

Andreas Hertzberg

**Betriebsstrategien für einen
Ottomotor mit Direkteinspritzung
und NOx-Speicher-Katalysator**

2001

Betriebsstrategien für einen Ottomotor mit Direkteinspritzung und NOx-Speicher-Katalysator

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe (TH)

genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Andreas Hertzberg

aus Stuttgart

Tag der mündlichen Prüfung:	07.05.2001
Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. U. Spicher
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. W. Müller

Vorwort

Die in der vorliegenden Arbeit beschriebenen Untersuchungen wurden in den Jahren 1996 bis 2000 in der DaimlerChrysler Forschung, Abteilung FT1/MP, in Stuttgart durchgeführt. In diesem Zusammenhang danke ich den Herren Dipl.-Ing. Christian Enderle und Dipl.-Ing. Guido Vent herzlich dafür, daß sie die Durchführung dieser Untersuchungen ermöglicht haben.

Ein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Ulrich Spicher, Leiter des Instituts für Kolbenmaschinen der Universität Karlsruhe, für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Werner Müller aus der Arbeitsgruppe Verbrennungskraftmaschinen an der Universität Kaiserslautern für seine Bereitschaft, das Korreferat zu übernehmen.

Bei allen meinen Kollegen möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit und die vielen wertvollen Diskussionen bedanken. Hervorheben möchte ich hier die Herren Dr.-Ing. Dirk Voigtländer, Dipl.-Ing. Walter Boegner und Dr.-Ing. Johannes Ernst. Ein Dank gilt auch Herrn Dr.-Ing. Rolf Klenk, ohne dessen konstruktive Arbeiten der eingesetzte Versuchsmotor nicht verfügbar gewesen wäre.

Schließlich bedanke ich mich noch bei den Herren Heiner Kullen, Gijs Walenkamp, Bernd Kurz, Bernhard Pins, Thomas Albrecht und Daniel Streu, die als Diplomanden und Praktikanten eine wertvolle Unterstützung für mich waren.

Stuttgart, im Mai 2001

Andreas Hertzberg

Gliederung

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	2
2.1 Emissionen bei der motorischen Verbrennung	2
2.1.1 Grundlagen der motorischen Verbrennung	2
2.1.2 Entstehung und Eigenschaften schädlicher Abgaskomponenten	3
2.1.3 Abgasgesetzgebung	5
2.2 Ottomotor mit Direkteinspritzung	7
2.2.1 Betriebsarten	7
2.2.2 Vor- und Nachteile der Direkteinspritzung	10
2.2.3 Rohemission im Vergleich zum konventionellen Ottomotor	11
2.2.4 Entwicklungsgeschichte der Benzin-Direkteinspritzung	12
2.3 Systeme zur Abgasnachbehandlung	13
2.3.1 Drei-Wege-Katalysator	13
2.3.2 Stickoxid-Minderung bei sauerstoffhaltigem Abgas	14
2.3.2.1 Passive SCR-Verfahren	14
2.3.2.2 Aktive SCR-Verfahren	15
2.3.2.3 NO _x -Speicher-Katalysatoren	15
2.3.3 Abgasnachbehandlung beim Ottomotor mit Direkteinspritzung	17
3. NO_x-Speicher-Katalysatoren - Stand der Technik	18
3.1 Parameter im Mager/Fett-Betrieb	18
3.2 Thermische Alterung	19
3.2.1 Alterung von NO _x -Speicher-Katalysatoren	19
3.2.2 Maßnahmen zur Verringerung thermischer Alterung	20
3.3 Schwefelproblematik	20
3.3.1 Schwefelvergiftung	20
3.3.2 Desulfatisierung	22
3.4 Motorsteuerung für einen Ottomotor mit Direkteinspritzung und NO _x -Speicher-Katalysator	25
3.4.1 Betriebsartwechsel für Nitrat-Regenerationen	25
3.4.2 Regelung des Luftverhältnisses bei Betrieb mit $\lambda < 1$	26
3.4.3 Regelung des Mager/Fett-Betriebs	26
3.4.3.1 Wahl der Zeitpunkte für Nitrat-Regenerationen	26
3.4.3.2 Regelung der Regenerationsdauer	28
3.4.4 Durchführung von Desulfatisierungen	29
3.4.5 Diagnose des Katalysatorzustands	30
3.4.6 Erforderliche Sensorik	31
4. Aufgabenstellung	33

