wird Vorschriften-konform vor Testbeginn im Nennleistungspunkt warmgefahren, danach wird der Testzyklus gestartet, in dem automatisiert die 13 Stufen angefahren werden. Während der gesamten Zykluszeit werden die gasförmigen Emissionen kontinuierlich gemessen. Am Ende jeder Stufe werden die letzten 30 Sekunden des jeweiligen Emissionsverlaufs gemittelt. Diese gemittelten Stufenwerte gehen gemäß der entsprechenden Wichtungsfaktoren in die Bestimmung des Endergebnisses ein. Zur Partikelbestimmung wird für den gesamten Test nur ein Filterpaar verwendet. Die Ziehzeit der einzelnen Filter bestimmt sich in den einzelnen Stufen aus deren jeweiligem Wichtungsfaktor.

Im Rahmen der ersten Kalibrierarbeiten des Fettbetriebes erfolgte eine Messung der einzelnen ESC-Betriebspunkte als Einzelmessungen, um eine entsprechende Magerreferenz und eine Aussage über zu erwartende Emissionen im ESC zu erhalten.

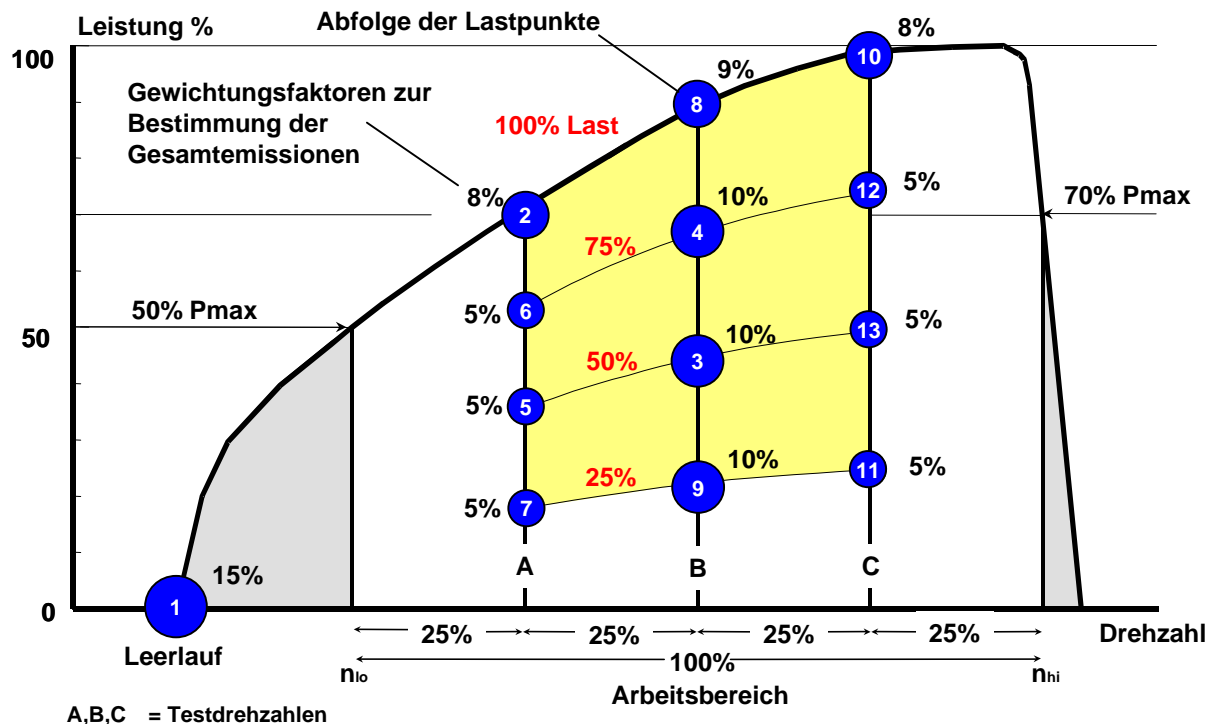


Abbildung 9: Bestimmung testrelevanter Drehzahlen ESC

Aus diesen Vorschriften ergeben sich die Testdrehzahlen (A/B/C) des Vollmotors zu 1480/1845/2210 1/min

1.2.3: Versuche am Vollmotor

Als Forschungs-Vollmotor kam ein Forschungsmotor-Prototyp auf Basis der Deutz Baureihe 2013 der Firma Deutz mit den in Tabelle 2 gezeigten technischen Daten zum Einsatz. Der Motor wurde im Rahmen eines Leihvertrages genutzt, in dem eine Änderung der Verbrennungsausrüstung nicht gestattet war. Daher wurde die Kolbenmuldengeometrie unverändert mit den entsprechend angepassten Injektoren verwendet.

Das Brennverfahren des Motors war dem im Rahmen der Einzylinder-Untersuchungen als Bestvariante ermittelten Brennverfahren ähnlich. Insbesondere das Konzept eines Hochdrallverfahrens mit guter Hoch-AGR Verträglichkeit unterstützt durch einen Abgasturbolader mit variabler Turbinengeometrie (VTG) führte zu einer guten Vergleichbarkeit der Ergebnisse.

Die wesentlichen Ausrüstungsteile sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 2: Technische Daten Vollmotor:

Zylinder / Anordnung	6 / Reihe
Bohrung	98 mm
Hub	126 mm
Hubraum	5,7 l
Leerlaufdrehzahl	750 1/min
Nenn Drehzahl	2500 1/min
Max. Drehmoment	940 Nm
Nennleistung	190 kW
Zulässiger Spitzendruck	180 bar

Tabelle 3: Ausrüstungsstand Vollmotor:

Aufladung:	VTG Lader mit pneumatischem Aktuator
	Ladeluftkühlung
Abgasrückführung:	Einflutige gekühlte AGR
Einspritzsystem	Common Rail, max 1400bar Einspritzdruck

Motorinstallation Stationärprüfstand

Der Vollmotor wurde zunächst auf einem konventionellen Stationärprüfstand aufgebaut und vermessen. Abbildung 10 zeigt den prinzipiellen Prüfsandaufbau und das System zur Messung der gasförmigen Emissionen, welches zur Überprüfung der Abgaswerte eingesetzt wurde. Die NO_x-Emissionen werden mit einem Chemolumineszenz-Analysator ermittelt; ein NDIR-Analysator erfasst die CO- und CO₂-Emissionen. Die HC-Emissionen werden mit einem Flammenionisations-Detektor gemessen.

Zur Vermeidung des Auskondensierens leicht flüchtiger Kohlenwasserstoffe wird das Abgas dem HC-Gerät über eine auf rund 190°C beheizte Zuleitung zugeführt (Messung des „feuchten“ Abgases). Die Komponenten NO und NO₂ werden ebenfalls über eine beheizte Leitung entnommen, die zudem passiviert ist, um eine Reduktion von NO₂ zu vermeiden.

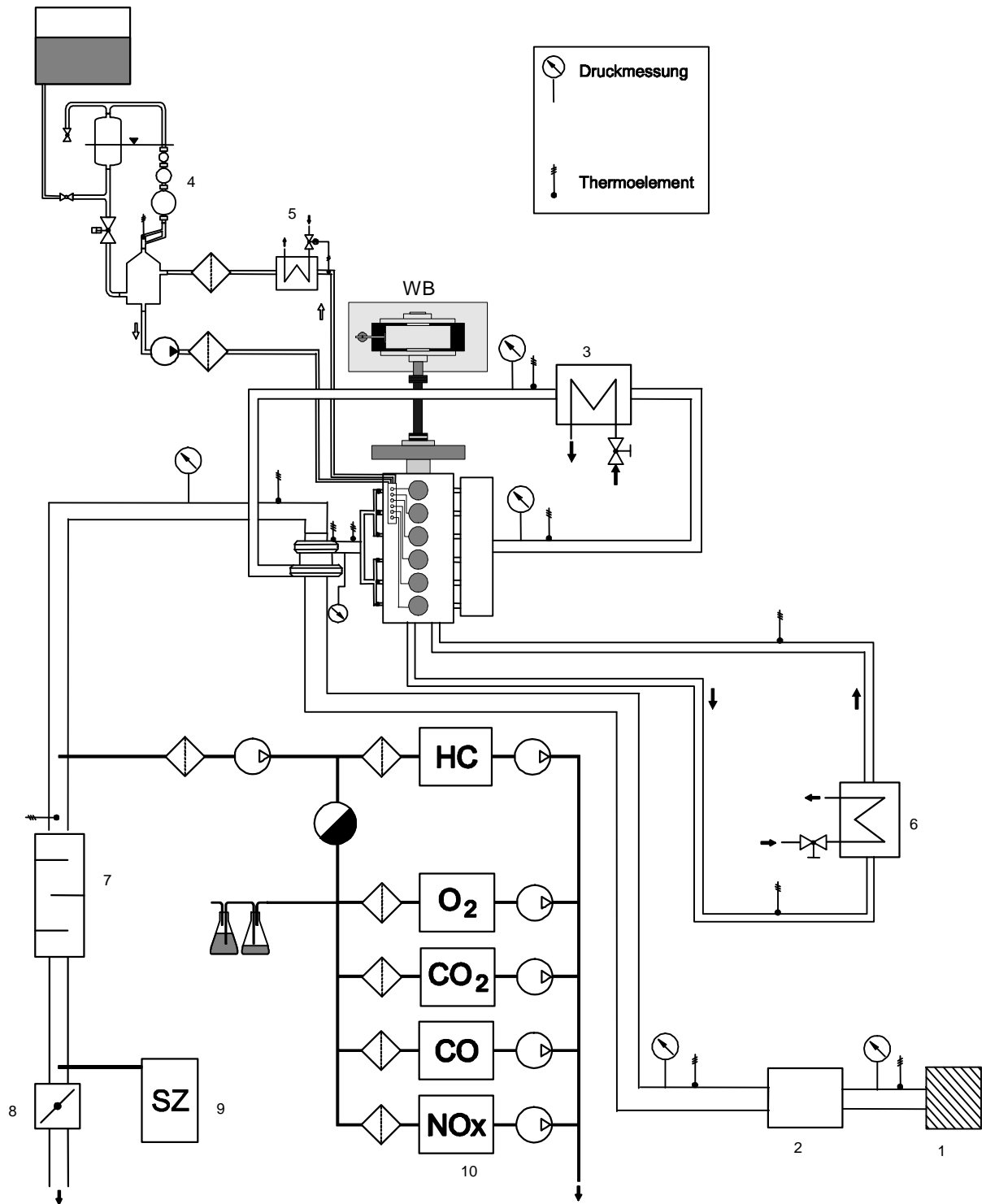


Abbildung 10: Motorinstallation mit Abgasmesstechnik

Der besonders Ausfall-anfällige ursprünglich eingesetzte Abgasturbolader der Firma Garrett wurde im Laufe des Vorhabens durch einen Abgasturbolader der Firma 3K ersetzt, der eine veränderte Ladedruckcharakteristik aufwies. Die resultierenden Abgasemissionswerte im ESC zeigt Abbildung 11. Das veränderte Verhalten der beiden Abgasturbolader bezüglich der Aufladung und damit des Luftverhältnisses ist in Abbildung 12 dargestellt. Hierbei ist zu sehen, dass bedingt durch einen verringerten Aufladegrad das Luftverhältnis mit der 3K Aufladung abnimmt. Die dadurch bedingte Verschiebung im NO_x-PM trade-off hin zu geringeren Stickoxidemissionen kann im Testergebnis nachvollzogen werden.

Durch den deutlich erhöhten Ölverbrauch des Garrett ATL's zeigten sich erhöhte CO und HC-Emissionen, welche mit Einsatz der 3K Aufladung nicht mehr auftraten, sondern auf üblichem Niveau eines modernen NFZ-Motors liegen. Damit nahmen auch die flüchtigen Partikelanteile ab, so dass der Wechsel des Abgasturboladers partikelneutral verlief.

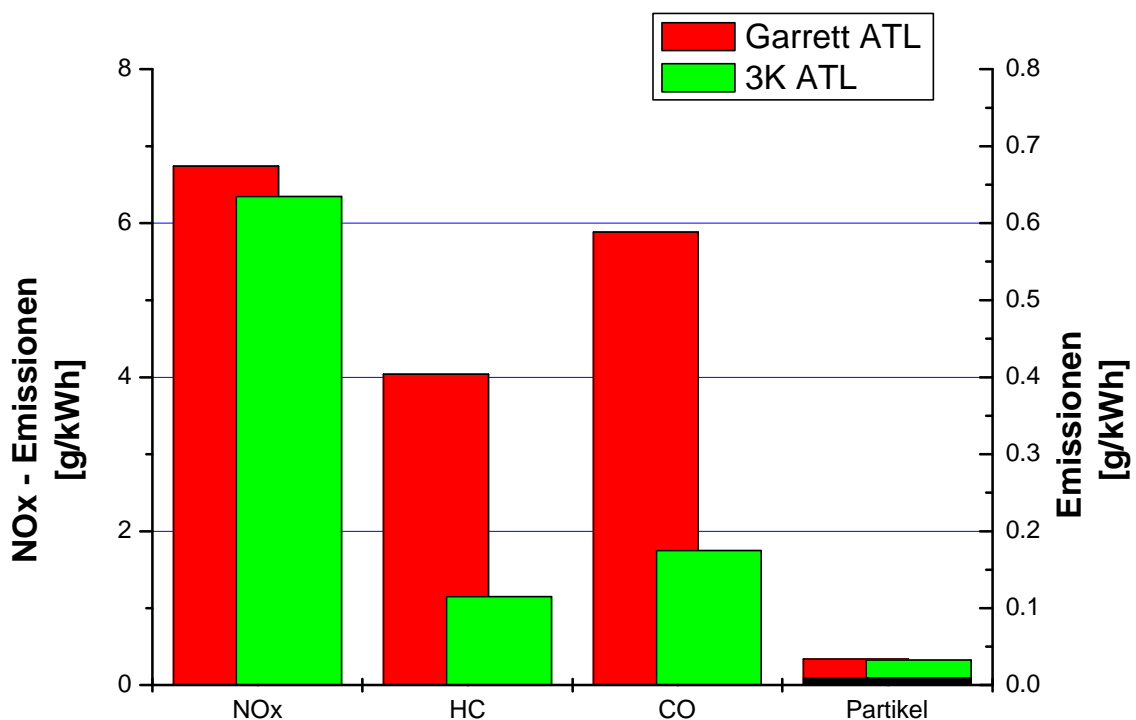


Abbildung 11: Testergebnis im ESC mit Garrett und 3K Abgasturbolader

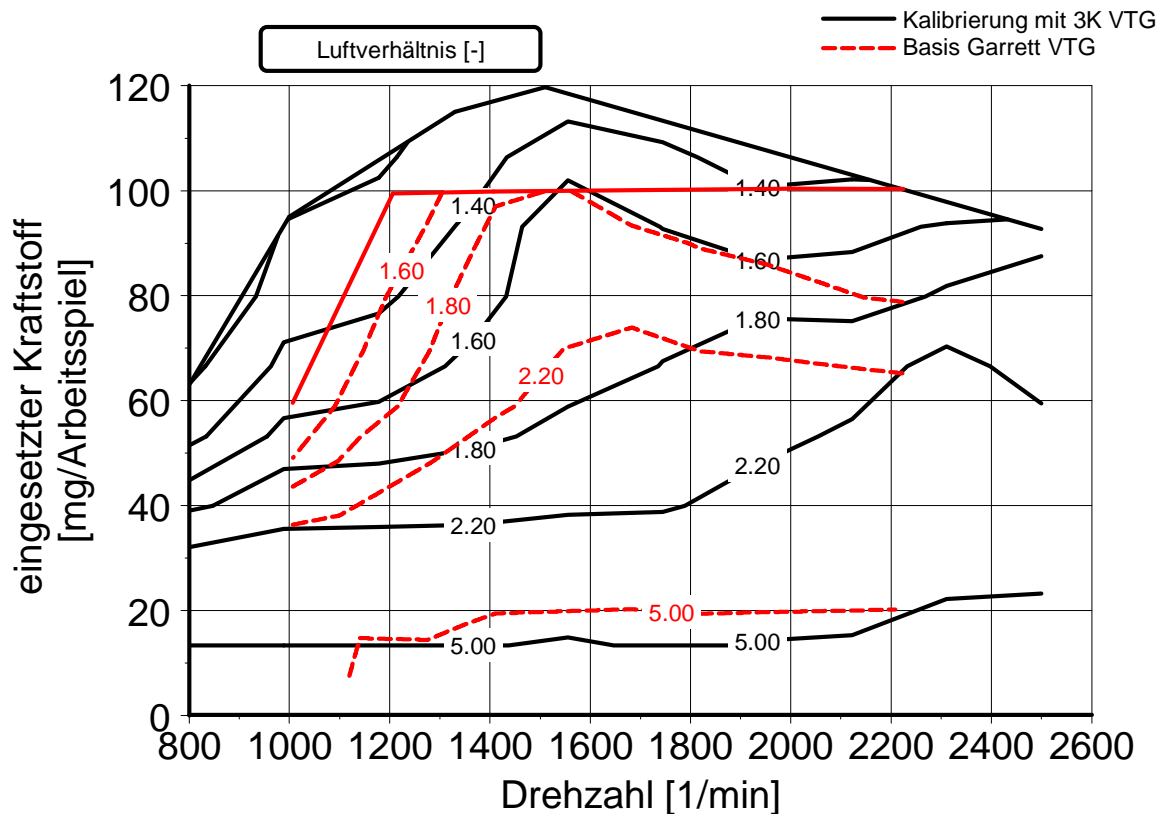
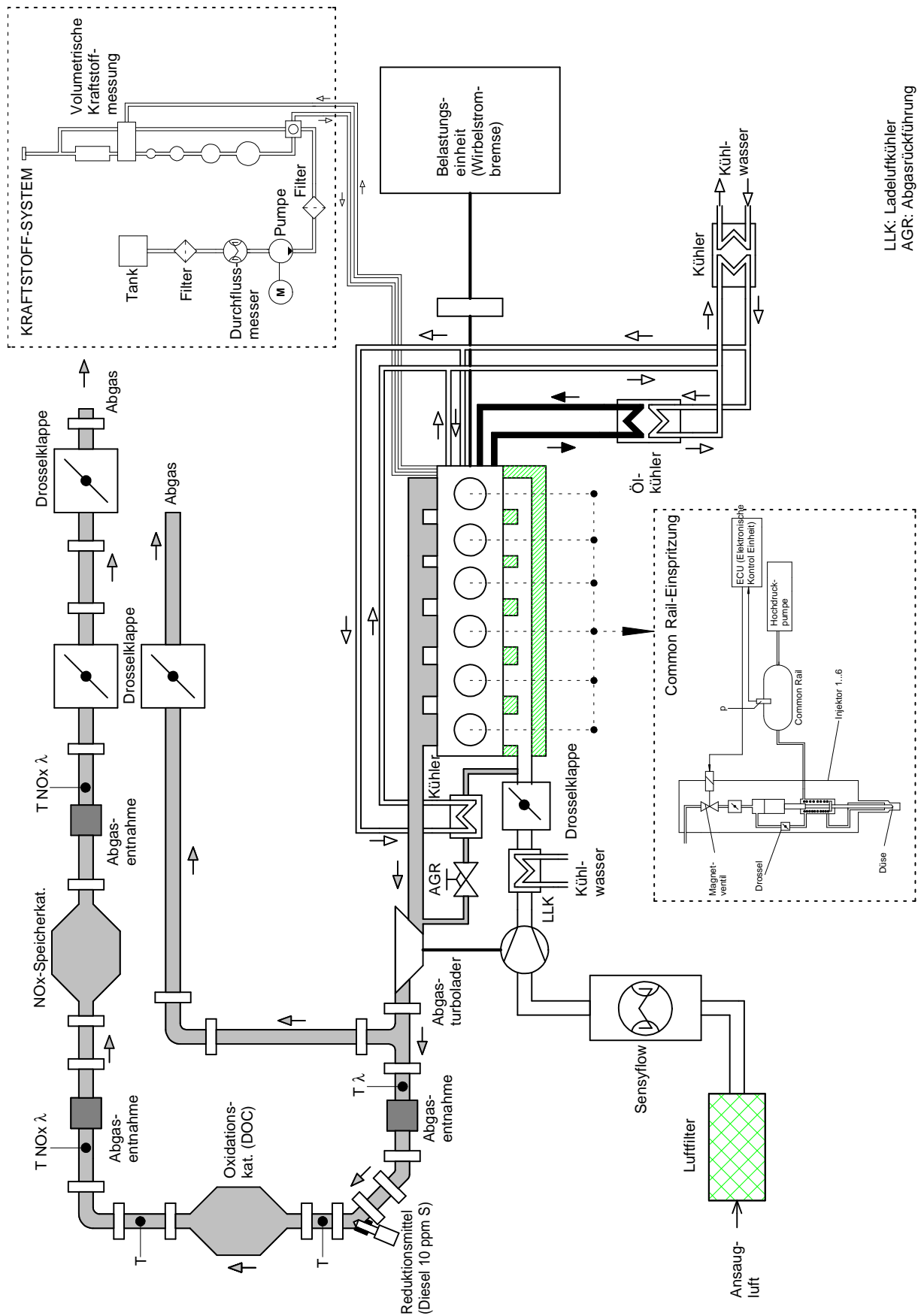


Abbildung 12: Luftverhältnis mit Garrett und 3K Abgasturbolader

Damit konnte unter den zuvor genannten Einschränkungen der Verbrennungssystem-Hardware des Vollmotors der Übertrag der am Einzylinder ermittelten Basiskonfiguration auf den Vollmotor erreicht werden.

Im Rahmen der Kalibrierung des stöchiometrischen Betriebes war ein direkter Übertrag der am Einzylinder eingestellten Ladedruck- und AGR- Raten nicht im gesamten Betriebsbereich möglich. Hierbei wirkte einerseits die sinkende AGR-Rate bei Reduktion des Ladedruckes durch Öffnen der VTG aufgrund des fehlenden Spülgefälles begrenzend, andererseits stieg die Laderdrehzahl und damit der Ladedruck bei unveränderter VTG im Fettbetrieb infolge der durch den Temperaturanstieg im stöchiometrischen Betrieb bedingten erhöhten Abgasenthalpie. Daher kam zur Kalibrierung des Fettbetriebes am Vollmotor zusätzlich eine Drosselklappe vor dem Saugrohr zum Einsatz. Den vollständigen Aufbau zeigt Abbildung 13.



LLK: Ladeluftkühler
AGR: Abgasrückführung

Abbildung 13: Aufbau von Ansaug- und Abgasstrecke des Motors am Prüfstand zur Kalibrierung von Mager- und Fettbetrieb

Zur Fettkalibrierung bestehen grundsätzlich die in Abbildung 14 gezeigten Möglichkeiten: innermotorische (Variante B) und nachmotorische (Variante A) Anfettung. Wesentliche Unterschiede der beiden Varianten sind die kaum geänderte Kalibrierung des Dieselmotors bei einer externen Einspritzung wie in A beschrieben und der sehr hohe Aufwand zur innermotorischen Anfettung bei Variante B. Verbunden mit der innermotorischen Anfettung ist dabei insbesondere die Rußproblematik bei der Darstellung eines understöchiometrischen Betriebs und die aus den Einzylinderuntersuchungen bekannten sehr hohen Temperaturen vor Turbine.

Dahingegen muss bei Variante A die notwendige Umsetzung und Aufbereitung des für die Reduktion notwendigen Kraftstoffes in der Abgasanlage – und hierbei insbesondere im ersten Katalysator – erfolgen. Dabei erfolgt die exotherme Freisetzung der chemischen Energie des extern eingespritzten Kraftstoffes ohne die im innermotorischen Prozess auftretende Wärmeabfuhr über die Kühlmedien Öl und Wasser. Dadurch treten sehr hohe Temperaturgradienten und ebenfalls sehr hohe lokale Spitzentemperaturen in der Abgasanlage bzw. im Katalysator auf. Weiterhin ist zur Aufbereitung des Kraftstoffes als Reduktionsmittel in Form von CO der light-off des Katalysators entscheidend, so dass im unteren Kennfeldbereich die außermotorische Anfettung nicht ohne zusätzliche Maßnahmen zur Erreichung des light-offs darstellbar ist.

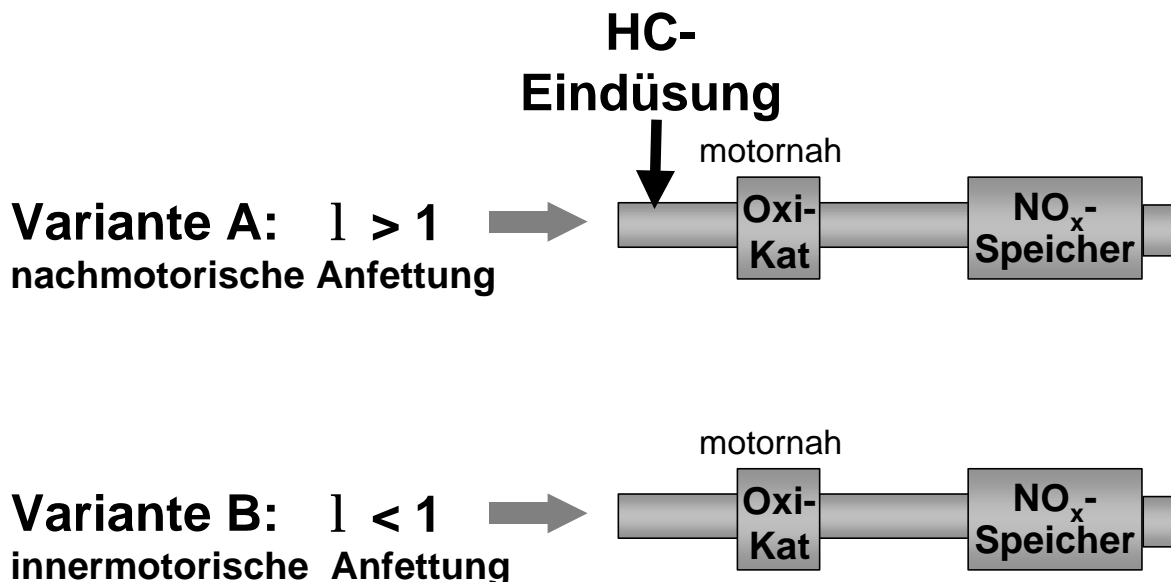


Abbildung 14: Möglichkeiten des Fettbetriebs

Zunächst ist hier die Kalibrierung des innermotorischen Fettbetriebes dargestellt. Es bestehen die in Abbildung 15 dargestellten grundsätzlichen Möglichkeiten einer Androsselung oder einer reinen Kraftstoffmassenstromerhöhung zur Anfettung. Dabei muss ausgehend von einem Magerbetriebspunkt ein Kraftstoffverbrauchsnachteil in Kauf

genommen werden, der mit zunehmendem Luftmassenstrom und damit Kraftstoffeinsatz steigt.

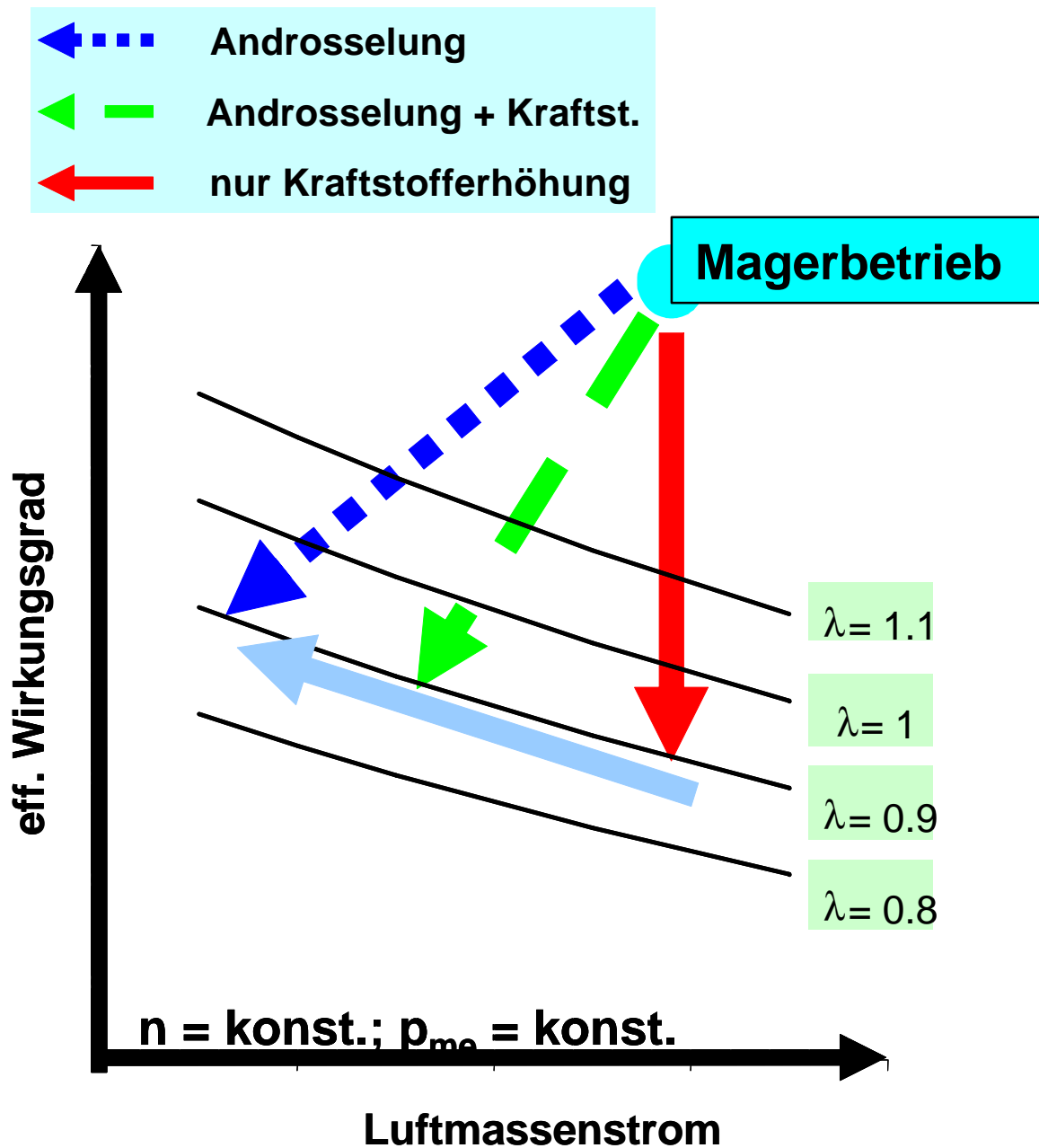


Abbildung 15: Wege zum Fettbetrieb

In Abbildung 16 sind die möglichen Einflussparameter auf den Kraftstoff- und Luftpfad, die damit das Luftverhältnis im Motor beeinflussen, dargestellt. Hierbei ist grundsätzlich zwischen den Effekten einer Einflussnahme auf den Kraftstoff- bzw. Luftpfad zu unterscheiden; die Erhöhung des eingesetzten Kraftstoffes erfolgt durch Einsatz einer Niedrigtemperaturverbrennung (LTC) bzw. einer späten Nacheinspritzung, wodurch nur geringe Effekte im Rußverhalten des Motors zu beobachten sind. Dagegen resultiert aus

einer Reduktion der eingesetzten Luftmasse eine deutliche Änderung des Brennverfahrens mit einer heißeren Verbrennung und hohem Rußbildungspotenzial.

Daneben ist die maximal mögliche Dynamik der Änderung von Luft- und Kraftstoffeinsatz deutlich unterschiedlich, da es sich bei allen Einflussparameter auf den Luftpfad um träge Systeme handelt, während die eingebrachten Kraftstoffanteile von Zyklus zu Zyklus direkt geändert werden können.

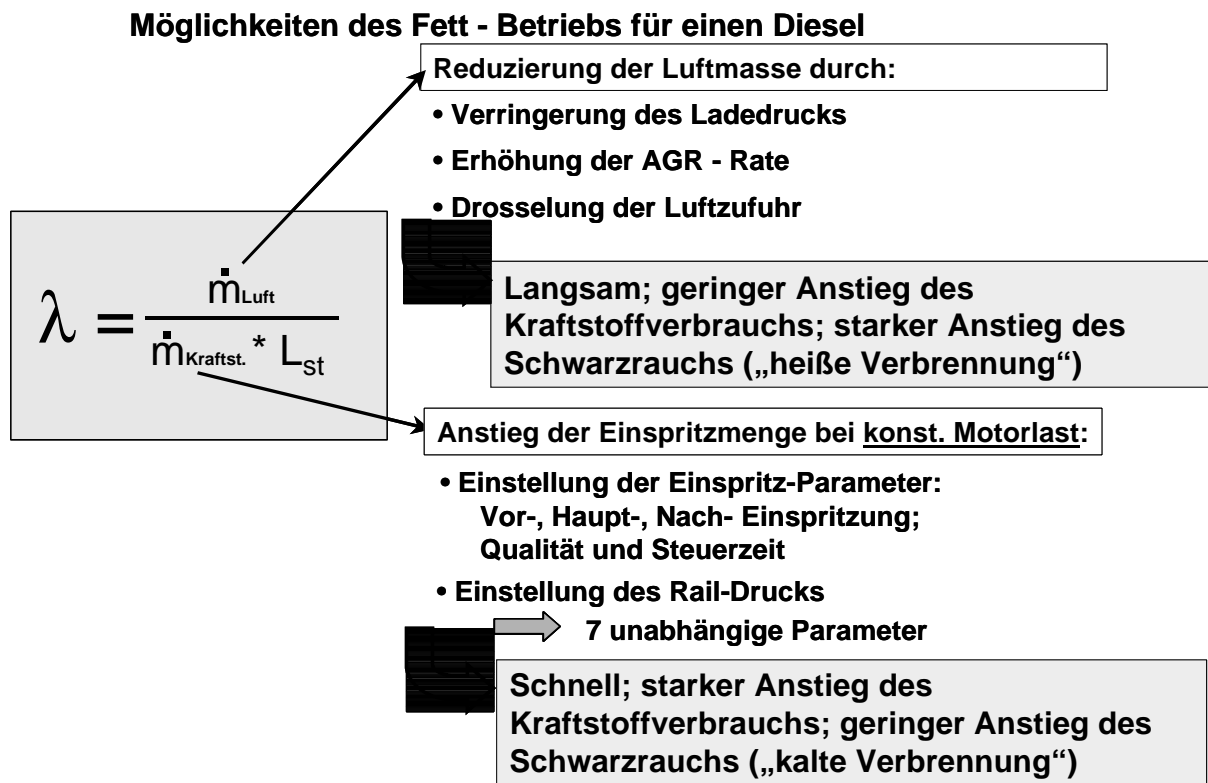


Abbildung 16: Möglichkeiten des innermotorischen Fettbetriebs beim CR-Dieselmotor

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden sowohl luft- als auch kraftstoffseitige Maßnahmen eingesetzt, um einerseits den Kraftstoffverbrauchsnechtel so gering wie möglich zu halten, andererseits auch keinen übermäßigen Partikelemissionsanstieg zu erhalten. Für die erste unterstöchiometrische Kalibrierung wurde ein Zielwert von $\lambda = 0.95$ gewählt. Mit diesem Wert wurde für ausgesuchte Kraftstoffmassen bzw. Luftmassen eine Variation der Parameter Einspritzbeginn Haupteinspritzung, Abstand Haupt- Nacheinspritzung, Mengenverhältnis Haupt/ Nacheinspritzung und AGR-Rate durchgeführt.

Dabei waren die nachfolgend aufgeführten, aus der Literatur bekannten, Kriterien zu beachten, welche in Motor- und Katalysatorkriterien unterschieden werden können:

Motor Kriterien:

- Konstante Drehzahl und Drehmoment
- Angemessener Schwarzauch (d.h. unter der Sichtbarkeitsgrenze)
- Möglichst geringer Kraftstoffverbrauchsachteil
- Geringe Temperaturbelastung der Motorkomponenten (Temperatur vor Turbine max. 800°C als Spitzentemperatur)
- Vermeidung von Ölverunreinigungen (Kraftstoff- und Russeintrag in das Motoröl bedingt durch späte Einspritzung)

Katalysatorkriterien:

- Abgaszusammensetzung, geringes HC/CO-Verhältnis
- Abgastemperatur vor Adsorber bis zu 500 °C
- Abgasmassenstrom so gering wie möglich, da dadurch die Raumgeschwindigkeit verringert wird und die erhöhte Verweilzeit zu einer höheren Katalysatoraktivität führt

Eines der wichtigsten Kriterien ist dabei der Mehrverbrauch, insbesondere im Hinblick auf den Einsatz als NFZ-Motor. Um den Kraftstoffverbrauchsachteil so gering wie möglich zu halten gibt es dabei die folgenden Möglichkeiten:

- Luftmassenstrom (O_2) so gering wie möglich
- Luft/Kraftstoff-Verhältnis so gering wie möglich
- Dauer des unterstöchiometrischen Betriebs so kurz wie möglich

1.2.3: ASCET-Modell

Um die genannten Bedingungen zu erfüllen und den unterstöchiometrischen Betriebe zu regeln wurde eine ASCET Hardware eingesetzt. Diese Hardware ermöglicht mittels eines ECU-Bypasses den vollständigen Zugriff auf die in der ECU vorhandenen Werte. Daneben können bypassbare Größen in Echtzeit berechnet und verwendet werden. Einen Überblick über den Aufbau gibt Abbildung 17. Damit ist eine vollständige Funktionsentwicklung möglich. Wesentliche übergebene Werte im Rahmen der Softwareentwicklung sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Übergabewerte ASCET:

Eingabewerte:	Ausgabewerte
Alpha-Steller	Einspritzmengen (Vor-, Haupt-, - Nach-)
Drehzahl	Einspritzbeginne (Vor-, Haupt-, Nach-),
Soll-Einspritzmenge Magerbetrieb	Soll-Raildruck
Soll-Ladedruck Magerbetrieb	AGR-Ansteuersignal (PWM)
Soll-AGR Magerbetrieb	VTG Ansteuersignal (PWM)
Ist-Ladedruck	
Ist-Luftmasse	

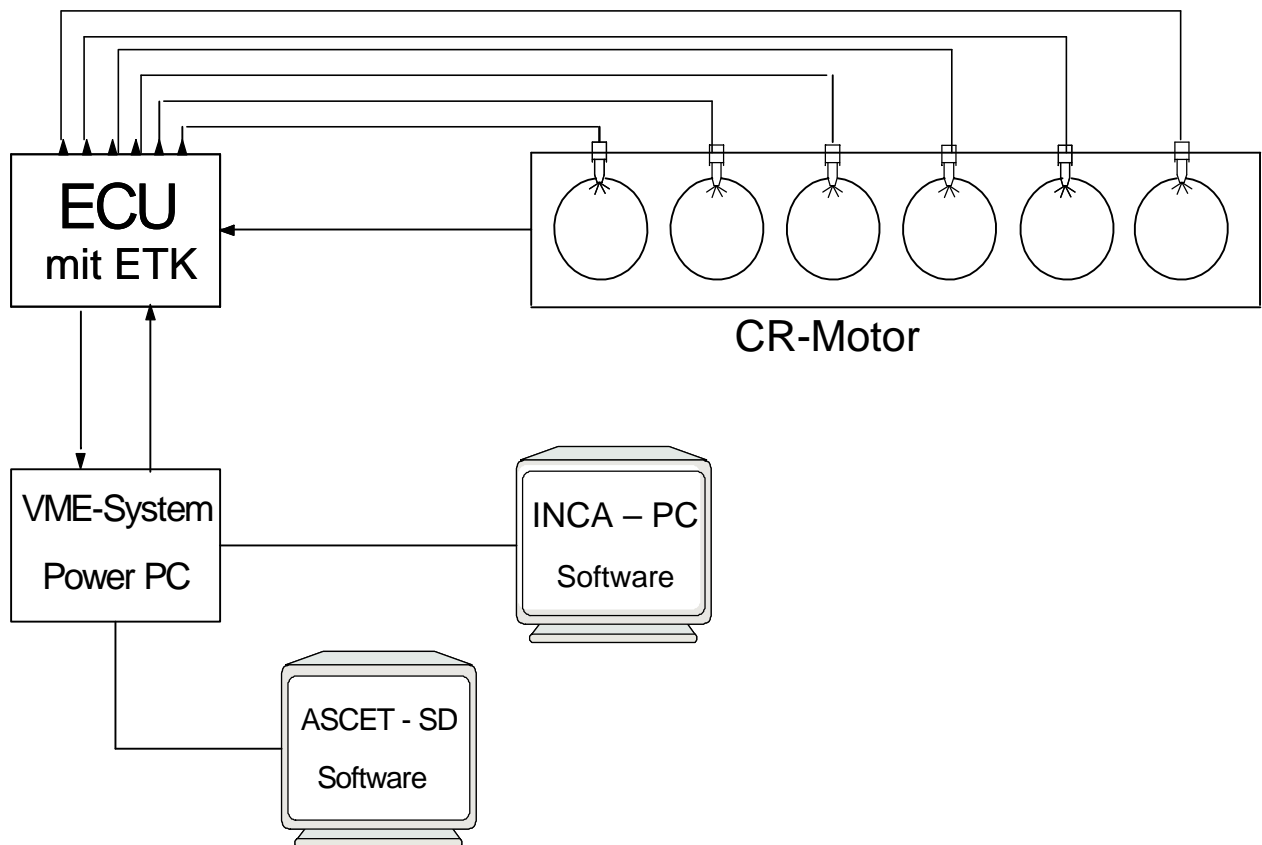


Abbildung 17: Steuerungsaufbau mit ASCET Hardware

In Tabelle 5 sind die wichtigsten Funktionsgruppen und die verwendeten Regelungen und Steuerungen für den unterstöchiometrischen Betrieb dargestellt. Dabei ist zu sehen, dass die Übergänge des Luftpfades über zeitlich gesteuerte Rampen realisiert werden. Die

Einspritzmenge wird ebenfalls über eine Rampe an den Zielwert im Fettbetrieb angeglichen.
Die Umschaltung der Einspritzbeginne erfolgt dagegen schlagartig.

Tabelle 5: Regelungsfunktionen ECU/ASCET:

	Magerbetrieb	Fettbetrieb	Übergänge
AGR	Aus, Steuerung ASCET	EIN, Steuerung ASCET	Rampe (Zeit)
VTG	Regelung MLUFT ASCET	Regelung MLUFT ASCET	Rampe (Zeit)
Drosselklappe	Offen, ASCET	Regelung Lambda, ASCET	Rampe (Zeit)
Einspritzbeginn	Kennfelder ASCET	Kennfelder ASCET	Umschalten
Einspritzmenge	Vorgabe Ascet, Korrektur EDC	Vorgabe Ascet, Korrektur EDC	Rampe (Zeit)
Einspritzdauer	Aus Mengen + Raildruck in EDC berechnet	Aus Mengen + Raildruck in EDC berechnet	

Mit den gezeigten Funktionen wurde die Kalibrierung des unterstöchiometrischen Motorbetriebes durchgeführt. Zunächst wurden die Luftmasse/Arbeitsspiel (mg/ASP) und eine Drehzahl fest eingestellt. Davon ausgehend wurden Parametervariationen von AGR, Beginn Haupteinspritzung, Abstand Haupt- zu Nacheinspritzung und Mengenvariationen Haut- zu Nacheinspritzmenge durchgeführt.

Das Vorgehen zur Bestimmung der optimalen Betriebsparameter unter Berücksichtigung der Ziele des Fettbetriebes ist im folgenden dargestellt.

Abbildung 18 zeigt die sich ergebenden Mitteldrücke in Abhängigkeit der gewählten Einspritz-, Auflade-, Drossel- und AGR-Parameter. Hierbei ist ein möglichst hoher Mitteldruck entsprechend einem hohen Wirkungsgrad bezüglich eines minimierten Kraftstoffmehrverbrauches anzustreben. Die ermittelten Betriebspunkte müssen als Grundvoraussetzung im Stabilitätsverhalten hinsichtlich Zyklus-Zyklus Verhalten (Sigma-pmi) und Sensitivität gegenüber geringen Parameterabweichungen (insbesondere der

Abgasrückführrate) stabil sein, bzw. einen flachen Gradienten des motorischen Verhaltens hinsichtlich aller wichtigen Kenngrößen aufweisen.

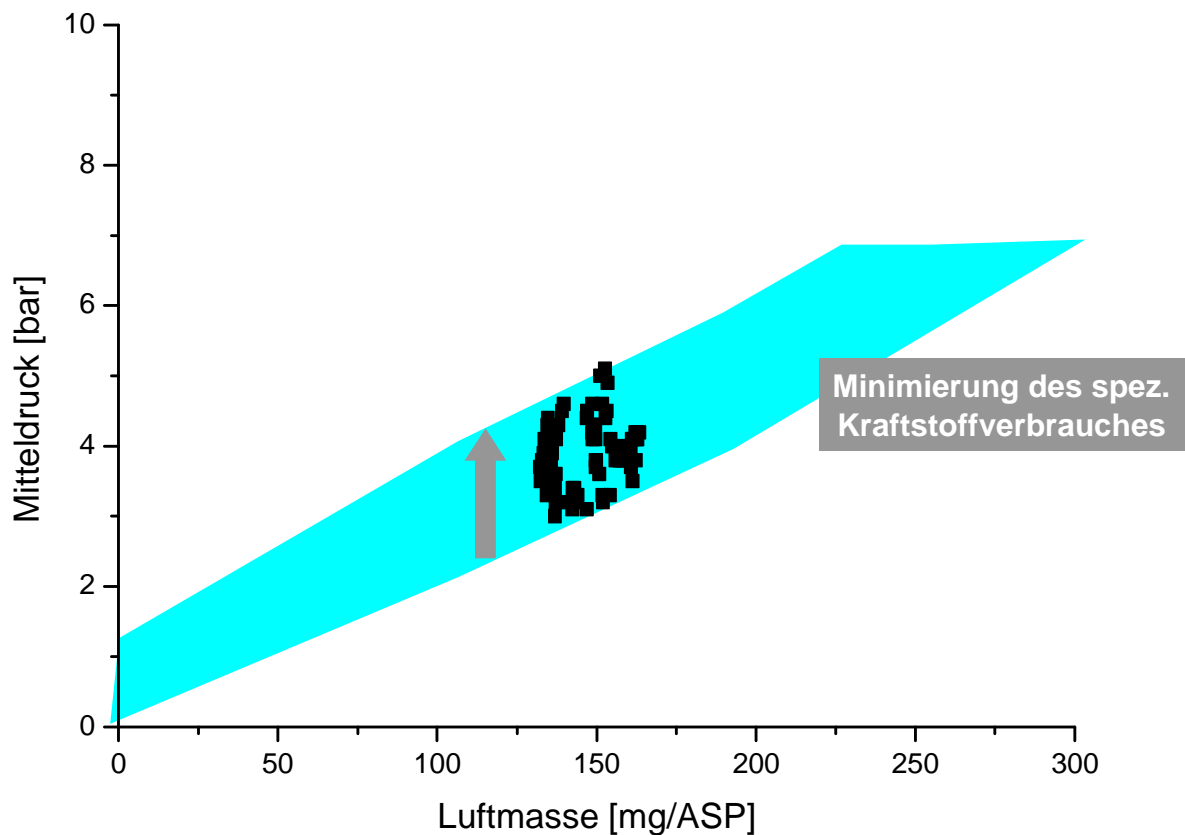


Abbildung 18: Mitteldruck bei Parametervariation, Fetbetrieb, $\lambda = 0.95$

Als weiterer Parameter ist ein hohes CO/HC Verhältnis anzustreben, wie in Abbildung 19 dargestellt. Zusätzlich mussten möglichst geringe Russzahlen, die keinesfalls die Sichtbarkeitsgrenze (Russzahl 3) überschreiten dürfen, erreicht werden, (Abbildung 20). Insgesamt ergeben sich für die variierten Parameter (AGR, Einspritzbeginn, Mengenverhältnisse) die in Abbildung 21 dargestellten Einflüsse auf den Mitteldruck p_{me} , die Schwärzung, CO-Emissionen und HC-Emissionen.

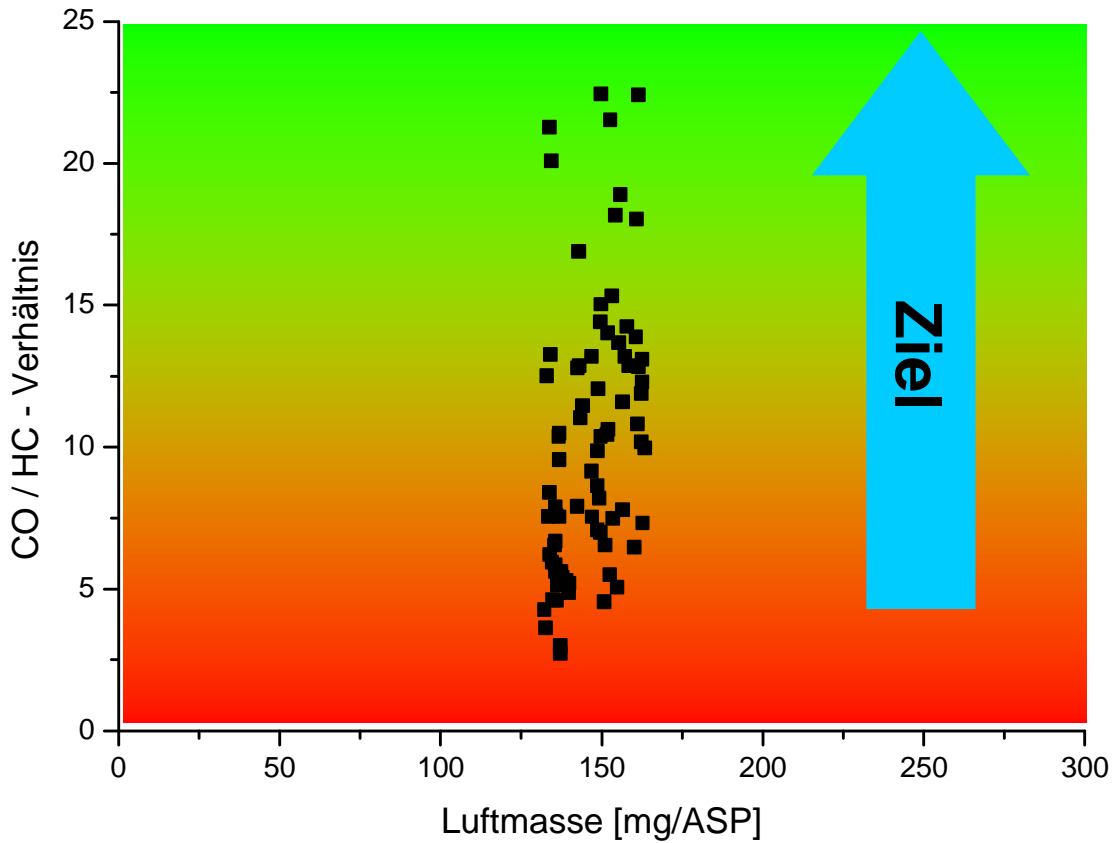


Abbildung 19: CO/HC Verhältnis bei Fettbetrieb $\lambda = 0.95$, Luftmasse 150 mg/ASP

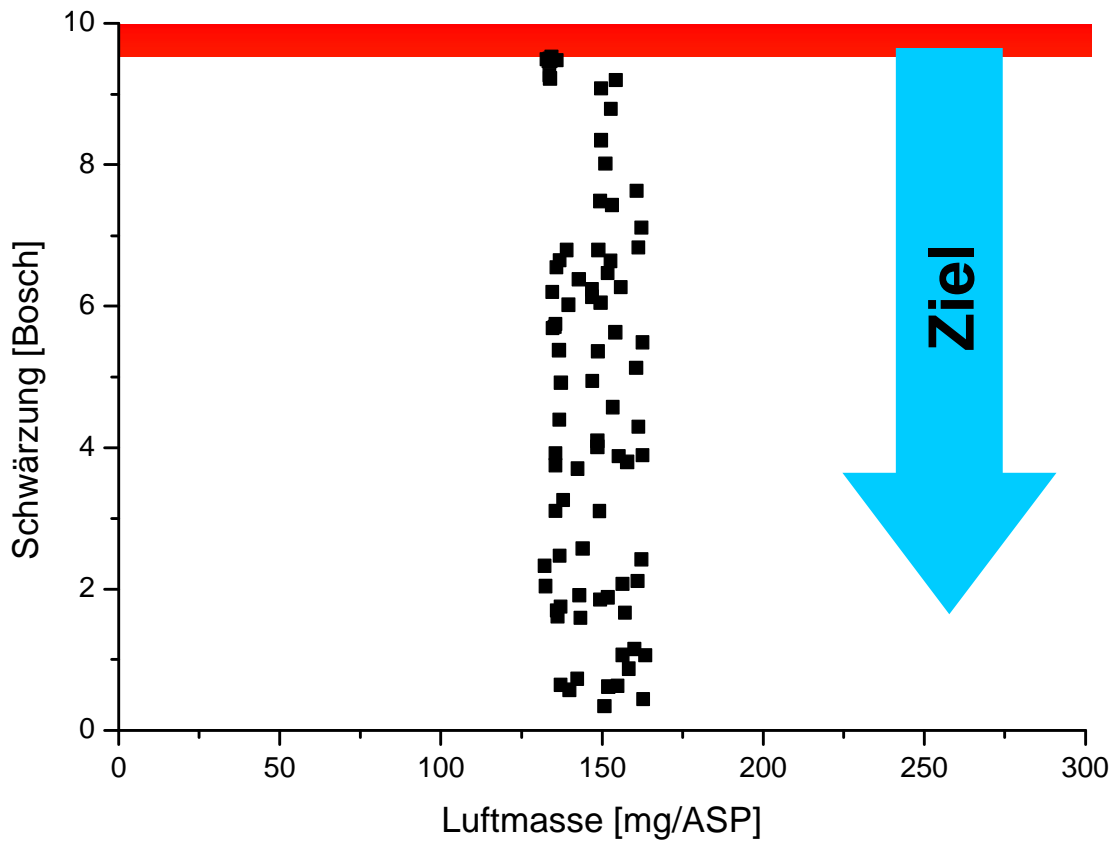


Abbildung 20: Schwärzung bei Fettbetrieb $\lambda = 0.95$, Luftmasse 150 mg/ASP

Vorraussetzung: $\lambda = \text{konst}$ (durch NE)

Parameter-Änderung	Wirkungsgrad	Schwarzrauch	Gasf. Emissionen
Erhöhung Luftmassenstrom	↓	↓	CO ↑ HC ↔
Haupteinspritzung (nach Früh)	↑	↑	CO — HC ↓
Vergrößerung Abstand HE/NE	↓	—	CO ↓ HC ↑
Erhöhung Menge HE/NE	↑	↑	CO ↓ HC ↓
Androsselung	↓	↑	CO — HC —
Erhöhung der AGR-Rate	(—)	Ausnahme: LTC ↑	CO HC —

Abbildung 21: Parametereinflüsse im Fettbetrieb

Damit ergibt sich für jeden Betriebspunkt die in Abbildung 22 beispielhaft dargestellte Beziehung zwischen Wirkungsgrad, CO/HC-Verhältnis und Schwärzung, aus denen jeweils ein möglichst günstiger Punkt mit den dazugehörigen motorischen Parametern für Luft- und Kraftstoffpfad auszuwählen ist.

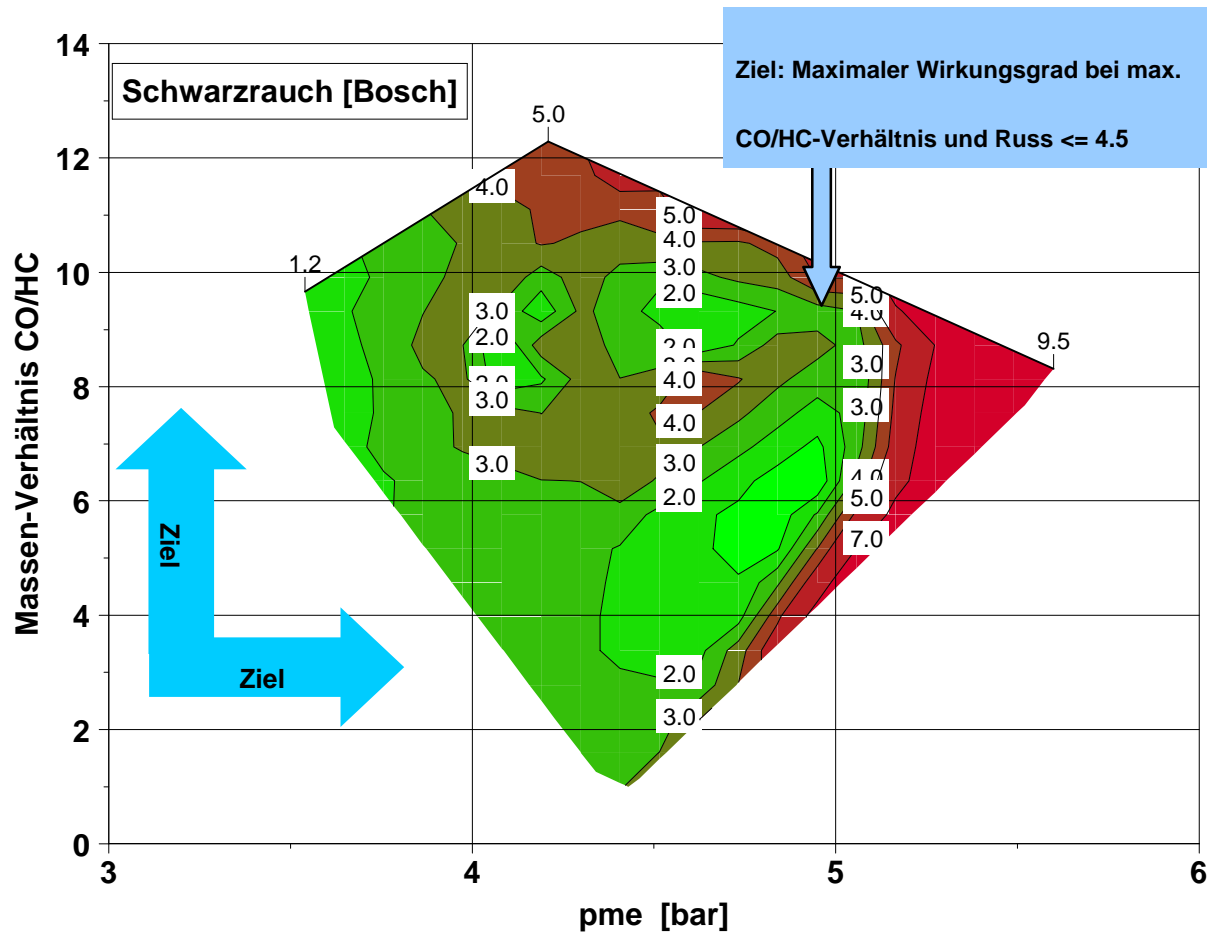


Abbildung 22: Fettbetrieb $\lambda = 0.95$, Luft 150 mg/ASP

Ausgehend von Betriebspunkten bei den ESC-Drehzahlen wurde auf Basis dieser Kalibrierstrategie das Kennfeld des Vollmotors kalibriert, was die in Abbildung 23 bis Abbildung 31 gezeigten Betriebswerte ergibt. Bei den ESC Drehzahlen wurden dazu jeweils zwei Lastpunkte, beginnend mit Lasten von 4-5 bar Mitteldruck, untersucht. Das Kennfeld wurde anschliessend zu höheren Lasten erweitert, wobei insbesondere die hohe Temperatur vor Abgasturbolader (Abbildung 26) begrenzend für den Bereich der innermotorischen Fettkalibrierung war. Unter Einhaltung der zugelassenen Maximaltemperatur von 800°C ergab sich somit der dargestellte maximale Bereich des innermotorisch understöchiometrischen Betriebes.

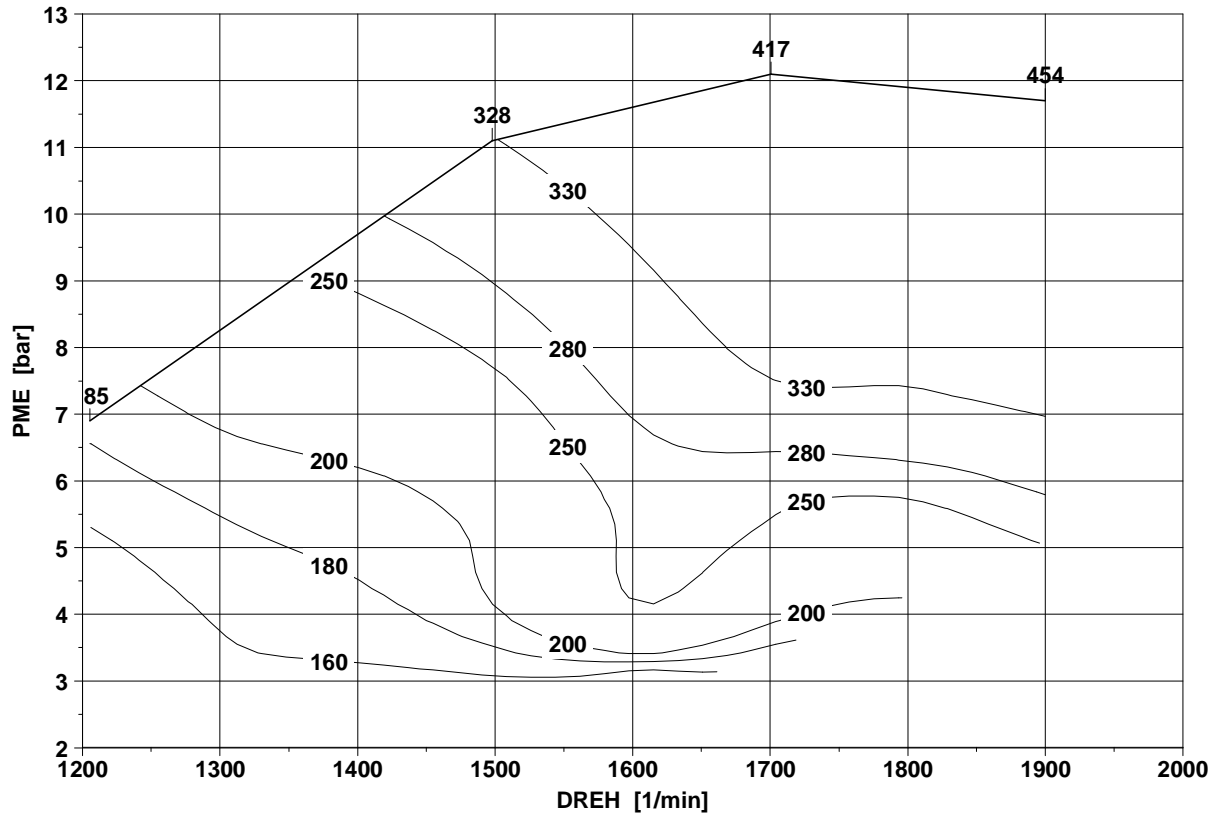


Abbildung 23: Luftmassenstrom [kg/h] im innermotorischen Fettbetrieb

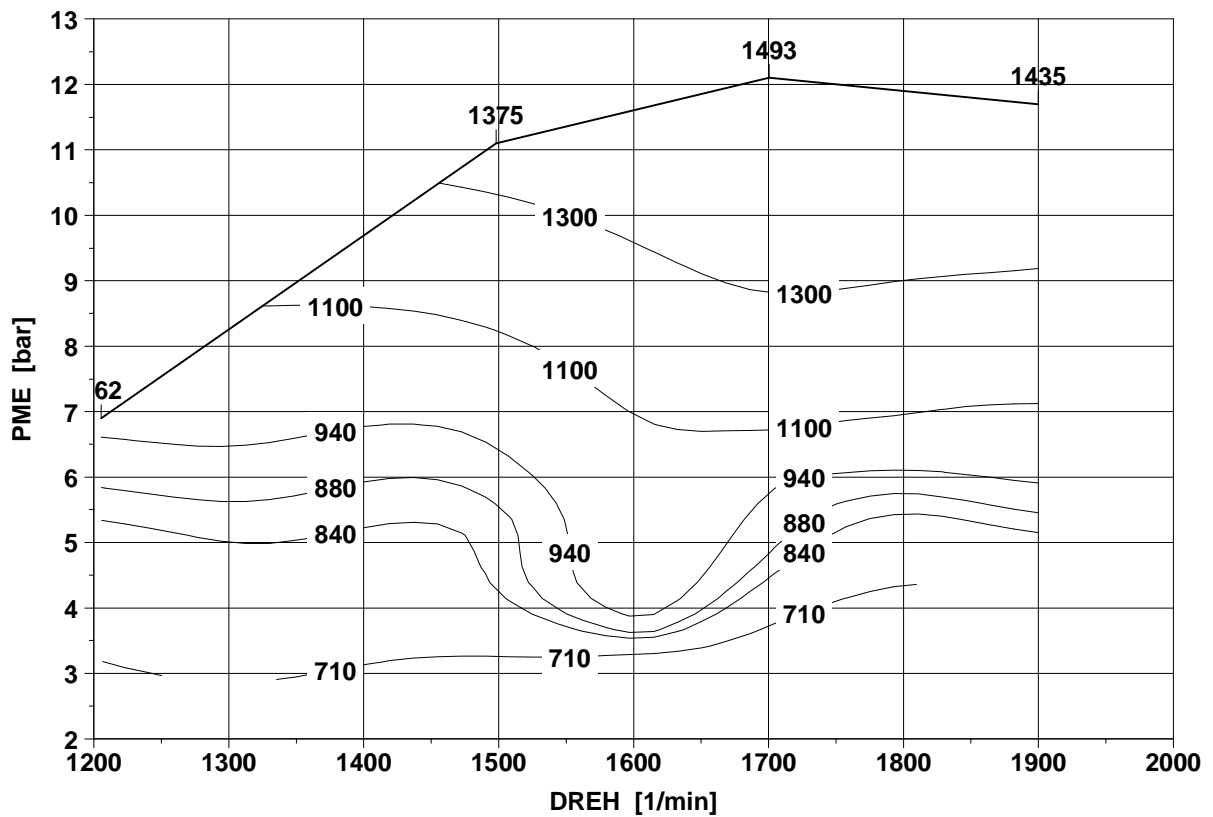


Abbildung 24: Luftmasse/Arbeitsspiel [mg/ASP] im innermotorischen Fettbetrieb

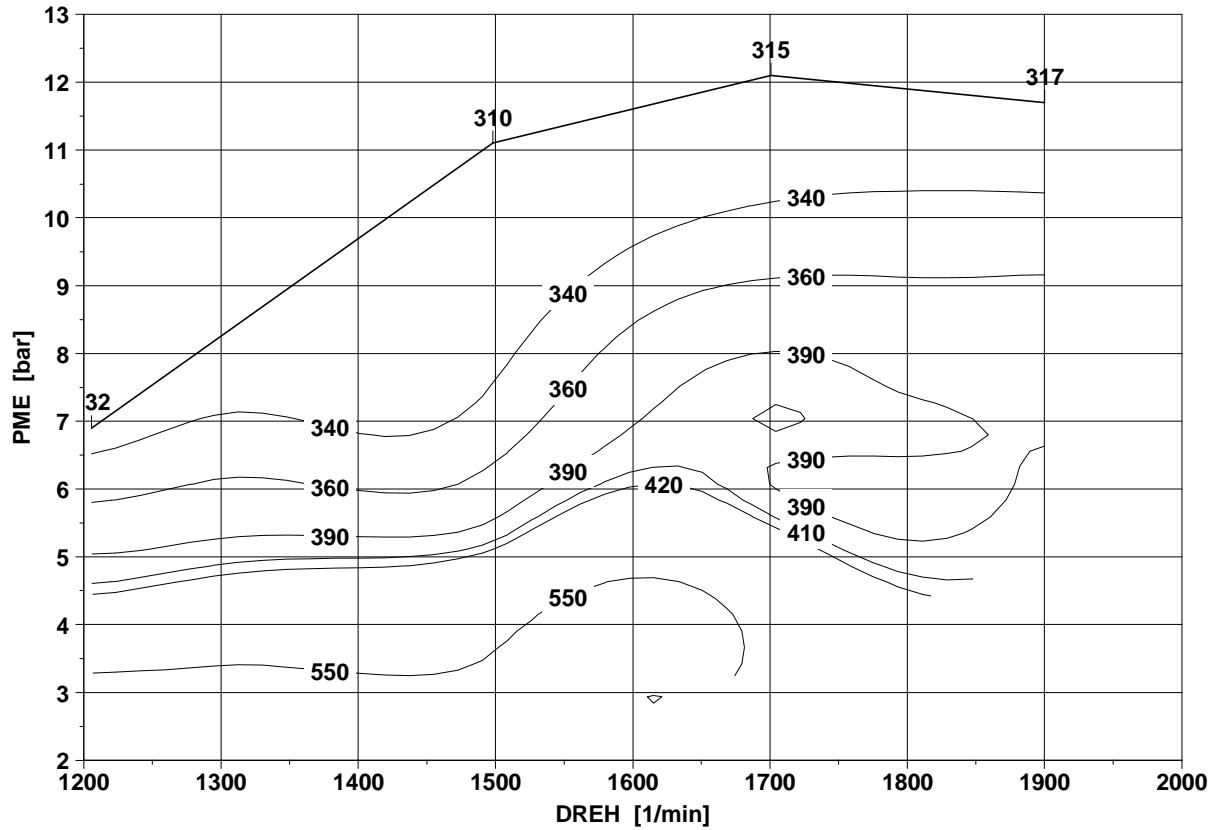


Abbildung 25: spez. Kraftstoffverbrauch [g/kWh] im innermotorischen Fettbetrieb

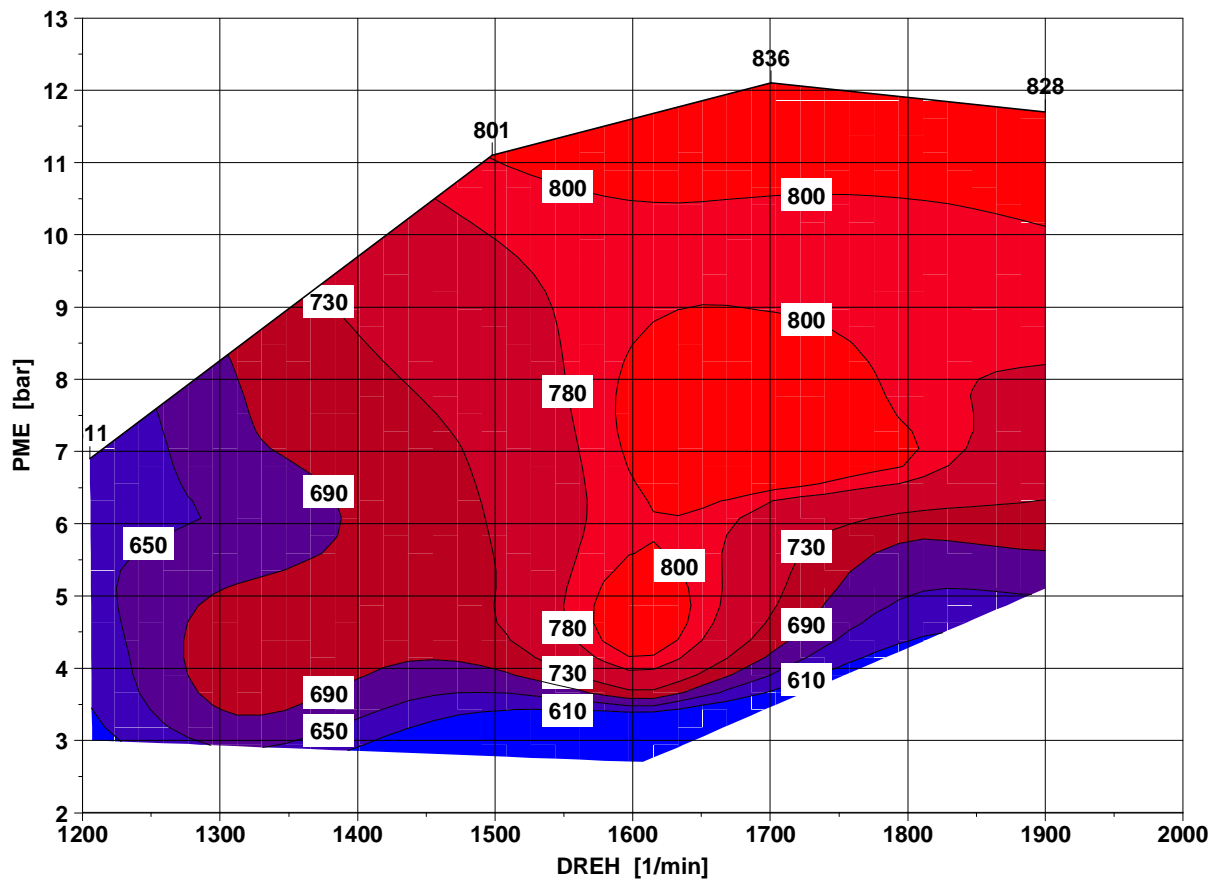


Abbildung 26: Temperatur [°C] vor Turbine im innermotorischen Fettbetrieb

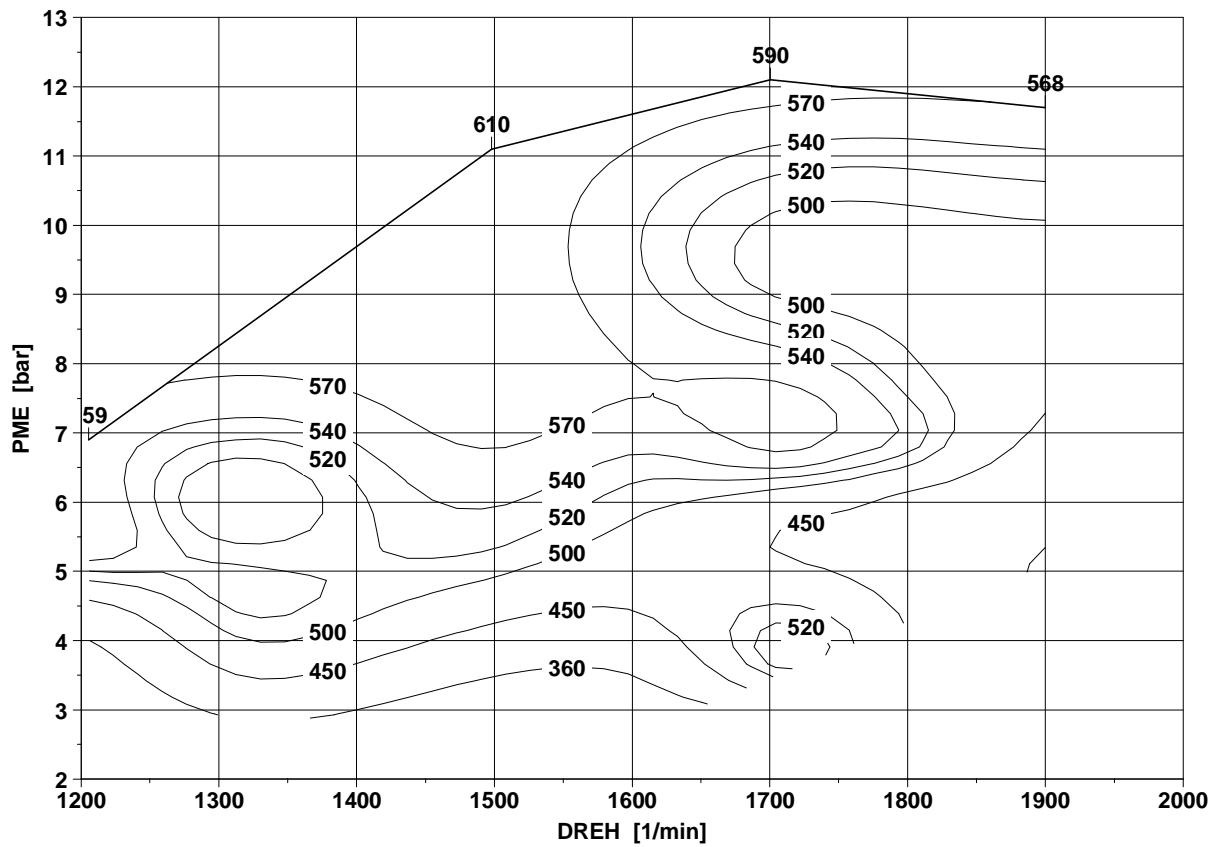


Abbildung 27: Temperatur [°C] nach Oxidationskatalysator im innermotorischen Fettbetrieb

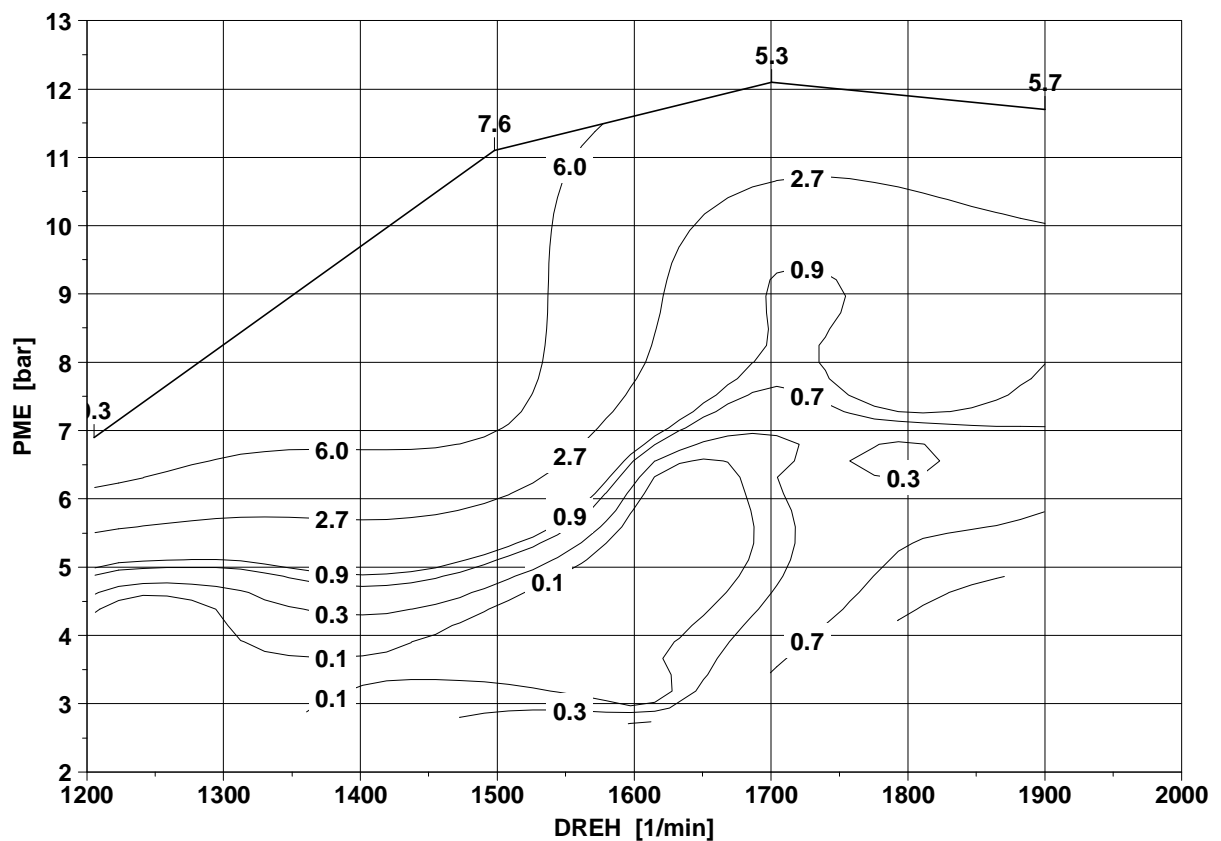


Abbildung 28: Rußwerte [-] im innermotorischen Fettbetrieb

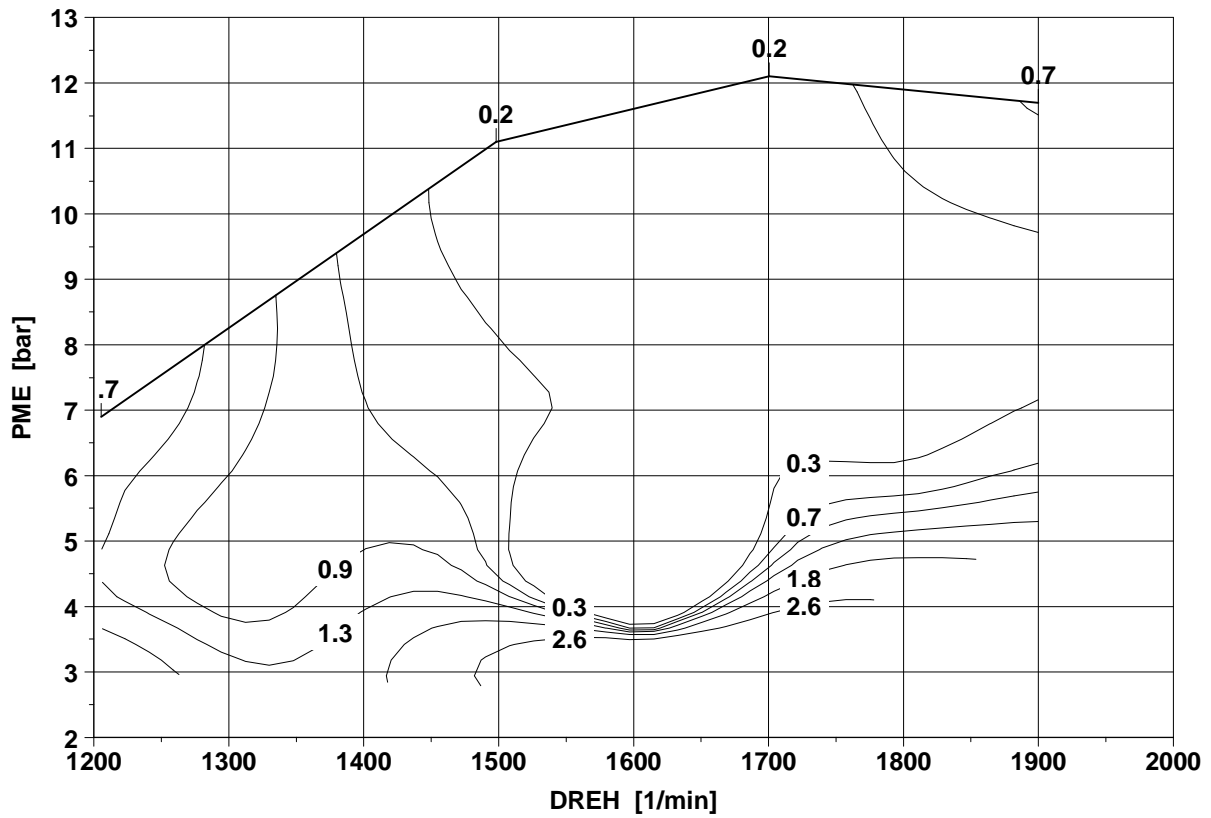


Abbildung 29: Sauerstoffkonzentration [%] im innermotorischen Fettbetrieb

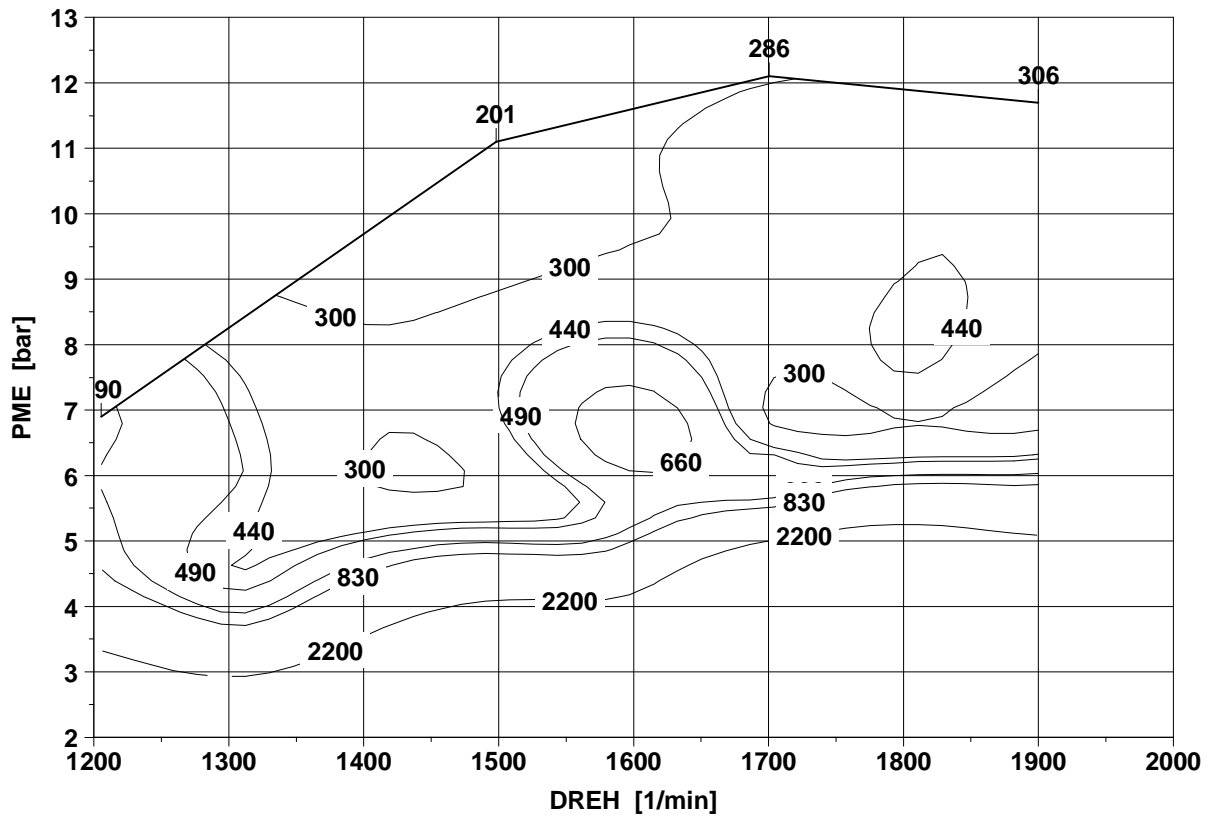


Abbildung 30: HC- Konzentration [ppm] im innermotorischen Fettbetrieb

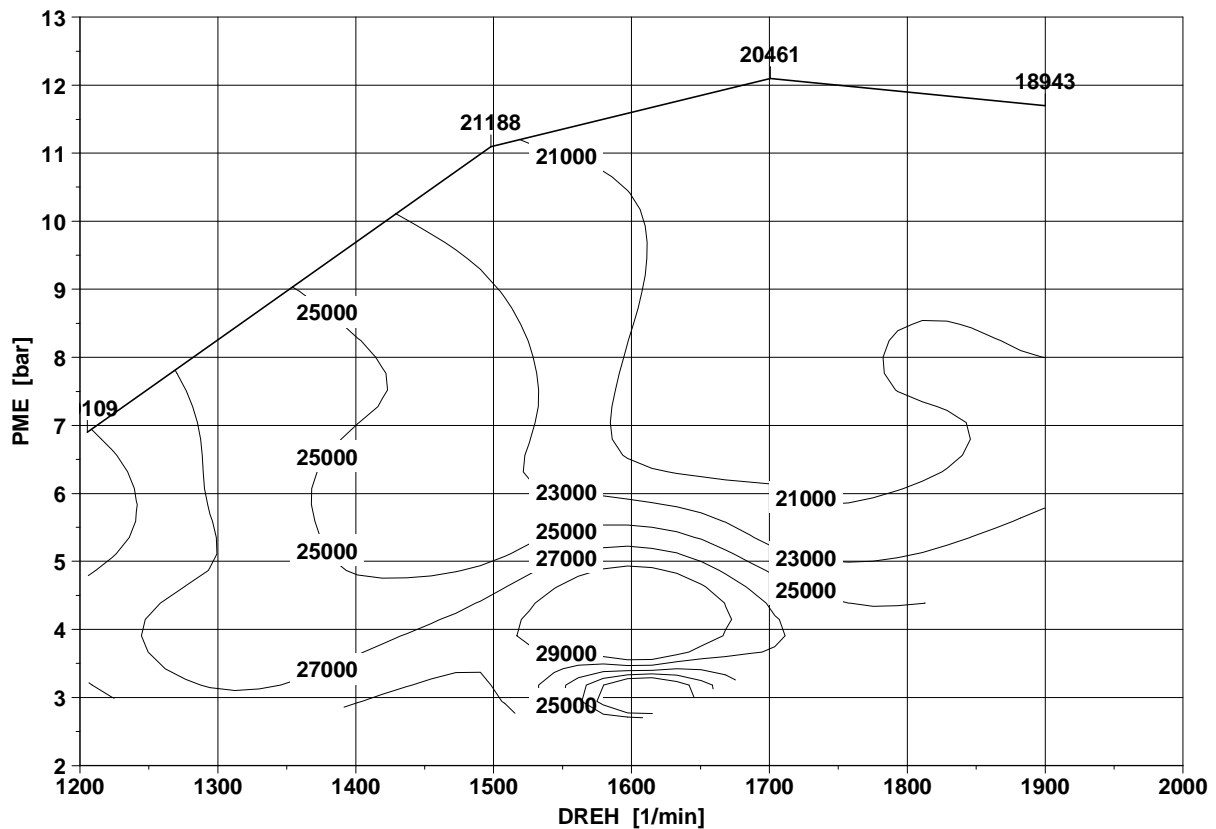


Abbildung 31: CO- Konzentration [ppm] im innermotorischen Fettbetrieb

Mit der gezeigten Kalibrierung wurde der Motorbetriebsbereich etwa bis zu 50% Last abgedeckt, wie bereits geschildert stellte die Abgastemperatur vor Turbine das wesentliche beschränkende Kriterium für eine weitere Ausdehnung des Fettbetriebes dar. Zusätzlich wird auch der Zielkonflikt zwischen Abgastemperatur und Rußemission stetig größer.

Um eine Regeneration auch bei höheren Lasten darzustellen wurde die in Abbildung 14 dargestellte außermotorische Anfettung (Variante A) ebenfalls untersucht. Die notwendige light-off Temperatur für die Umsetzung des extern eingespritzten Kraftstoffs wird bei höheren Lasten bereits im Magerbetrieb des Dieselmotors erreicht.

Die externe Anfettung wurde ebenfalls von der ASCET Hardware angesteuert, ein entsprechendes Softwaremodul generierte hierzu eine entsprechende Bedarfsanforderung und Umsetzung in ein elektrisches Ansteuersignal. Zur externen Eindüsung wurde ein Injektor mit Kühladapter entwickelt, der handelsüblichen Dieselkraftstoff über eine herkömmliche Dieseleinspritzdüse in den Abgastrakt einspritzt. Dabei erfolgt die Betätigung der Düsennadel elektromagnetisch.

Der Aufbau des Ventils mit den wichtigsten Grenztemperaturen und die Ausführung sind in Abbildung 32 und Abbildung 33 dargestellt.

Zulässige Temperaturen

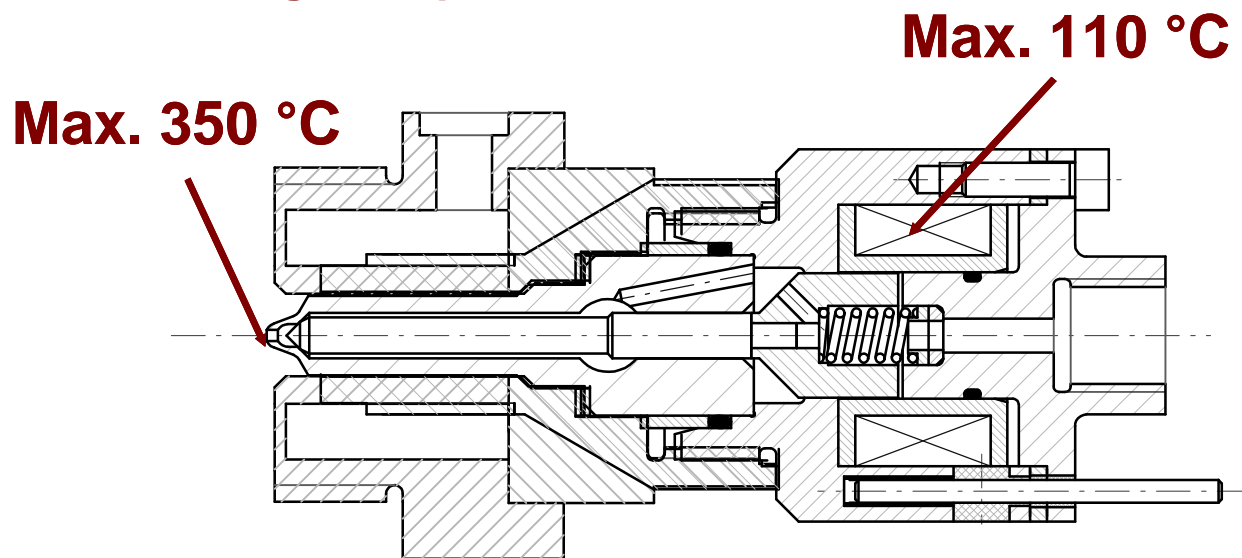


Abbildung 32: Aufbau Einspritzventil für externe Nacheinspritzung



Abbildung 33: Ausführung Einspritzventil für externe Nacheinspritzung

Das Einspritzventil wurde über eine eigene Kraftstoffpumpe versorgt (Abbildung 34) und hatte, mit einer Dreilochdüse ausgerüstet, das in Abbildung 35 dargestellte druckabhängige Durchflussverhalten.

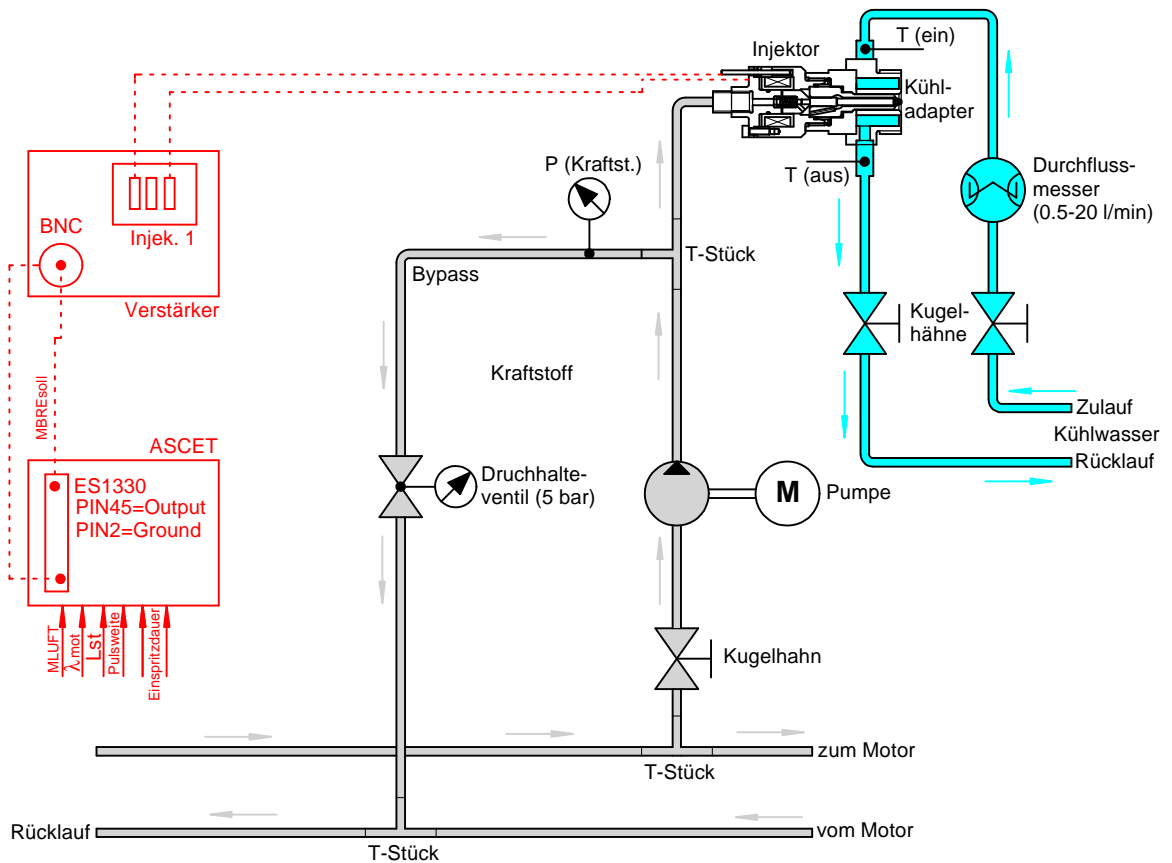


Abbildung 34: Systemaufbau externe Nacheinspritzung

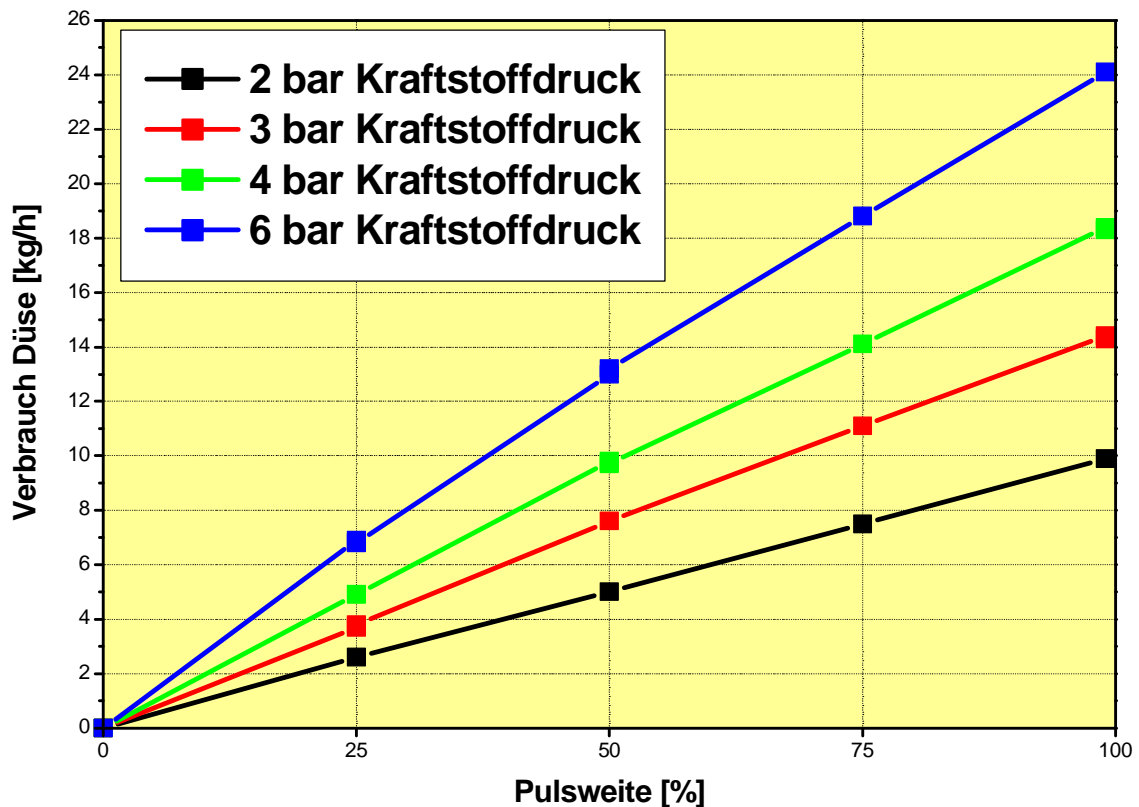


Abbildung 35: Durchflussverhalten externe Nacheinspritzung

Mit der externen Nacheinspritzung ist die Darstellung einer unterstöchiometrischen Abgaszusammensetzung grundsätzlich einfach möglich. Der hohe Restsauerstoffanteil erfordert jedoch eine gute Umsetzung des eingespritzten Kraftstoffes in Komponenten mit guten reaktiven Eigenschaften, d.h. CO bei gleichzeitig möglichst vollständiger Reduktion des im Abgas vorhandenen Sauerstoffs.

Dabei ist das mögliche Temperaturfenster, in dem einerseits eine gute Umwandlung stattfindet und andererseits die Spitzentemperaturen des Katalysators nicht überschritten werden etwa zwischen 400°C und 750°C.

Hiermit wurde ein dem aus der Brennstoffzellentechnologie bekannten Reformer ähnliches System aufgebaut. In weiteren Untersuchungen ist der Einsatz eines kontinuierlich arbeitenden Reformers mit partieller Oxidation (POX) zu prüfen, der die Regenerationsmittelbereitstellung in Form von CO und H₂ ebenfalls übernehmen könnte.

In **Abbildung 36** ist die Entwicklung von CO- und HC- Konzentration beispielhaft in dem ESC Punkt A/75% dargestellt. Dabei sind die ermittelten Messwerte für die HC- und CO- Konzentrationen aufgetragen, die durch die im Messverfahren bedingten t₉₀- Zeiten zu korrigieren sind

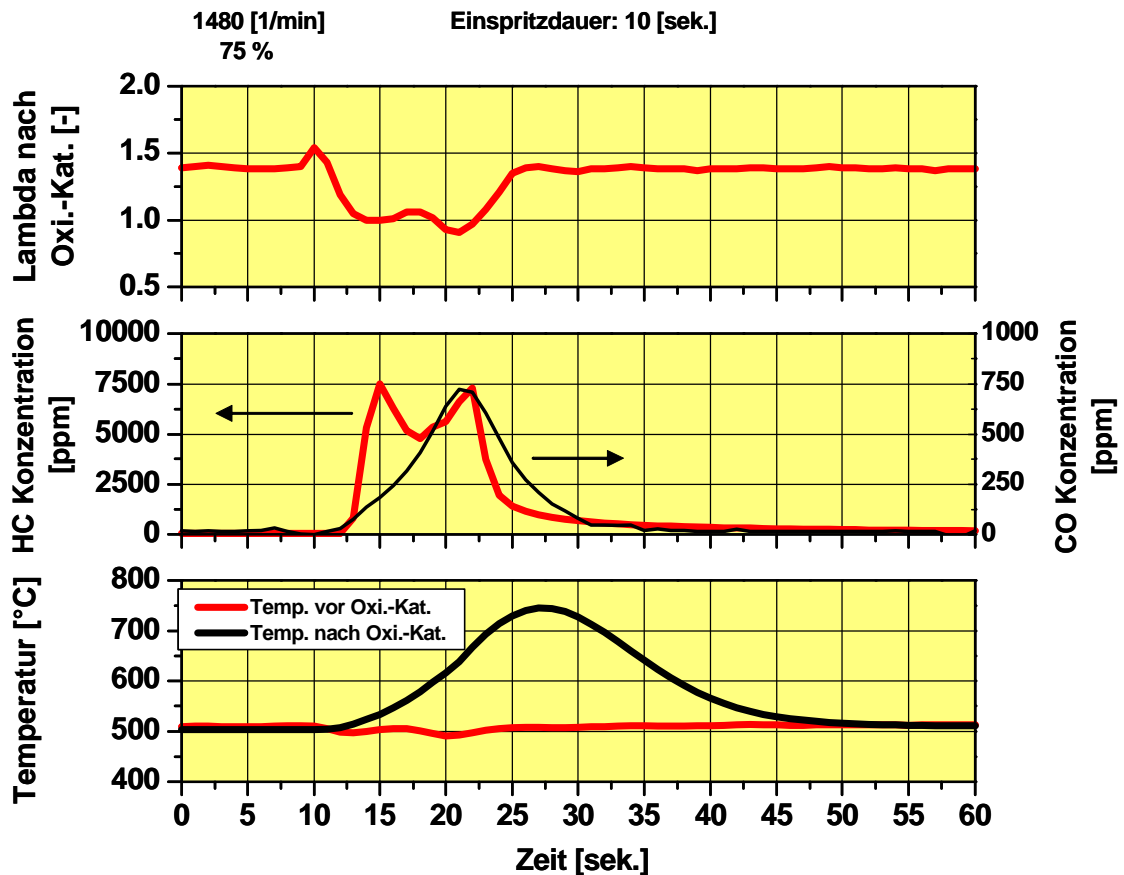


Abbildung 36: Externe Nacheinspritzung bei A/75%

Um die Umsetzung des Kraftstoffes zu verbessern, wurde zudem die Raumgeschwindigkeit im Oxidationskatalysator durch einen Bypass reduziert (**Abbildung 37**). Dabei konnte eine nahezu vollständige Reduktion des vorhandenen Restsauerstoffs im Abgas erreicht werden, während durch den verringerten Eintrag von Kraftstoff bei vergleichbarem Wärmeübergang die Abgastemperatur nach dem Oxidationskatalysator leicht reduziert werden konnte.

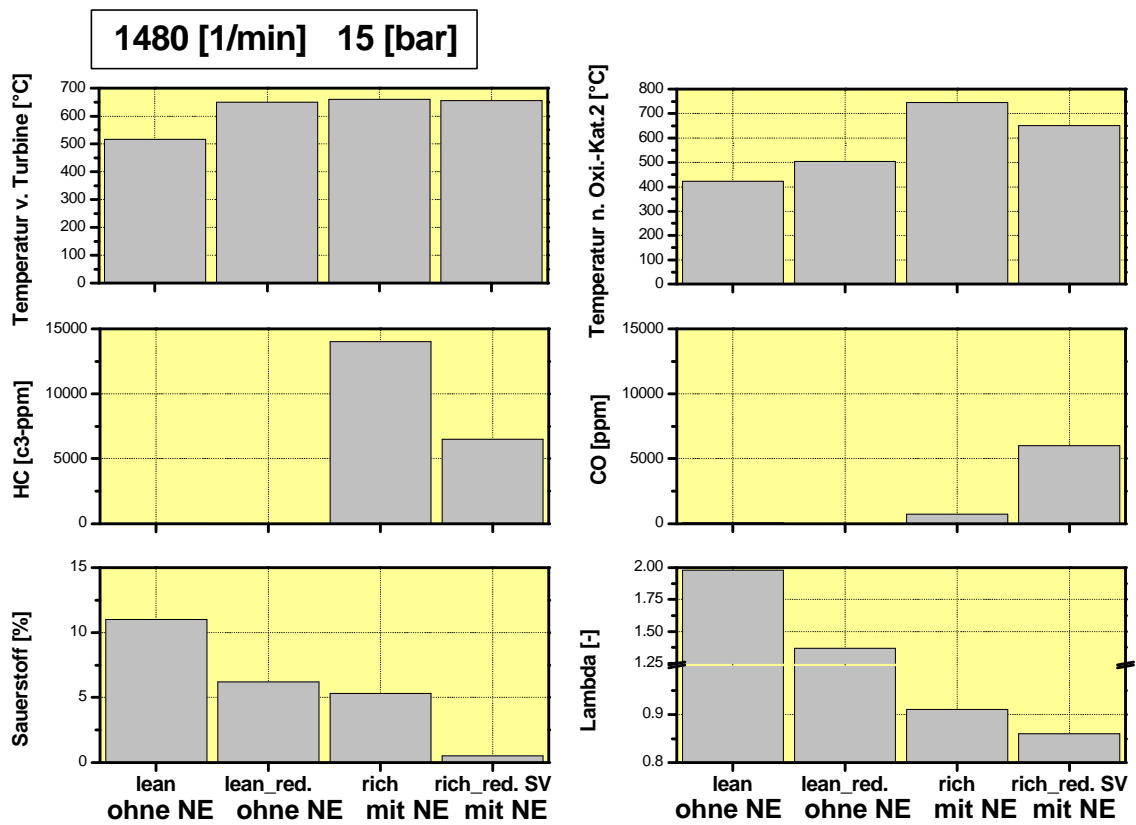


Abbildung 37: Externe Nacheinspritzung bei A/75%, Variation Raumgeschwindigkeit

1.3 Arbeitspaket 3: Instationäre Abstimmung und Regelkonzept

Im Rahmen der instationären Abstimmung war die Drehmomentneutrale Wechsel zwischen Mager- und Fettbetrieb zu erzielen. Dazu wurden in dem in Kapitel 1.2.3 dargestellten ASCET-Modell Rampenfunktionen eingesetzt und appliziert. Um die einzelnen Rampen anzusteuern und die Zustände ‚Magerbetrieb‘ und ‚Fettbetrieb‘ unter definierten Bedingungen betreiben zu können, wurde ein Zustandsautomat (**Abbildung 38**) verwendet. Dabei wurde jeweils ein Übergangsschritt Mager-Fett und Fett-Mager eingesetzt, der eine Unterbrechung der Rampen bzw. eine weitere Funktionalität ermöglicht.

Der Zwischenschritt wurde dabei jeweils für den Beginn bzw. das Ende der Kraftstoffpfads-Änderungen verwendet. Damit wurde nach einer definierten Zeit, in der ausschließlich Einfluss auf die Luftpfadparameter genommen wurde die Einspritzmenge angepasst und nach vollzogener Umstellung der Einspritzmenge die Einspritzbeginne auf die Fettbetriebsparameter umgestellt.

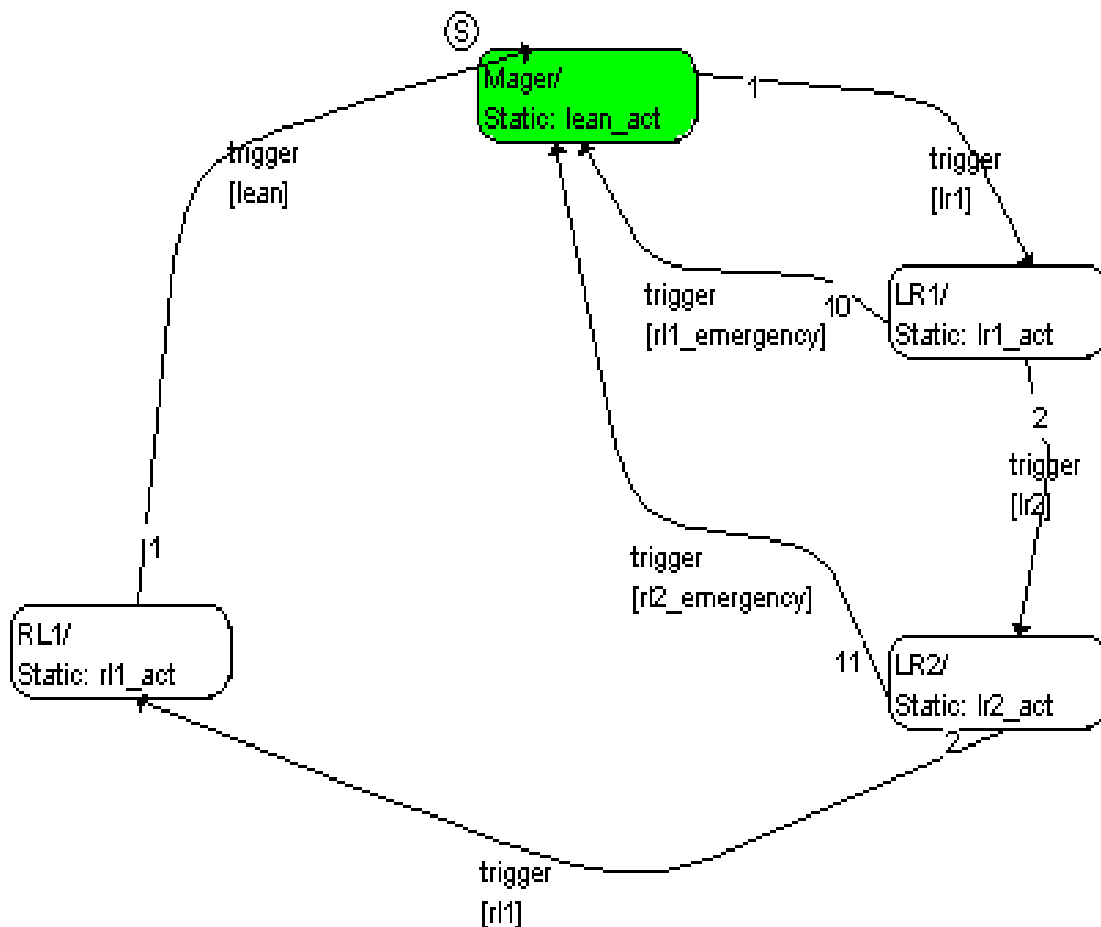


Abbildung 38: Zustandsautomat Magerbetrieb, Fettbetrieb und Übergänge

Die Gestaltung der Rampen ist in **Abbildung 39** und **Abbildung 40** dargestellt. Dabei ist ersichtlich, dass zunächst die Lufttrampe eingeleitet wird und anschließend eine kürzere Rampe für die eingesetzte Kraftstoffmasse verwendet wird. Anhand der Abstände zwischen den Rampen und der Rampenzeit kann die Drehmomentneutralität der Mager – Fett – Mager Übergänge erreicht werden.

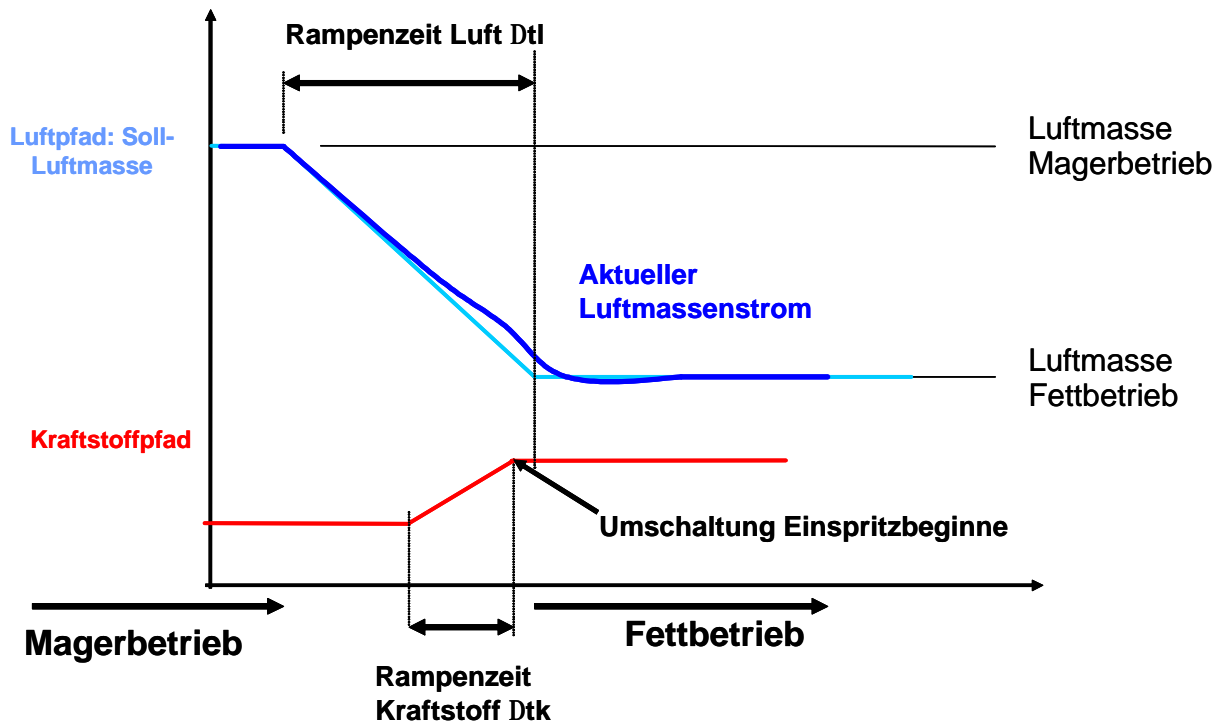


Abbildung 39: Übergang Magerbetrieb zu Fettbetrieb mit Übergang

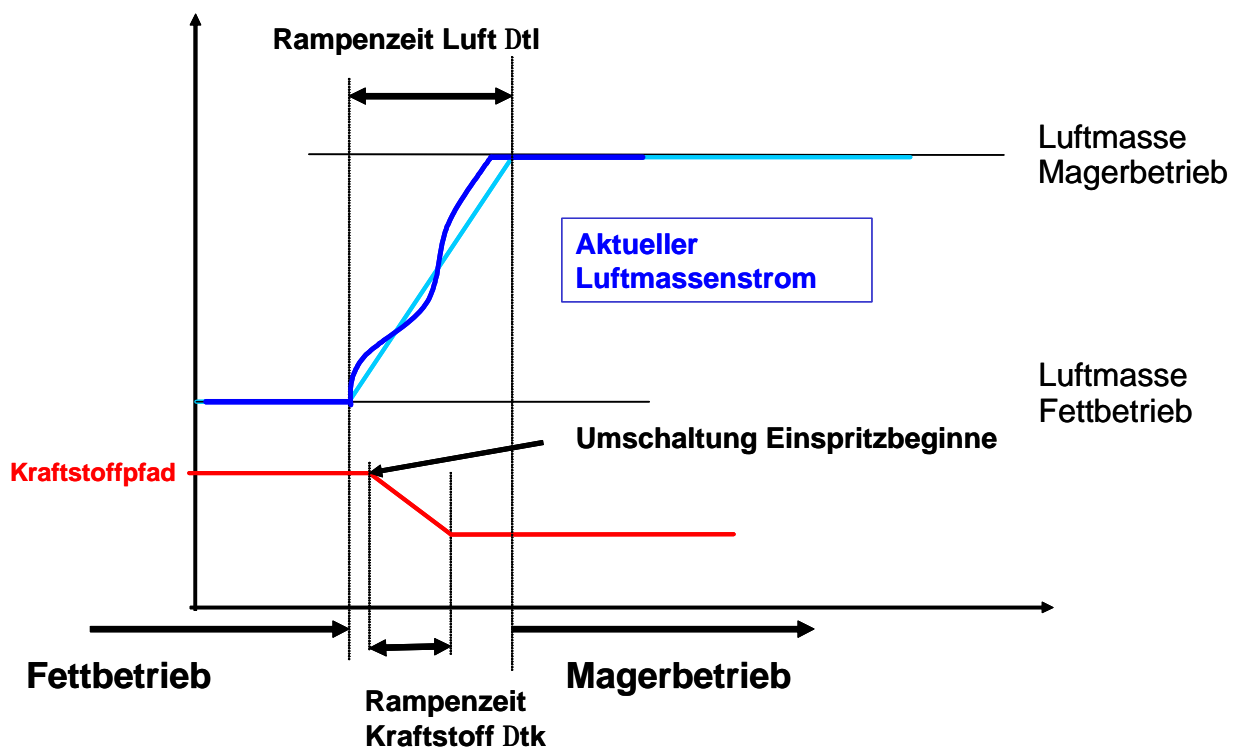


Abbildung 40: Übergang Fettbetrieb zu Magerbetrieb mit Übergang

Bei der drehmomentneutralen Kalibrierung unter Einsatz der Drossellappe war auch die Drehzahl des Abgasturboladers zu beachten – hierbei konnte die Güte des Übergangs durch eine - betriebspunktabhängig unterschiedlich gut realisierbare - konstante Abgasturboladerdrehzahl verbessert werden. In Abbildung 41 bis Abbildung 44 sind diese transienten Vorgänge beispielhaft in den ESC-Punkten B/25% und C/50% dargestellt.

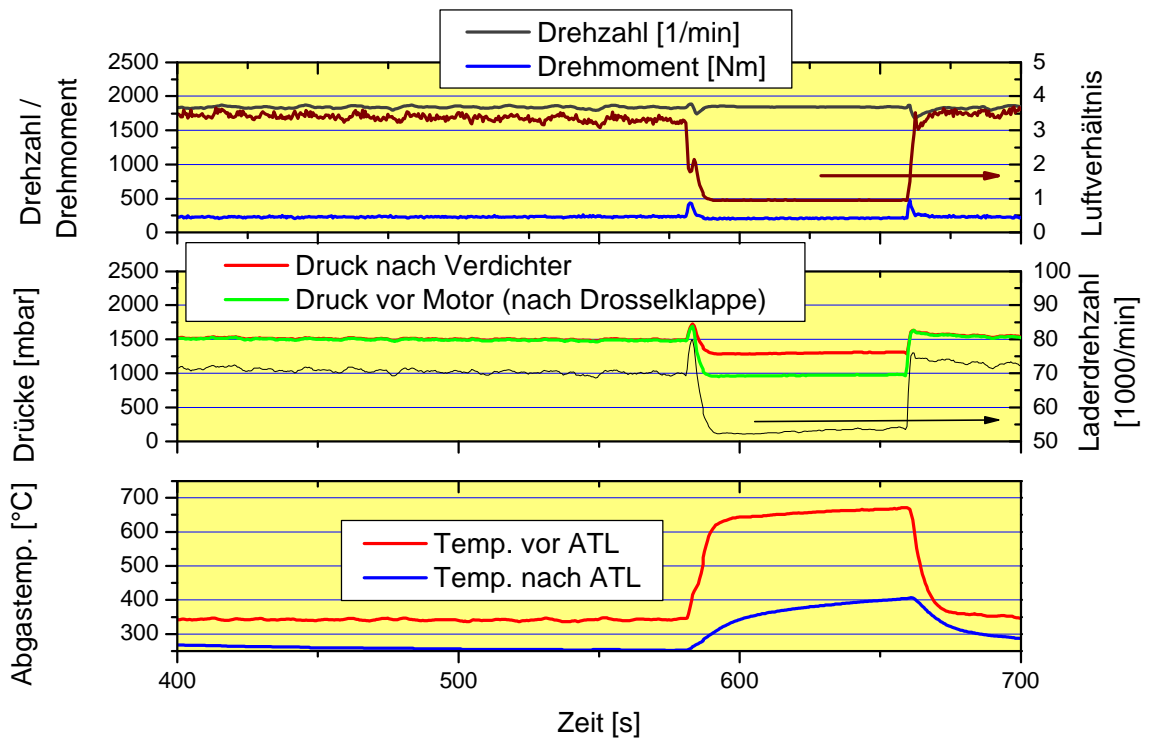


Abbildung 41: Mager – Fett – Mager – Sprung bei B/25%

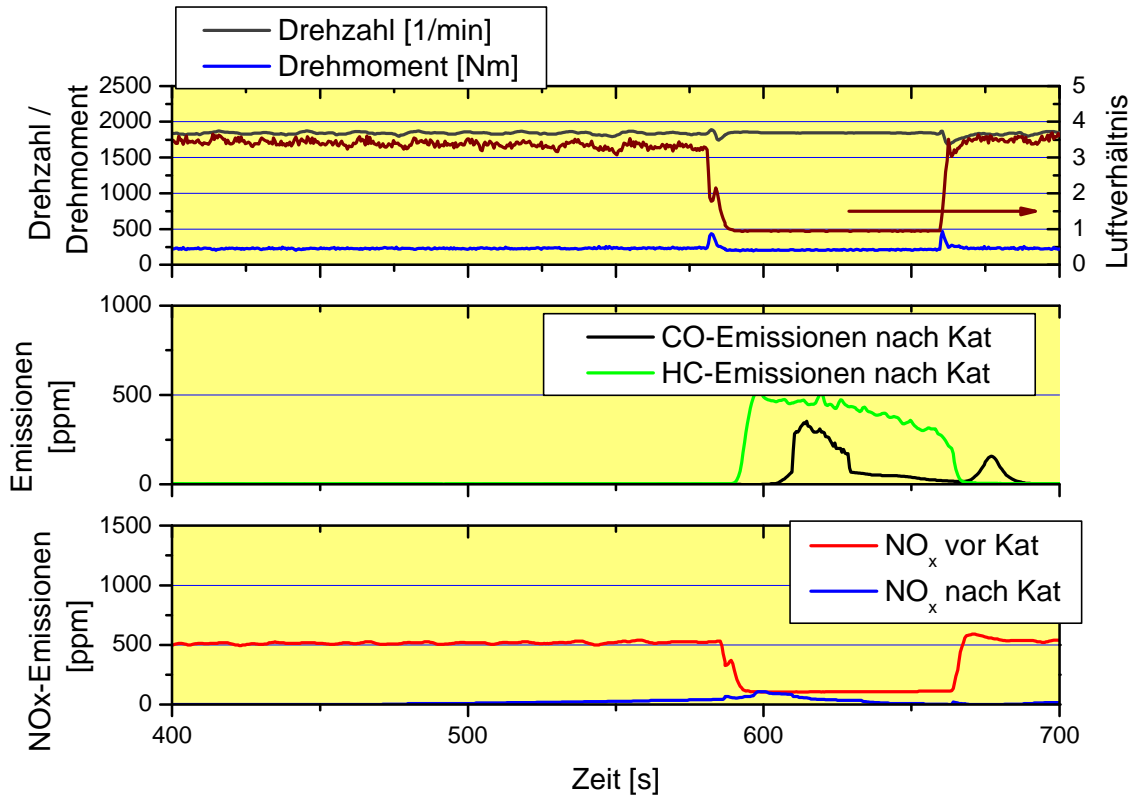


Abbildung 42: Mager – Fett – Mager – Sprung bei B/25%

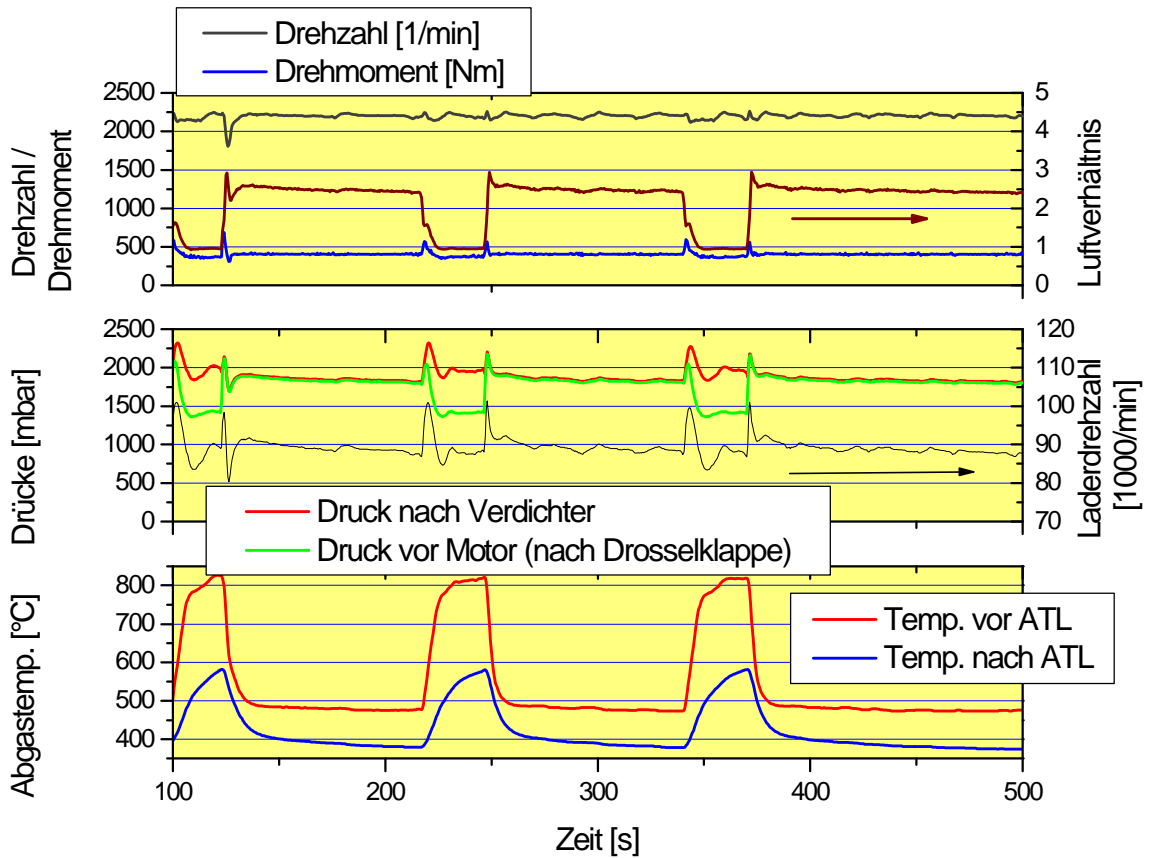


Abbildung 43: Mager – Fett – Mager – Sprung bei C/50%

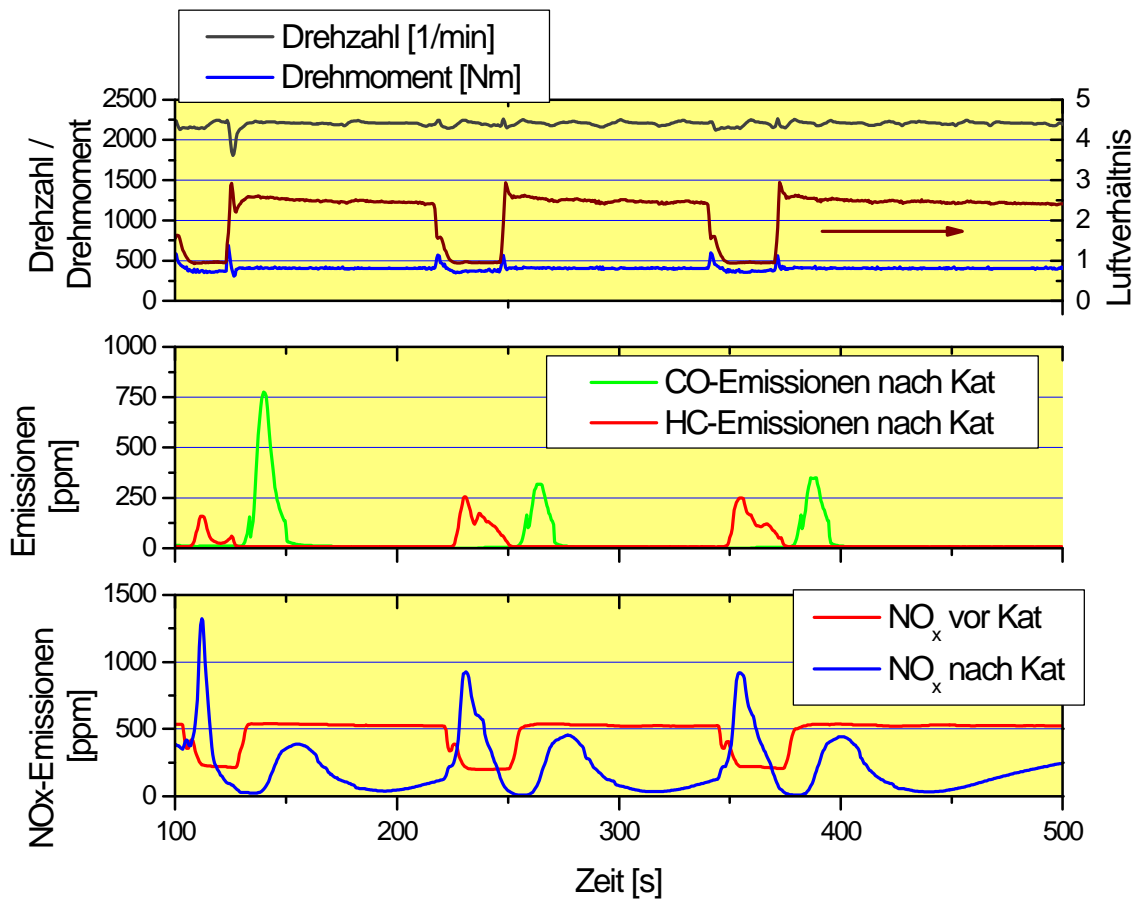


Abbildung 44: Mager – Fett – Mager – Sprung bei C/50%

Zur Erstellung und Optimierung des Regelkonzeptes wurde zunächst der verwendete NOx-Adsorber detailliert untersucht. Dazu wurde das jeweils maximal mögliche Speichervermögen durch eine sog. Vollspeicherkurve unter verschiedenen Randbedingungen ermittelt. Zur Aufnahme der Vollspeicherkurven wurde der Adsorber jeweils vollständig entleert und anschließend bis zur Sättigung beladen. Den größten Einfluss auf das Speichervermögen hat dabei die Temperatur am Adsorber. In **Abbildung 45** bis **Abbildung 52** sind die Vollspeicherkurven für verschiedene Lasten bei zwei Drehzahlen aufgetragen. Durch die Lastvariation änderte sich dabei die Temperatur am Adsorber. Daraus konnte das Adsorptionsverhalten bzw. maximale Speichervermögen in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt werden.

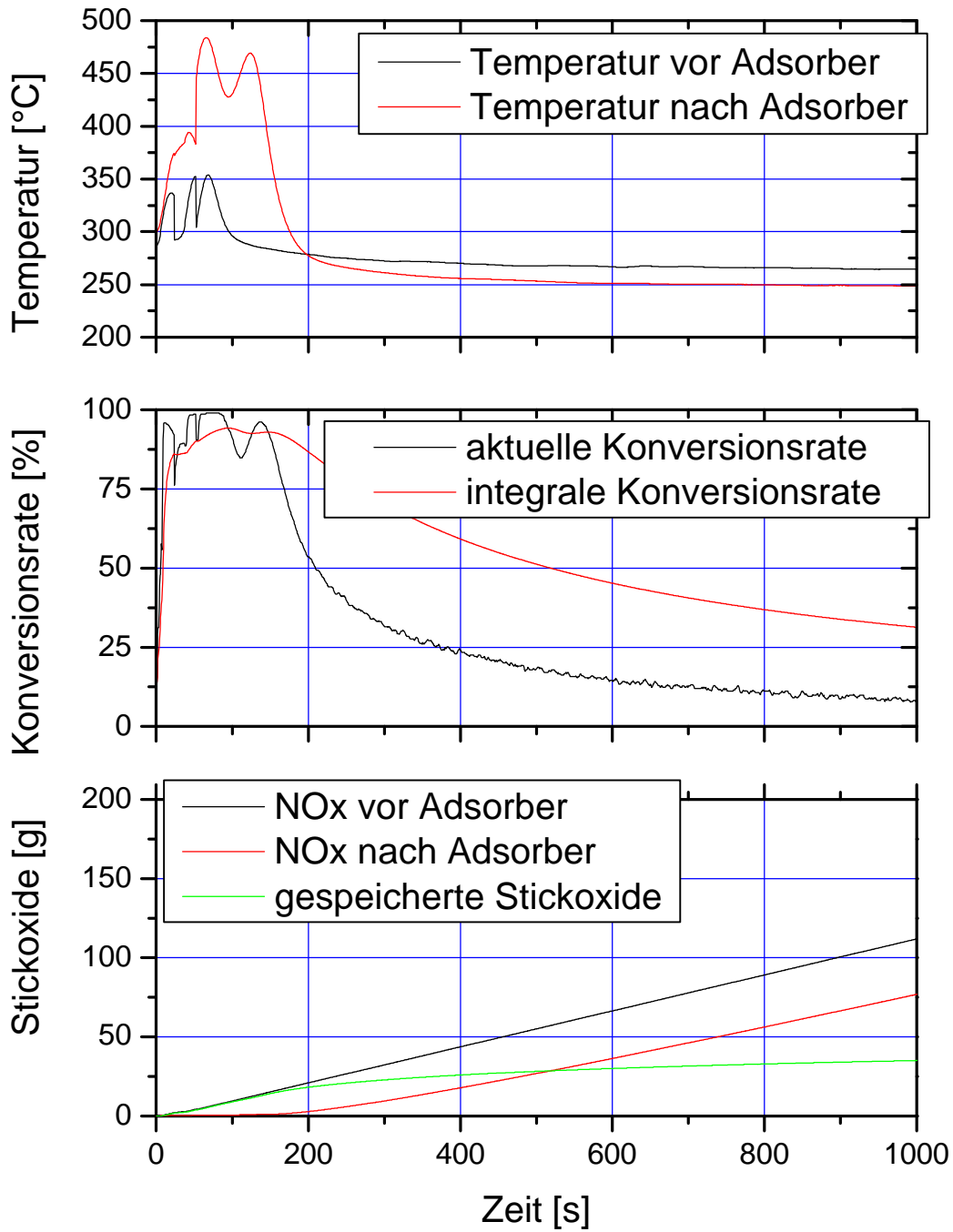


Abbildung 45: Vollspeicherkurve 1660/ 4,2bar

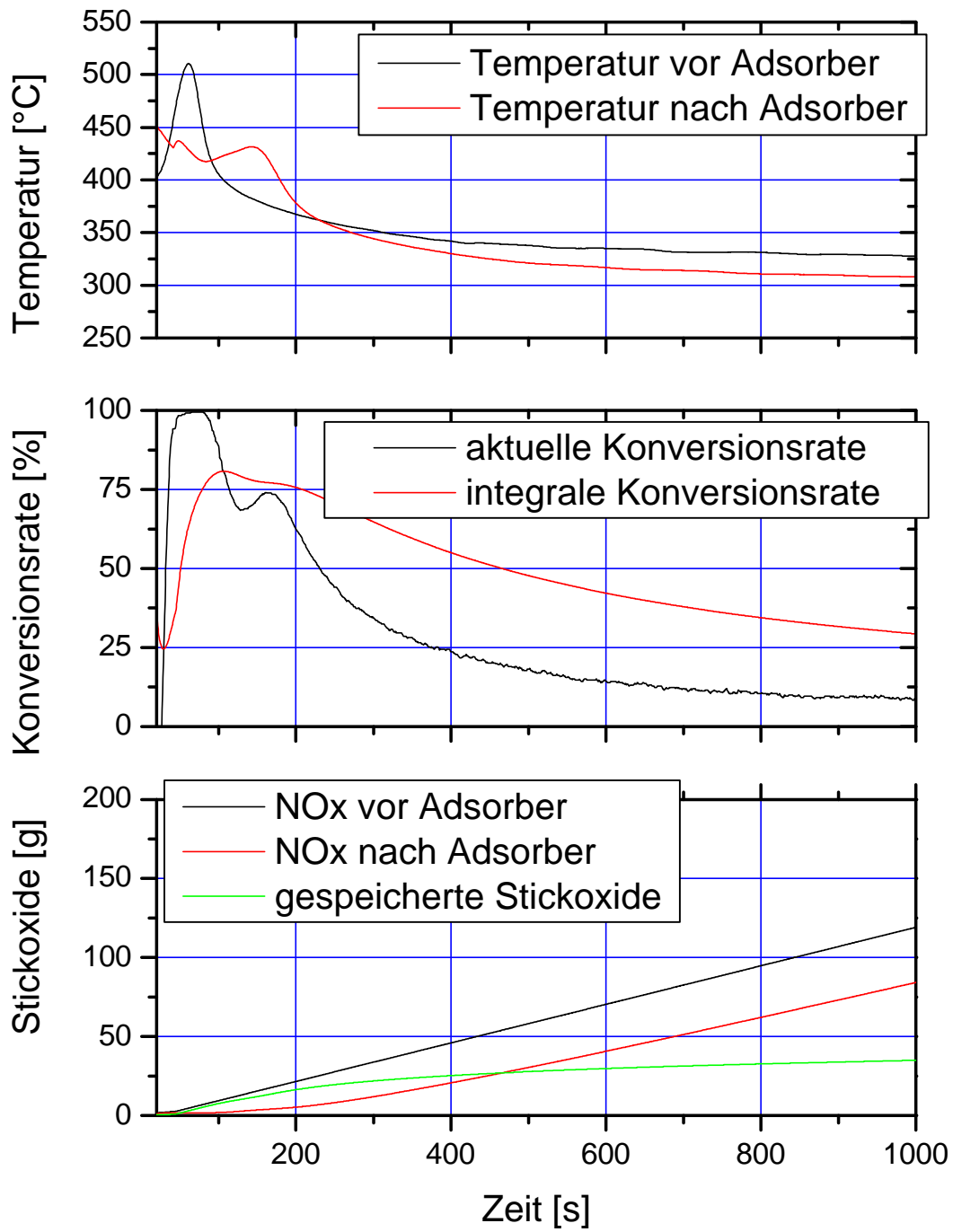


Abbildung 46: Vollspeicherkurve 1660 / 5,1bar

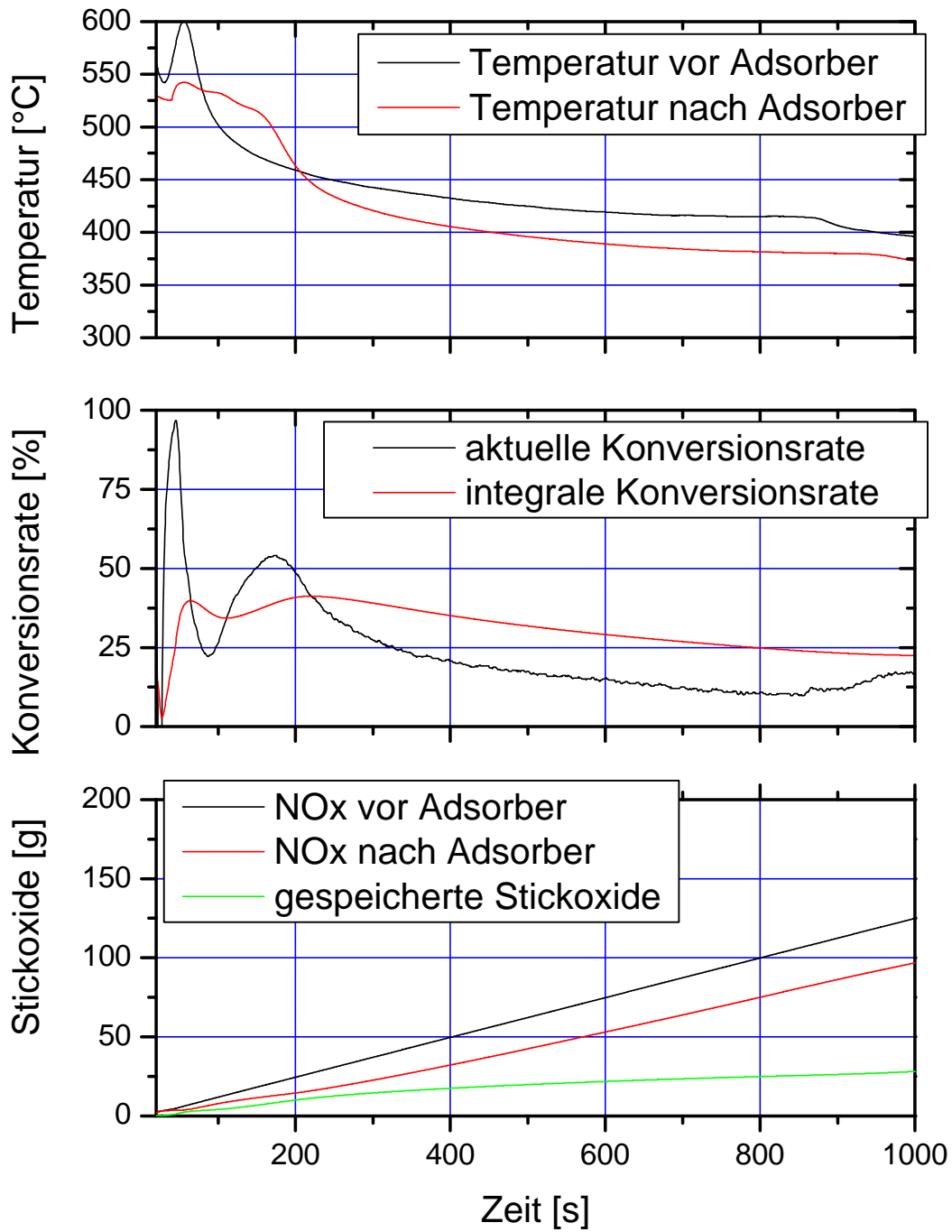


Abbildung 47: Vollspeicherkurve 1660 / 6,1bar

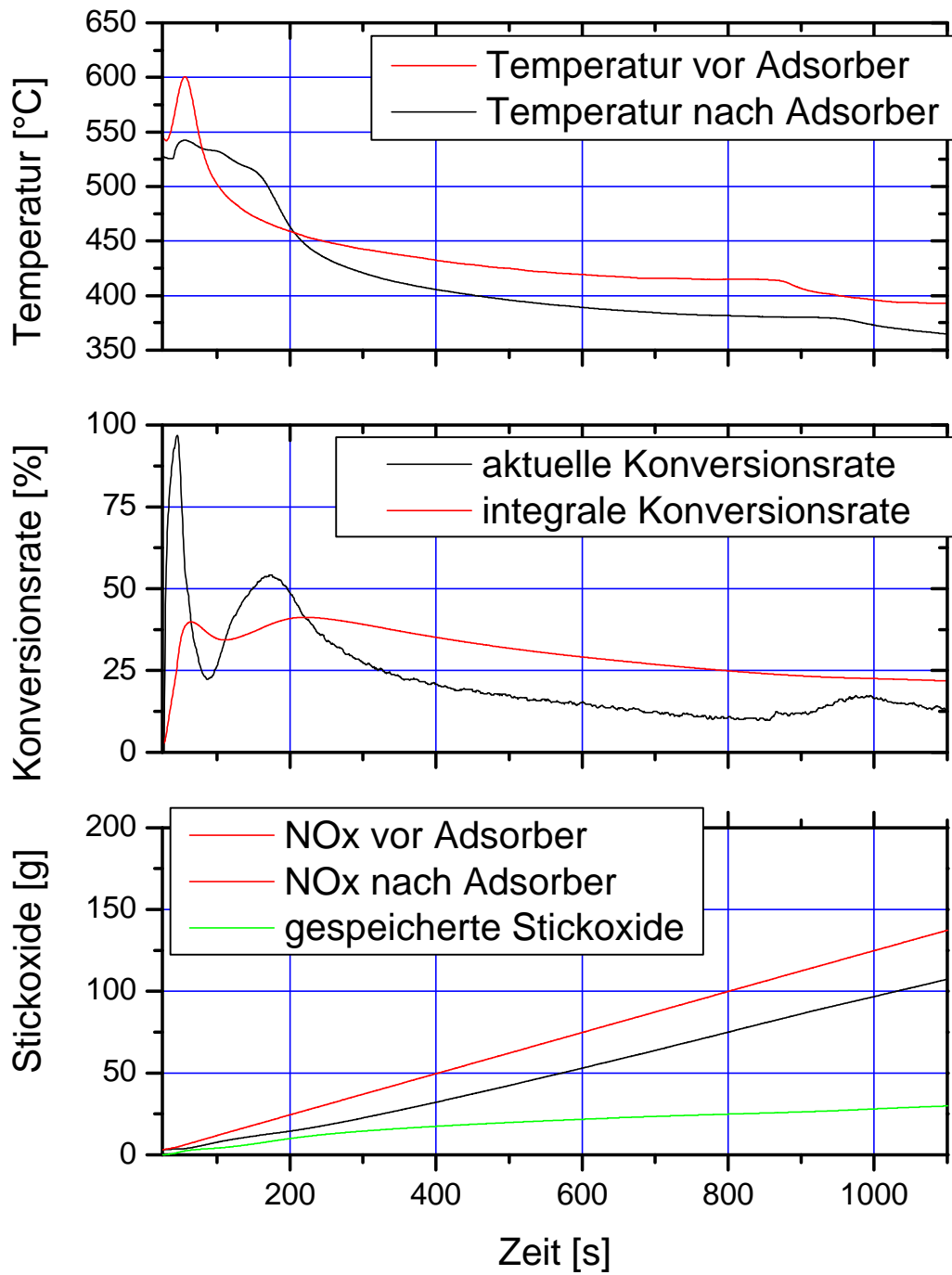


Abbildung 48: Vollspeicherkurve 1600 / 6,7bar

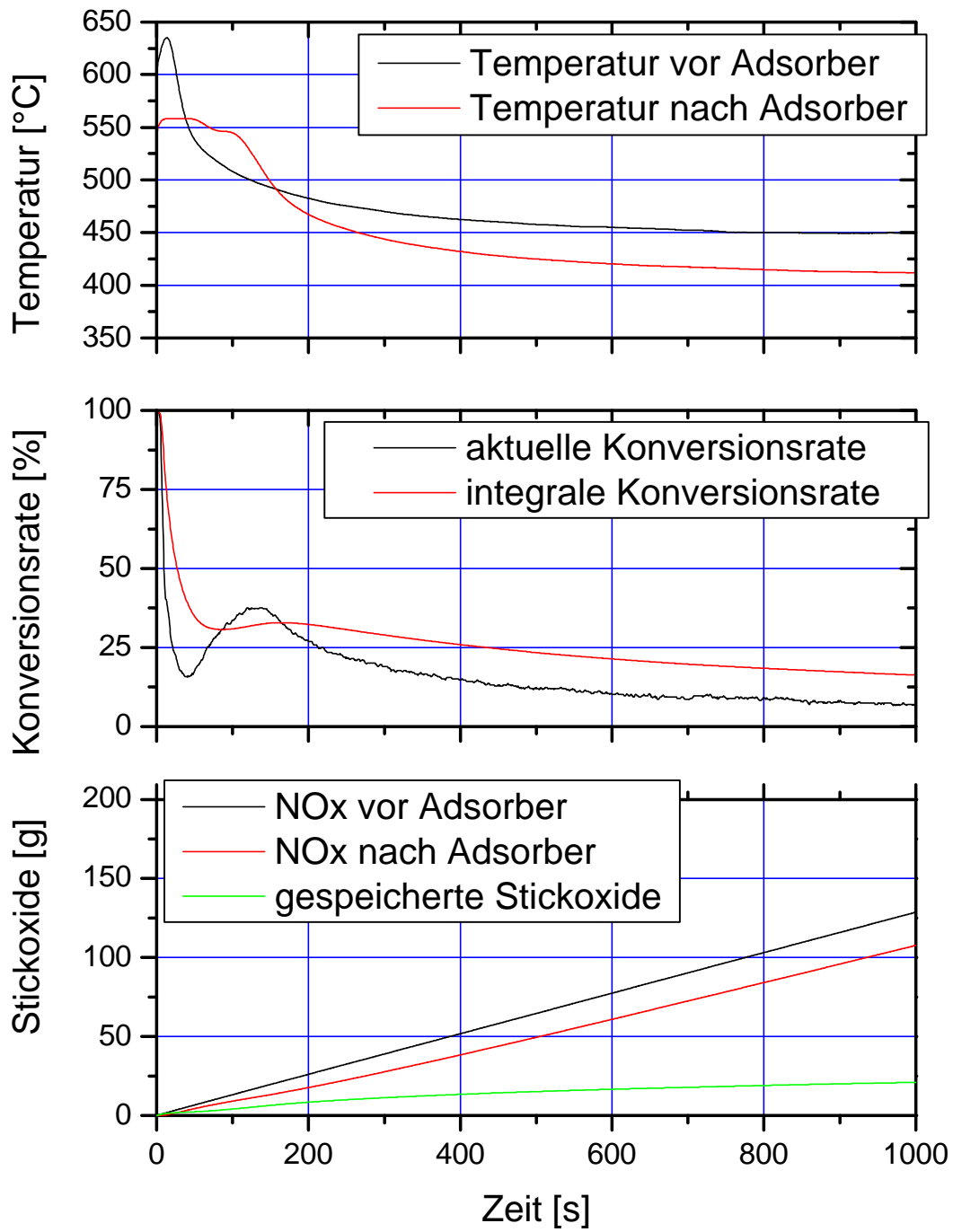


Abbildung 49: Vollspeicherkurve 1660 / 7,3bar

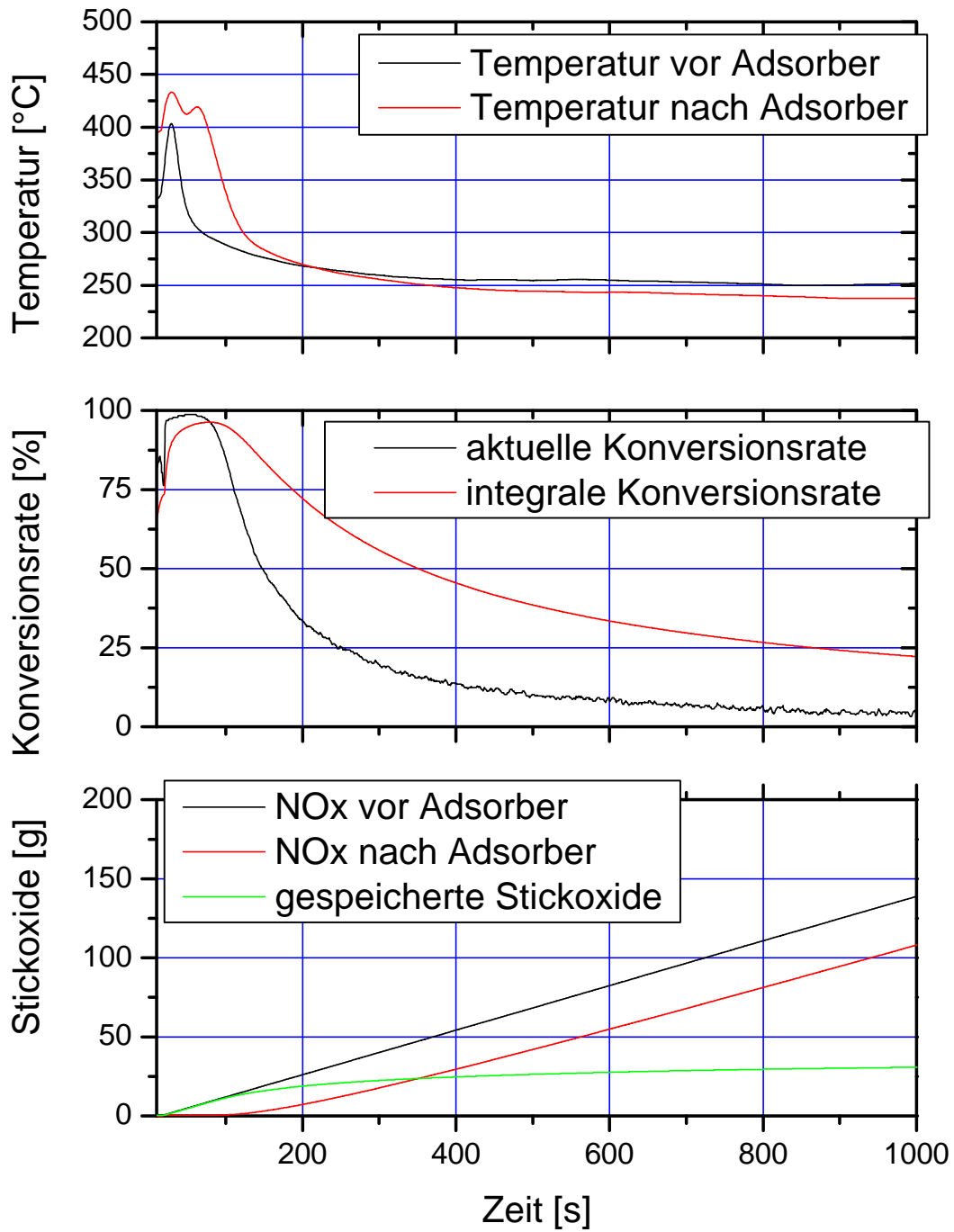


Abbildung 50: Vollspeicherkurve 1850 / 5,3bar

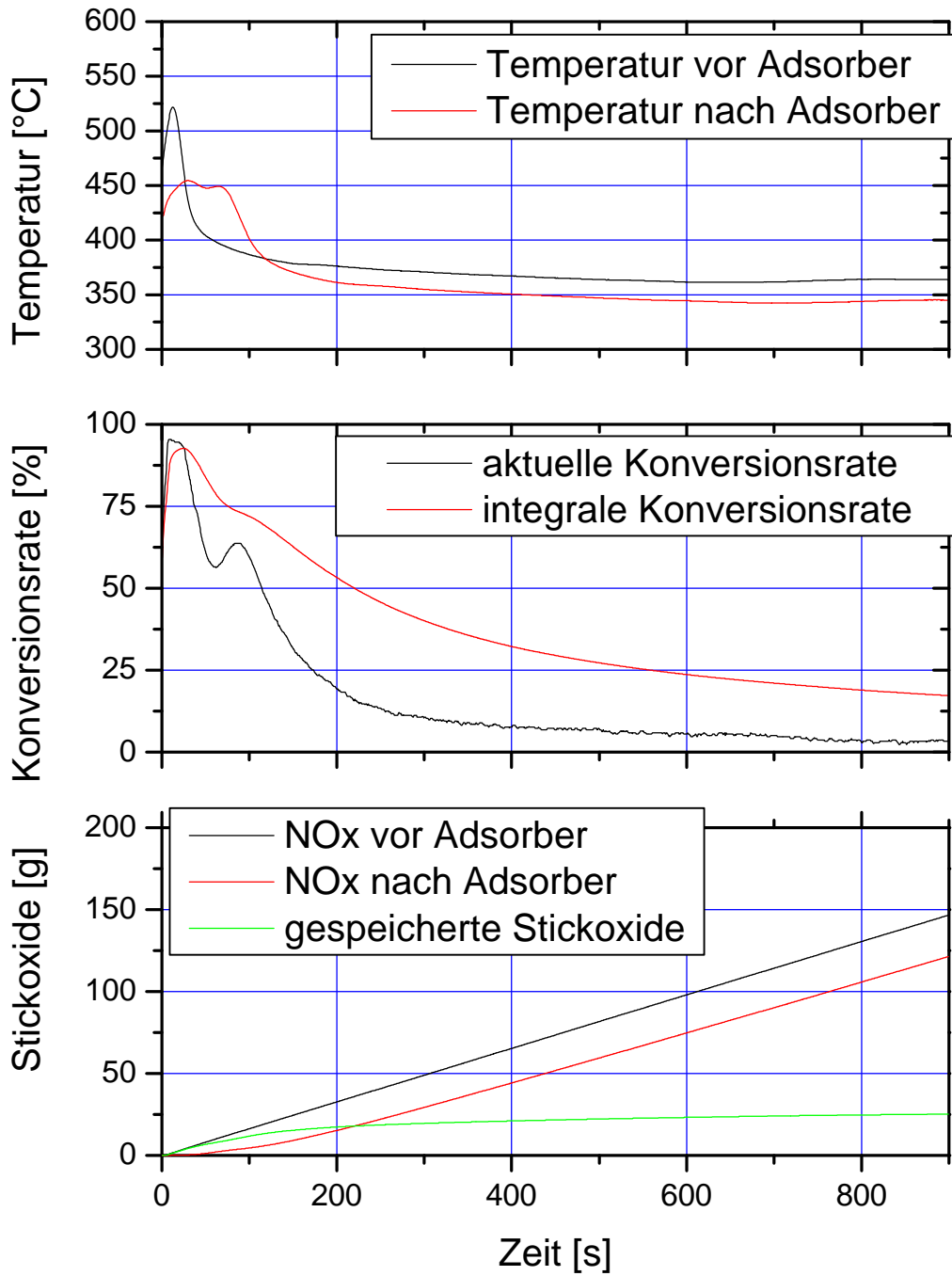


Abbildung 51: Vollspeicherkurve 1850 / 7,8bar

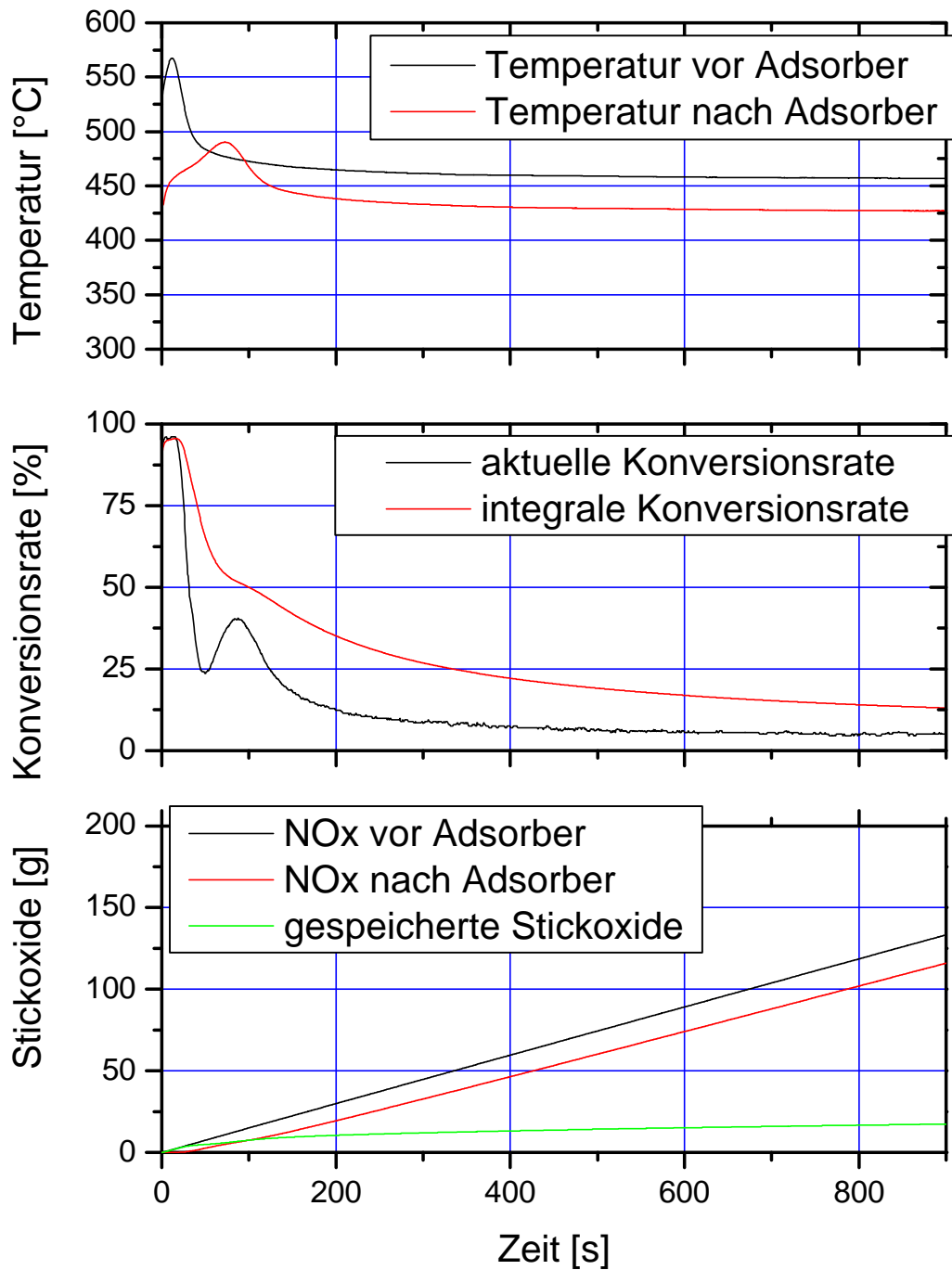


Abbildung 52: Vollspeicherkurve 1850 / 9,5bar

1.4 Arbeitspaket 4: Demonstrationsmotor

Im Rahmen der Darstellung eines Demonstrationsmotors wurden in Abstimmung mit dem Projektbetreuer aufgrund der beschränkten Projektrestlaufzeit die Schwerpunkte auf Untersuchungen am hochdynamischen Prüfstand in realen Fahrzyklen gelegt. Dabei wurde der Motor neben dem testrelevanten ESC auch in dem ebenfalls für Zertifizierungen in Europa vorgeschrieben ETC betrieben. Durch diese Vorgehensweise konnten auch ohne ein Demonstrationsfahrzeug die relevanten Aussagen bezüglich Emissionen, Kraftstoffmehrverbrauch und Besonderheiten der Anwendung der Adsorbertechnologie am Nutzfahrzeugmotor unter realitätsnahen Bedingungen ermittelt werden.

Die Abbildung 53 zeigt die Installation des Motors und der Abgasanlage auf dem Transient-Prüfstand.

Prüfstand und Emissionsmesssystem sind entsprechend den Vorschriften der EU aufgebaut und zertifiziert. Die Ansauglufttemperatur wird mit Hilfe einer Ansauglufttemperaturkonditionierung im vorgeschriebenen Bereich von 22 °C bis 28 °C gehalten. Die Temperaturkonditionierung des Dieselkraftstoffes vor dem Kraftstofffilter des Motors erfolgt mit Hilfe einer Kraftstoffkonditionierung. Der Motor wird über ein Getriebe von einer Gleichstrommaschine angetrieben bzw. belastet. Die Regelung der Motorkühlwassertemperatur erfolgt über das serienmäßige Thermostat. Die Ladelufttemperatur wird mit einem Wasser/Luft-Wärmetauscher eingestellt. Dazu wird die Vorlauftemperatur des zur Kühlung verwendeten Wassers in der Regel auf 25°C eingestellt. Die gewünschte Ladelufttemperatur wird bei Nennleistung über die Menge des Wasserdurchflusses eingeregelt. Die Einstellung des Ladeluftkühlers wird während der Testzyklen nicht mehr verändert.

Abbildung 54 zeigt schematisch die Darstellung der Vollstromverdünnungsanlage sowie der Partikelmessstrecke.

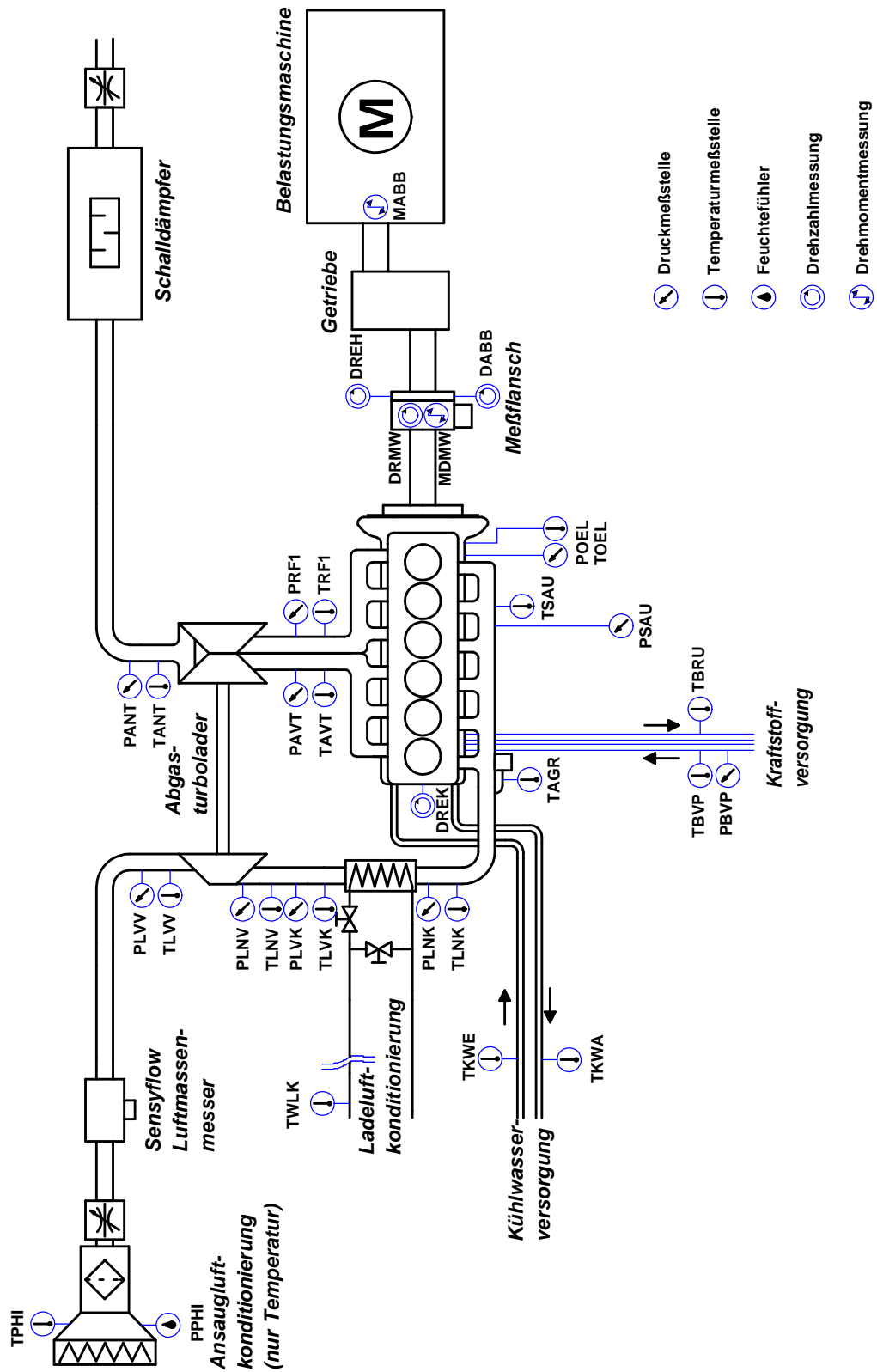


Abbildung 53: Aufbau und Messstellenplan

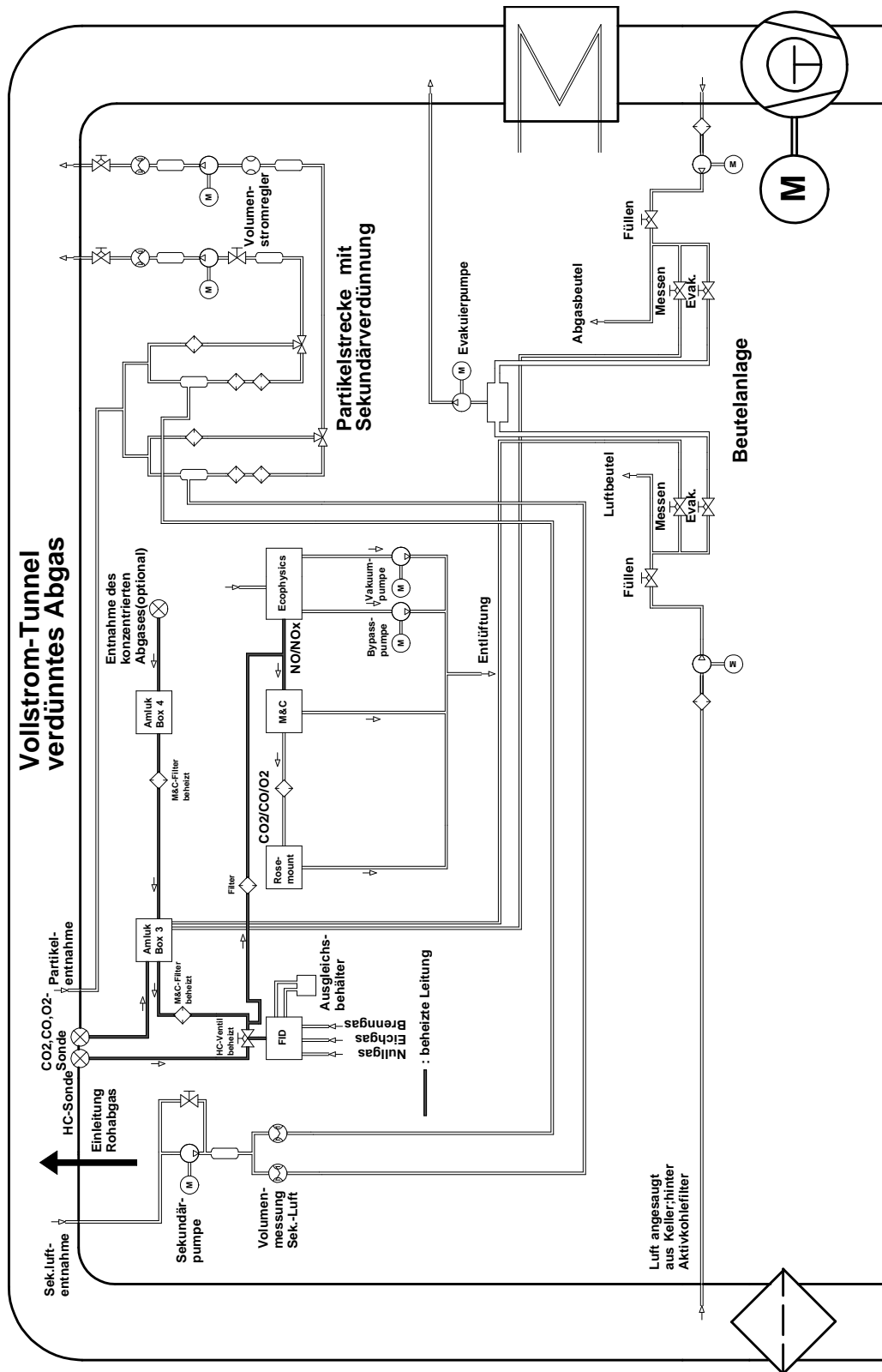


Abbildung 54: Vollstromverdünnungsanlage

Emissionsvorschrift European Transient Cycle (ETC)

Nach Aufbau und Inbetriebnahme des Motors am Transient-Prüfstand wird zunächst eine transiente Volllast aufgenommen, die zur Berechnung der für diesen Motor spezifischen Last- und Drehzahlwerte des europäischen Stationär- und des Transientzyklus notwendig ist. Dazu wird die Motordrehzahl vom Prüfstands-Leitrechner bei 100% Pedalstellung, beginnend mit der Leerlaufdrehzahl, um 8 Umdrehungen pro Sekunde gesteigert. Wird die gemäß Vorschrift ermittelte höchste Abbildungsdrehzahl erreicht, ist die Aufnahme der Volllast beendet.

Um ein lineares Motorverhalten während des transienten Zyklus zu gewährleisten, wird der Motor vom Leitreechner des Prüfstandes automatisch durch das gesamte Kennfeld gefahren, und in vordefinierten Stützstellen werden Drehzahl, Drehmoment und Pedalstellung aufgenommen. Dadurch wird eine Linearisierung des Motorverhaltens erreicht, die für die Regelung des transienten Zyklus bei dem verwendeten System notwendig ist. Drehzahl- und Drehmomentsollwerte werden vom Leitreechner aus den in der Vorschrift niedergelegten normierten Drehzahl/Drehmomentpaaren (Abbildung 55) und der zuvor aufgenommenen Volllast bestimmt. Die Sollwerte bestimmen sich aus folgenden Gleichungen:

$$\text{Solldrehzahl} = \text{Drehzahl in \%}/100 * (\text{Bezugsdreh. } (n_{ref}) - \text{Leerlaufdreh.}) - \text{Leerlaufdreh.}$$

wobei :

$$\text{Bezugsdrehzahl } n_{ref} = n_{lo} + 95 \% (n_{hi} - n_{lo})$$

$$\text{Solldrehmoment} = \text{Drehmoment in \%}/100 * \text{höchstes Drehmoment bei Solldrehzahl}$$

Entsprechend den Testvorschriften soll der Motor vor dem eigentlichen Emissionstest bei Nennleistung vorkonditioniert werden. Danach beginnt der 1800s lange Testzyklus. Nach dem Test wird die vorgeschriebene Qualitätskontrolle hinsichtlich des Folgeverhaltens des Motors für Drehzahl, Drehmoment und Leistung durchgeführt, um ungültige Tests ausschließen zu können.

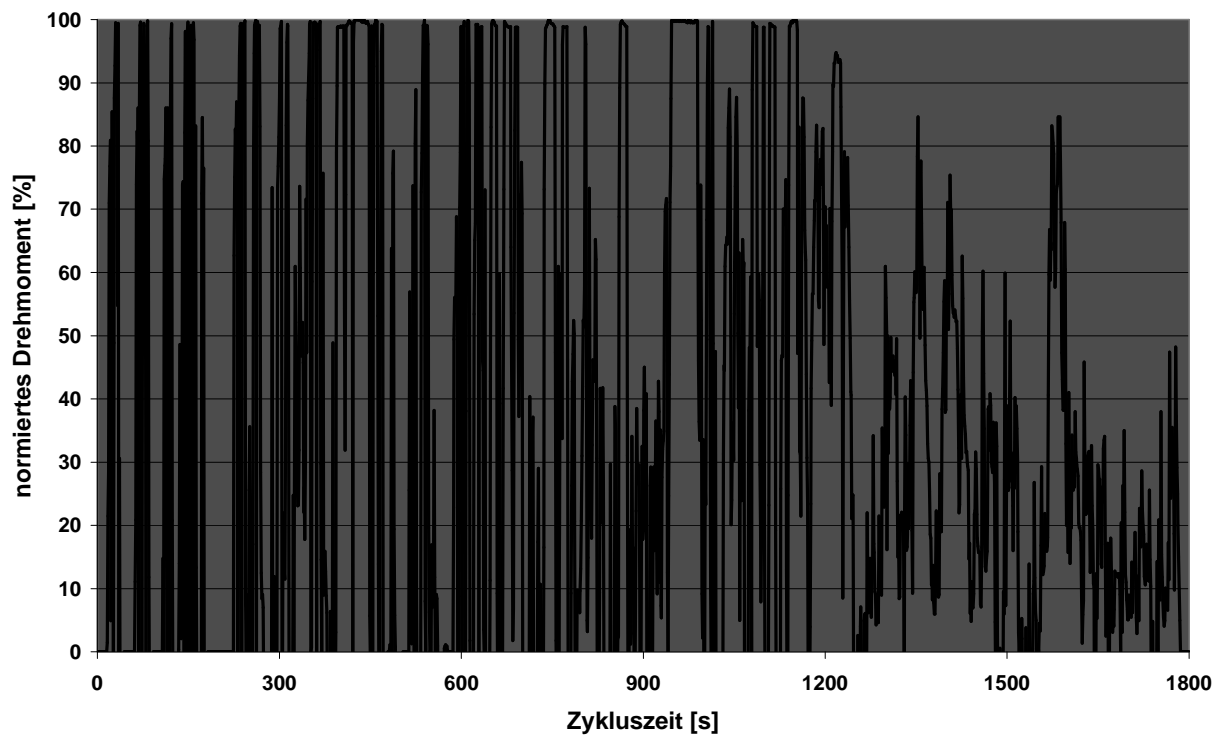
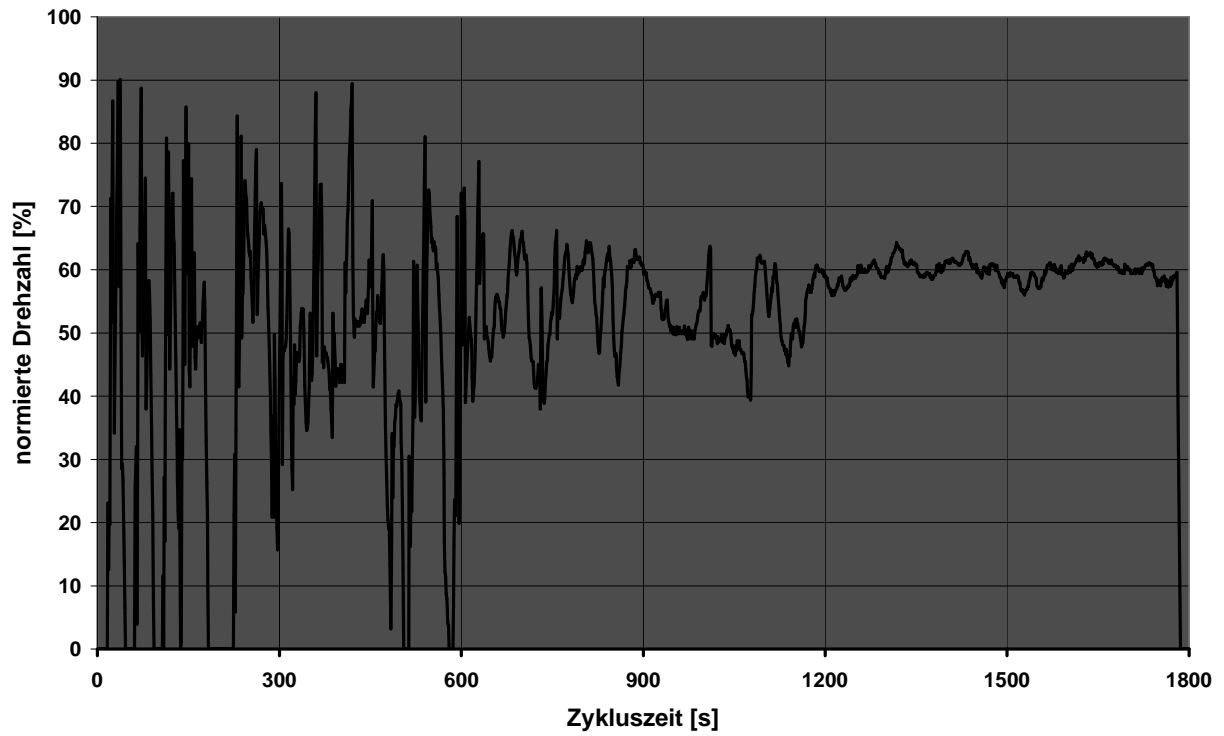


Abbildung 55: ETC-Test in normierter Form

Im Rahmen der Untersuchungen am Transienten Prüfstand wurde zunächst die Basis mit Oxidationskatalysator im ESC und ETC vermessen. Als nächster Schritt wurde der Adsorber eingebaut und ohne aktive Regeneration betrieben.

Diese Varianten sind in **Abbildung 56** und **Abbildung 57** als Basis dargestellt. Anschließend wurde zunächst zwei Varianten mit ausschließlich interner Regeneration vermessen. Hierbei wurde die Regeneration nur im Bereich der mit interner Anfettung kalibrierten Kennfeldbereiche zugelassen, d.h. die Messpunkte mit 75% und 100% Last wurden ohne Regeneration durchfahren. Mit dieser Regenerationsstrategie konnte eine Reduktion der Stickoxidemission von rund 20% erzielt werden. Mit Einsatz der externen Nacheinspritzung und der damit einhergehenden Reduktion auch in den 75% und 100% - Punkten konnte die Reduktionsrate auf über 80% gesteigert werden. Dabei stiegen jedoch abhängig von der Regenerationsgüte die HC-Emissionen stark an, was einen überproportionalen Anstieg der Partikelemissionen zur Folge hatte.

Abbildung 58 zeigt die erreichten Stickoxid-Reduktionsraten in den einzelnen Messpunkten des ESC.

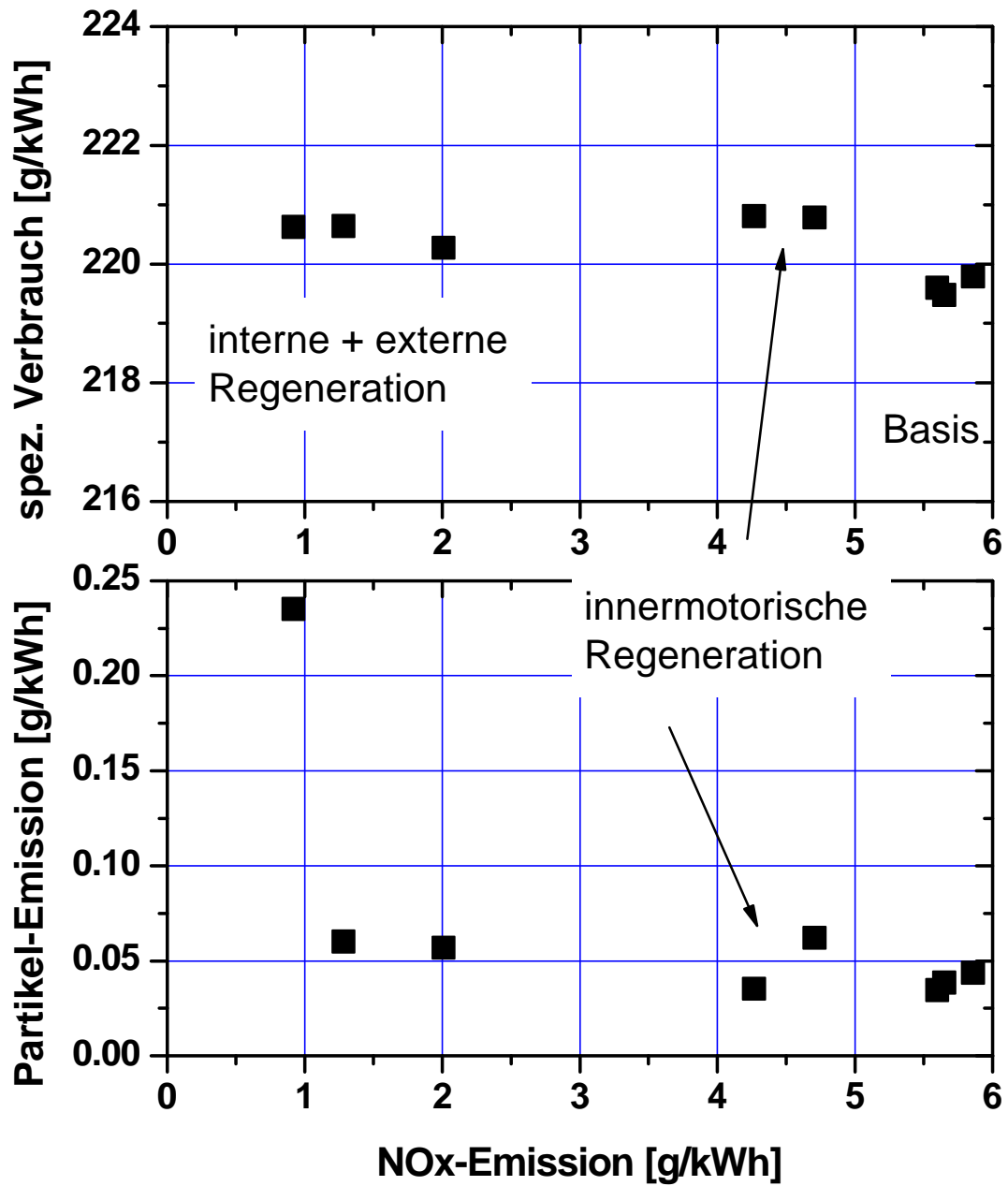


Abbildung 56: Verbrauch und Emissionen im ESC

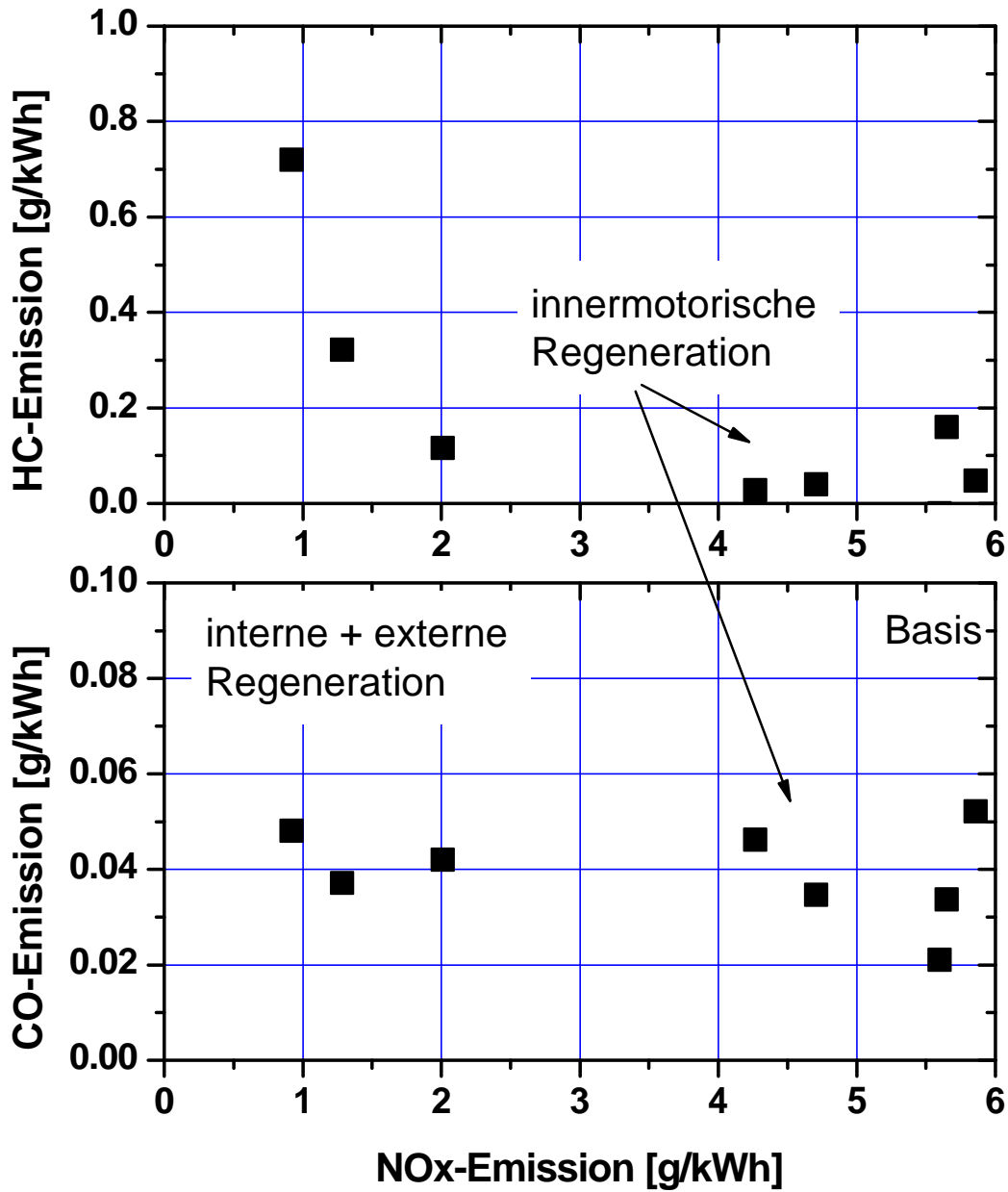


Abbildung 57: Emissionen im ESC

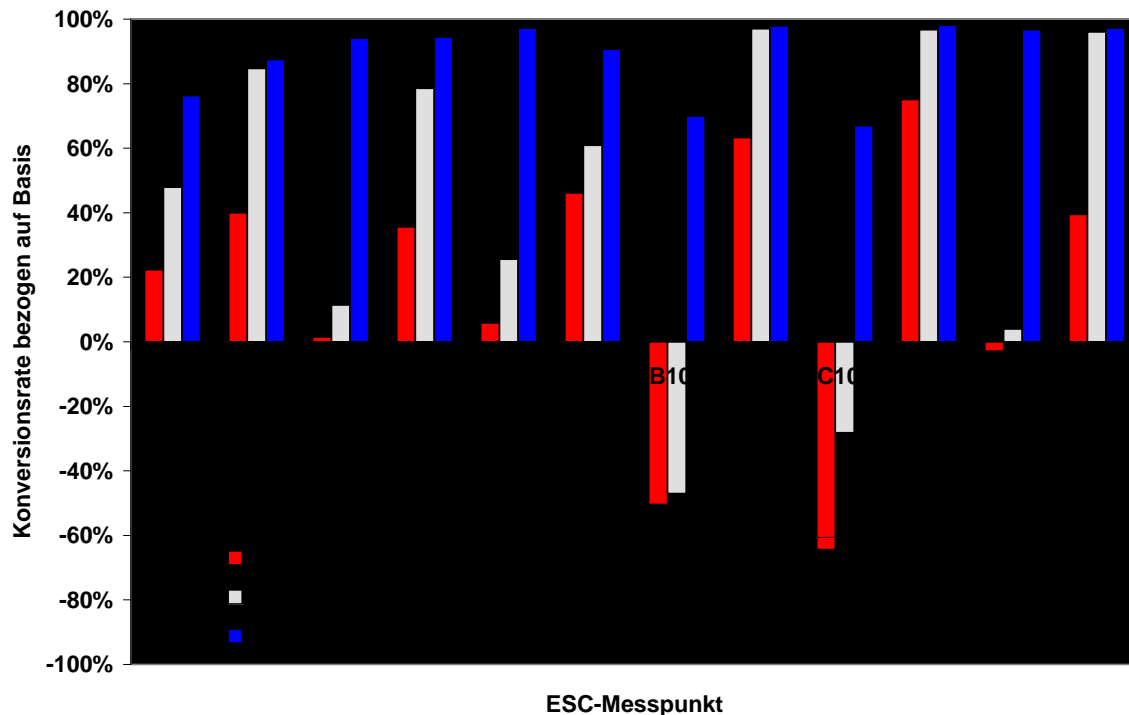


Abbildung 58: Stickoxid-Reduktionsraten in den einzelnen ESC-Stufen

Im ETC wurde ebenfalls zunächst eine Basisvermessung mit und ohne Speicherkatalysator durchgeführt. Durch die vor dem Test durchgeführte Konditionierung wurde der Speicherkatalysator entleert, so dass durch Einbau des Speicherkatalysators bereits Reduktionsraten von rd. 30% erreicht wurden. Dabei war jedoch eine Sättigung des Katalysators am Ende des Tests zu verzeichnen.

Durch den Einsatz der Regeneration konnten die Reduktionsraten bis auf rd. 50% erhöht werden, wobei zudem keine nennenswerte Beladung des Speicherkatalysators bei Testende zu verzeichnen war. Die Ergebnisse sind in **Abbildung 59** und **Abbildung 60** dargestellt, **Abbildung 61** zeigt den Emissionsverlauf der Emissionen vor und nach Adsorber im ETC. Festzustellen ist, dass der Wirkungsgrad im gesamten ETC etwa bei 50% liegt. Anhand der Zyklusemissionen konnte gezeigt werden, dass eine Emissionsminderung im typischen realen Fahrbetrieb gewährleistet werden kann.

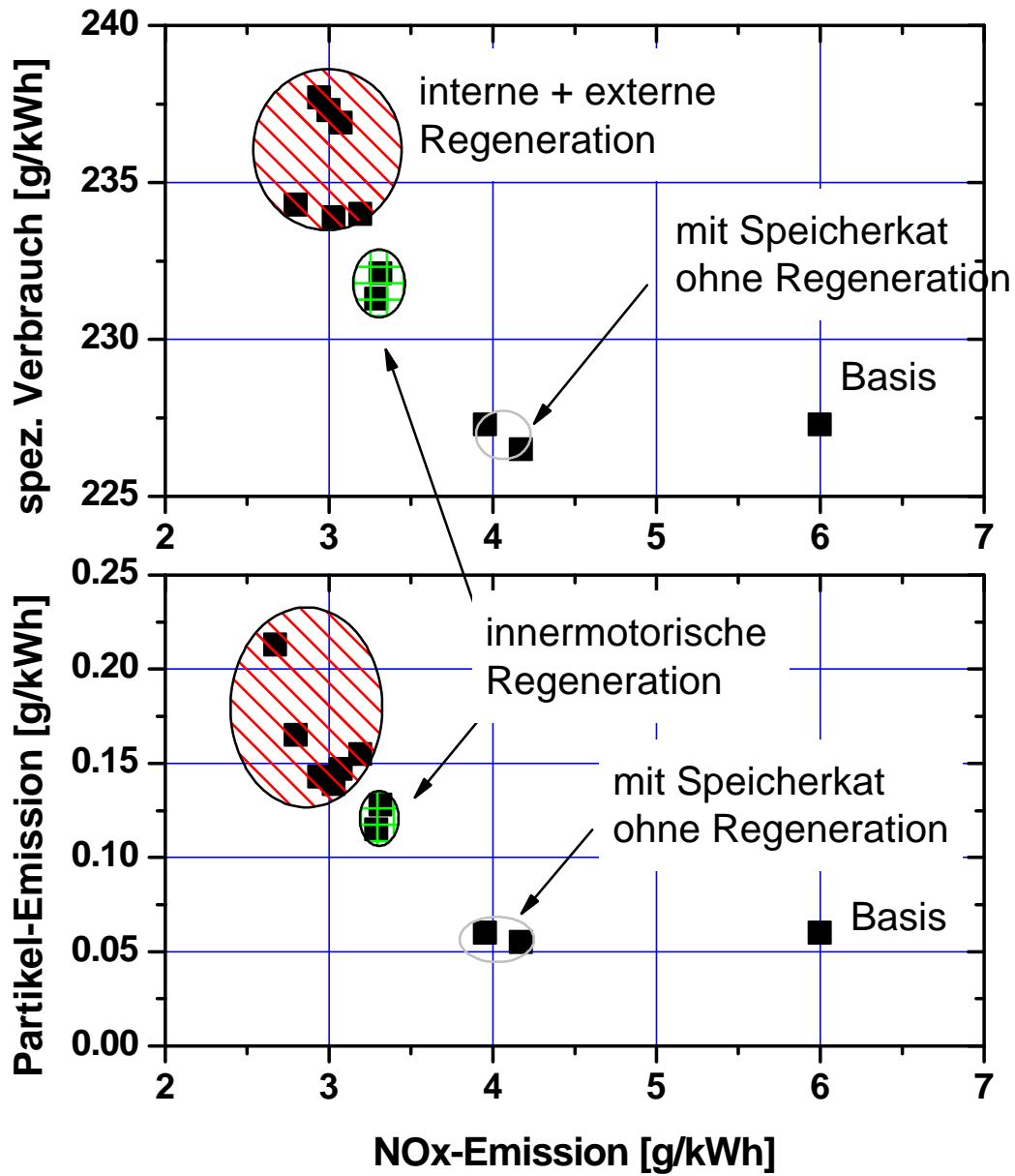


Abbildung 59: Verbrauch und Emissionen im ETC

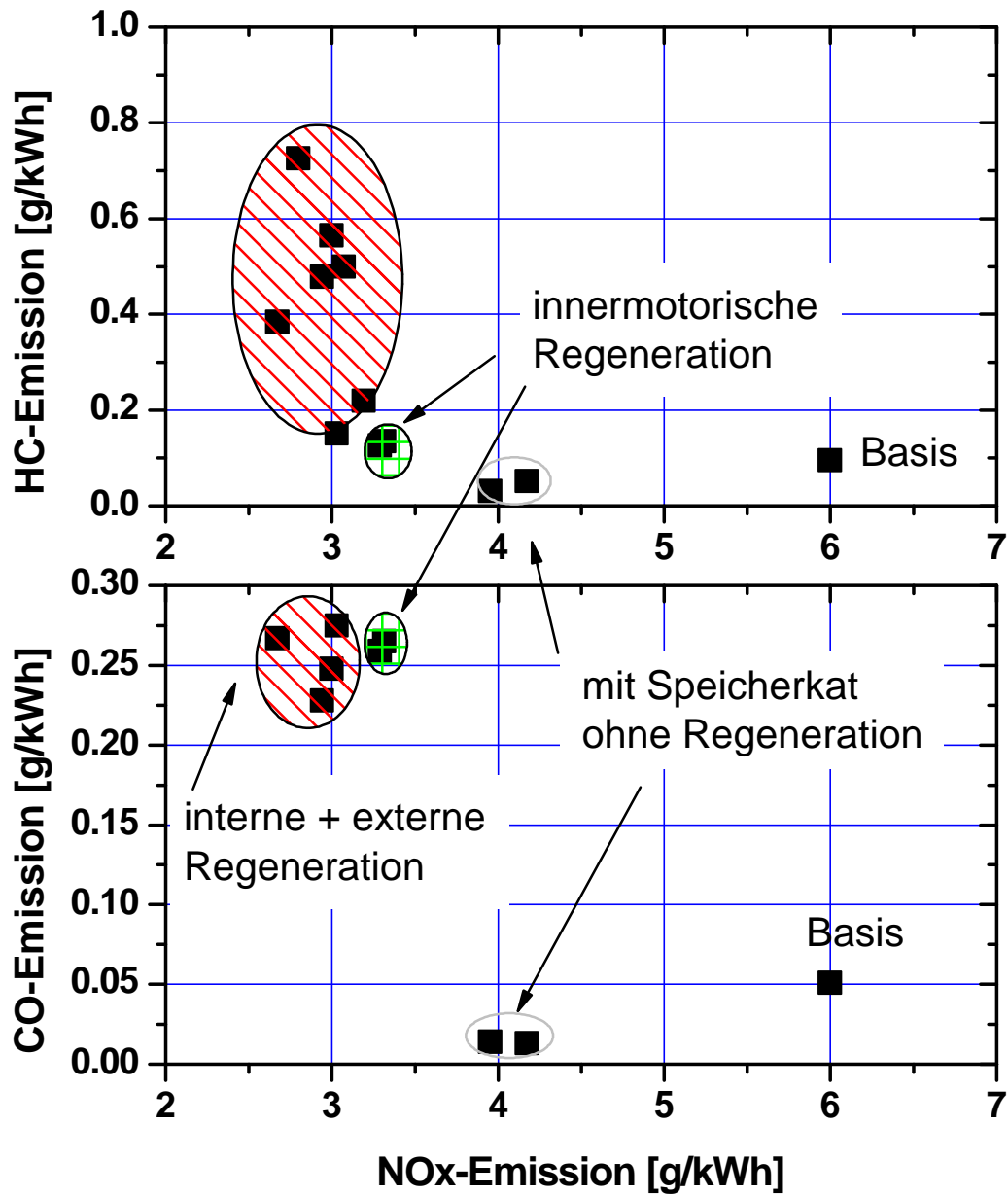


Abbildung 60: Emissionen im ETC

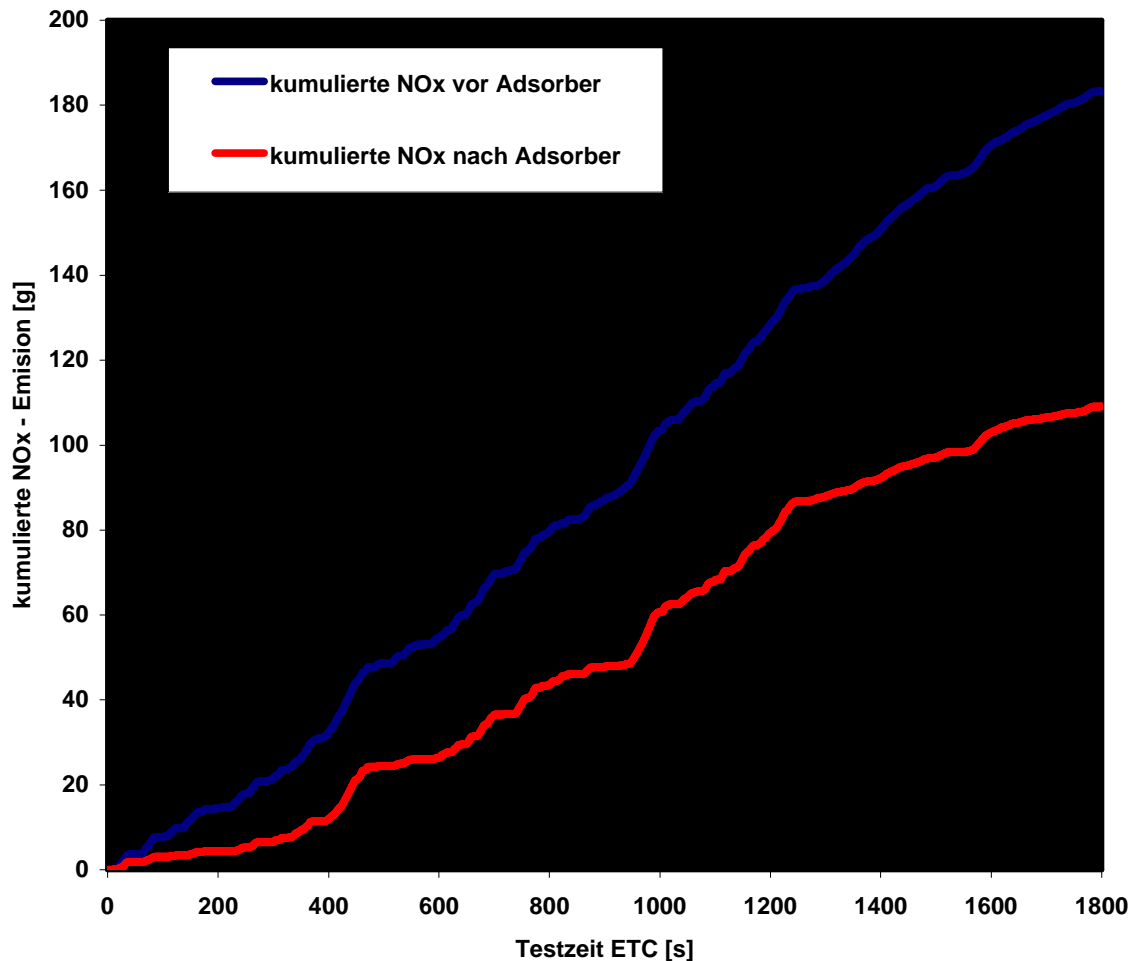


Abbildung 61: Emissionsverlauf Stickoxide im ETC vor und nach Adsorber

Schlussfolgerungen

Eine NO_x-Adsorberregeneration nur mit innermotorischen Maßnahmen ermöglicht eine Stickoxidreduktion im ESC von ca. 20 % bei dem verwendeten Prototypmotor. Nachteilig hierbei ist, dass oberhalb von ca. 50 % keine Regeneration erfolgt und der Motor nach der Sättigung des NO_x-Adsorbers die Rohemission emittiert.

Eine Regeneration des NO_x-Adsorbers im gesamten Motorkennfeld durch die Kombination von innermotorischen Maßnahmen und externen Regenerationsmaßnahmen ermöglicht NO_x-Reduktionsraten von ca. 80 % im ESC und ca. 50 % im ETC bei moderatem Kraftstoffverbrauch von unter 1 % im ESC bzw. 4 % im ETC, gemessen nach den Testregeln. Damit sind die in der Diskussion befindlichen EURO V-Grenzwerte für NO_x auch mit dem eingesetzten Motor erreichbar.

Verbesserungspotential ist dabei noch im Brennverfahren enthalten wie die 1Zylinderergebnisse zeigen.

Dagegen scheint es auch bei verbessertem Brennverfahren sehr schwierig, die Partikelgrenzwerte EURO V ohne Partikelfilter zu erreichen, bedingt durch den Anstieg der Partikelemission bei der innermotorisch durchgeführten NO_x-Adsorberregeneration.

Muß aber ein Partikelfilter eingesetzt werden, kann durch eine partikellastige Motorabstimmung die Motor-NO_x-Emission verringert und damit auch die Verbrauchsverschlechterung durch Verringerung der Adsorberregeneration abgesenkt werden.

Die auftretenden Temperaturen stellen hinsichtlich des Serieneinsatzes ein Problem dar, hier ist einerseits eine Verbesserung der thermischen Belastbarkeit von Abgasturbolader und Katalysatoren notwendig. Andererseits erscheint der Ersatz der eingesetzten externen Regeneration mittels externer Nacheinspritzung durch einen kontinuierlich arbeitenden Reformer, der entsprechendes Reduktionsmittel in Form von CO und H₂ bereitstellen kann sinnvoll. Mit dem Reformereinsatz könnten insbesondere die Temperaturspitzen, die im Oxidationskatalysator auftreten verhindert werden.

Für den Einsatz in Fahrzeugen mit Niedriglastbetrieb wie beispielsweise Stadtbusse, aber auch Verteilerfahrzeuge konnte das Adsorbersystem als geeignete Maßnahme zur Erreichung der zukünftigen Emissionsgrenzwerte erarbeitet werden, die Temperaturproblematik wirkt sich hier aufgrund des Lastprofils entsprechend geringer aus.

Ein weiteres Problem stellt die Verschwefelung der Adsorberkatalysatoren dar, die vom Gesetzgeber eingeleiteten Maßnahmen zur drastischen Reduktion des Kraftstoffschwefelgehaltes erweitern hier jedoch deutlich das notwendige Entschwefelungsintervall. Die Entschwefelung ist mit den dargestellten Motorbetriebszuständen (stöchiometrischer und unterstöchiometrischer Betrieb bei Temperaturen von ca. 750°C am Adsorber) ebenfalls möglich.

2. des voraussichtlichen Nutzens, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen

Die gewonnenen Erkenntnisse konnten bereits während der Projektlaufzeit zur Akquisition genutzt werden. Zielgruppe sind hierbei die Hersteller von NFZ Motoren für den Stadtbuss und Verteilerverkehr, da die Adsorber - Technologie sich insbesondere zum Einsatz in Fahrzeugen mit niedrigem Lastprofil eignet.

Vorwiegend Deutsche Hersteller von Stadtbussen bzw. deren Motoren, Verteilerfahrzeugen und leichten NFZ sind die Zielgruppe für die Verwertung der Ergebnisse. Daneben bahnen sich weitere kommerzielle Projekte mit europäischen Herstellern an.

Insbesondere im Bereich leichte NFZ besteht zusätzlich enger Kontakt mit potentiellen Kunden in den USA

Die externe Nacheinspritzung konnte zusätzlich erfolgreich im Zusammenhang mit der Regeneration von Partikelfiltern vermarktet werden und hat ihre Eignung in mehreren Projekten bereits unter Beweis gestellt.

3. des während der Durchführung des Vorhabens dem Zuwendungsempfänger bekannt gewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Während der Projektlaufzeit wurde intensive Forschung auf dem Gebiet der Adsorbertechnologie gerade zum Einsatz in Dieselmotoren betrieben und entsprechende Ergebnisse wurden veröffentlicht. Ausgehend von den Katalysatorherstellern wurden neue Beschichtungsformulierungen mit dem Ziel eines größeren Speichertemperaturbereiches entwickelt, die zudem eine erhöhte thermische Stabilität aufweisen und bei niedrigeren Temperaturen zu desulfatisieren sind. Von OMG wurden Ergebnisse mit solchen Katalysatorformulierungen auf dem ‚11. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, 2002‘ vorgestellt, die den bisher bekannten Speicherbereich deutlich ausweiten und dabei die thermischen Schädigungseffekte durch die Desulfatisierungsvorgänge verringern. Daraus können die intensiven Bemühungen zur Erreichung der Serienreife der Adsorbensysteme abgeleitet werden.

Von der amerikanischen Umweltbehörde EPA wurde ein Konzept mit NOx-Speicher-katalysator und Partikelfilter in ‚SAE 2001-01-1351‘ vorgestellt. Damit konnten die Emissionen eines US'99 Motor auf die US'04 Standards reduziert werden. Das dabei eingesetzte zweiflutige System war jedoch insbesondere durch einen sehr hohen Bauraum und Regelungsaufwand mit Drosselklappen im Abgassystem gekennzeichnet. Damit konnte das Potenzial der Technologie nachgewiesen werden, für den Serieneinsatz ist jedoch eine Bauraumreduktion sowie eine Kostenabsenkung notwendig.

Von Renault Trucks wurde auf dem ‚24. Internationales Wiener Motorensymposium, 2003‘ ebenfalls eine Lösung für NFZ-Motoren vorgestellt, bei der eine Kombination von Partikelfilter und NOx-Speicher-katalysator zum Einsatz kam. Die Untersuchungen wurden dabei am IFP in einem geförderten Projekt durchgeführt. Damit konnten die Emissionsgrenzwerte EURO V unter Nutzung eines Motors mit dem Rohemissionsniveau EURO III erreicht werden. Signifikant war dabei ein relativ geringes Mitteldruckniveau des Motors, das nicht dem heutigen Serienstand entspricht. FEV konnte im Rahmen des Vorhabens das Technologieniveau im Bereich der internen Regeneration im Vergleich zu den neuesten Veröffentlichungen verbessern und zusätzlich Erfahrungen im externen Regenerationsbetrieb erlangen und darstellen.

Als Alternative zum Adsorberverfahren ist das SCR-Verfahren zu sehen. Dies weist aber aufgrund des niedrigen Abgastemperaturniveaus NOx-Reduktionsnachteile im Teillastbereich und Vorteile im Vollastbereich auf. Die Bauraumnachteile des SCR-Verfahrens, bedingt durch das Volumen für den flüssigen Harnstoff, können mit einem Feststoff-SCR-System gemindert werden. Veröffentlicht wurde diese Technologie in ‚Feststoff SCR - Eine Alternative zum Harnstoffsystme?‘ auf dem ‚10. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik 2001‘ Aachen, 2001

4. der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung des Ergebnisses

Teile der Ergebnisse wurden in den Veröffentlichungen ‚US 2007 – What way to go‘, SAE 2003-770, SAE World Congress, Detroit, 2003 und ‚Stickoxidminimierung beim NFZ-Dieselmotor‘, 12. Aachener Kolloquium Fahrzeug und Motorentechnik, Aachen, 2003 publiziert. Daneben ist die Veröffentlichung in Form einer Dissertation ‚Grundsatzuntersuchungen zum Einsatz eines NOx-Adsorbers am NFZ-Dieselmotors‘ vorgesehen.