5. Versuchsumgebung und Versuchsdurchführung	35
5.1 Versuchsträger	35
5.1.1 Versuchsmotor	35
5.1.2 Versuchsfahrzeug	37
5.2 Motorsteuerung	37
5.2.1 Basis-Steuergerät	37
5.2.2 Bypass-Steuergerät	38
5.2.3 Sensorik nach NO _x -Speicher-Katalysator	39
5.2.3.1 NO _x -Sensor mit integrierter Breitband-Lambdasonde	39
5.2.3.2 Binäre Lambdasonde	40
5.2.4 Betriebsartwechsel für eine Nitrat-Regeneration	41
5.2.5 Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Nitrat-Regenerationen	42
5.3 Abgasanlage	42
5.3.1 Konfiguration der Abgasanlage	42
5.3.2 Untersuchte Katalysatoren	43
5.4 Meßtechnik	44
5.4.1 Motorprüfstand	44
5.4.2 Rollenprüfstand	48
5.5 Versuchsdurchführung	49
5.5.1 Untersuchungen auf dem Motorprüfstand	49
5.5.2 Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand	50
5.6 Auswertung	51
5.6.1 Berechnung von Abgasmassenströmen	51
5.6.2 Beschreibung der Katalysator-Effektivität	51
6. Strategie zur Nitrat-Regeneration von NO_x-Speicher-Katalysatoren	53
6.1 Grundlegende Untersuchungen zur Nitrat-Regeneration	54
6.1.1 Emissionsverläufe bei der Nitrat-Regeneration	54
6.1.2 Einfluß der Adsorptions- und Regenerationsdauer	55
6.1.3 Einfluß des Luftverhältnisses bei der Nitrat-Regeneration	58
6.1.4 Optimierungsbedarf bei der Nitrat-Regeneration	61
6.2 Regelung des Mager/Fett-Betriebs zur Nitrat-Regeneration	61
6.2.1 Regelung der Adsorptionsdauer mit Hilfe eines NO _x -Sensors	61
6.2.2 Regelung der Regenerationsdauer mit Hilfe einer Lambdasonde	63
6.2.2.1 Verhalten von Lambdasonden nach NO _x -Speicher-Katalysator ...	63
6.2.2.2 Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei Regelung der Regenerationsdauer	64
6.2.2.3 Einfluß des Katalysatortyps und -zustands auf das Verhalten der Lambdasonden	67
6.3 Optimierung des Reduktionsmittelangebots	67
6.3.1 Optimierung des Luftverhältnisses bei der Regeneration	68
6.3.2 Regeneration vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb	70

6.4 Einfluß der Motorabstimmung	73
6.4.1 NO _x -Rohemission	73
6.4.2 Betriebsbereich mit Magerbetrieb	75
6.5 Fahrzeugtests mit optimierter Strategie	77
6.5.1 Warmtests im Neuen Europäischen Fahrzyklus	78
6.5.1.1 Vergleich der verschiedenen Regenerationsstrategien	79
6.5.1.2 Vergleich der verschiedenen Betriebsarten	81
6.5.1.3 Analyse einzelner Nitrat-Regenerationen im NEFZ-Warmtest	83
6.5.1.4 Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Nitrat-Regenerationen im NEFZ-Warmtest	84
6.5.1.5 Untersuchungen bei vergrößertem Betriebsbereich mit Magerbetrieb	87
6.5.2 Kalttests im Neuen Europäischen Fahrzyklus	89
6.5.3 Ansatzpunkte zur weiteren Optimierung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch	92
7. Strategie zur Desulfatisierung von NO_x-Speicher-Katalysatoren	94
7.1 Grundlegende Untersuchungen	95
7.1.1 Schädigung des NO _x -Speicher-Katalysators durch Schwefel	95
7.1.1.1 Größen zur Beschreibung der NO _x -Speicherfähigkeit	95
7.1.1.2 Vorgehensweise bei der Verschwefelung	96
7.1.1.3 Zusammenhang zwischen gespeicherter Schwefelmasse und Verschlechterung des NO _x -Speicherverhaltens	96
7.1.2 Verschiedene Verfahren zur Desulfatisierung	97
7.1.2.1 Versuchsdurchführung	97
7.1.2.2 Untersuchungen mit konstantem Luftverhältnis	98
7.1.2.3 Untersuchungen mit periodisch wechselndem Luftverhältnis	102
7.1.2.4 Zusammenhang zwischen dem Luftverhältnis nach NO _x -Speicher- Katalysator und der Wirksamkeit der Desulfatisierung	105
7.1.3 Untersuchungen zur Dauer der Desulfatisierung	107
7.1.3.1 Erforderliche Dauer zur vollständigen Desulfatisierung	107
7.1.3.2 Verhalten bei sehr kurzer Desulfatisierungsdauer	108
7.1.4 Bewertung der untersuchten Verfahren zur Desulfatisierung	110
7.2 Entwicklung einer Strategie zur Desulfatisierung	111
7.2.1 Luftverhältnis bei der Desulfatisierung	111
7.2.1.1 Optimales Luftverhältnis	111
7.2.1.2 Vollast-Anfettung während einer Desulfatisierung	112
7.2.2 Katalysator-Temperatur bei der Desulfatisierung	113
7.2.2.1 Optimale Katalysator-Temperatur	113
7.2.2.2 Katalysator-Temperaturen im realen Fahrbetrieb	113
7.2.2.3 Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung	114
7.2.3 Dauer der Desulfatisierung	117
7.2.3.1 Optimale Dauer	117
7.2.3.2 Fahrzustandsbedingte Unterbrechung der Desulfatisierung	117

7.2.4 Intervalle zwischen den Desulfatisierungen	118
7.2.4.1 Zielkonflikt bei der Optimierung	118
7.2.4.2 Strategie mit zwei verschiedenen Desulfatisierungsprozeduren	119
7.2.4.3 Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Desulfatisierungen	122
7.2.5 Minimierung der H ₂ S-Emission durch Lufteinblasung	123
7.3 Desulfatisierung im realen Fahrbetrieb	124
7.3.1 Abschätzung der Geruchsbildung durch die H ₂ S-Emission	124
7.3.2 Elemente einer optimierten Desulfatisierungsstrategie	126
7.3.3 Desulfatisierungen auf dem Rollenprüfstand	127
7.3.4 Einfluß von schwefelarmem Kraftstoff auf die Desulfatisierungs- strategie	132
8. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	133
9. Literaturverzeichnis	136
10. Abkürzungen und Formelzeichen	151
Anhang	154

1. Einleitung

Verbrennungsmotoren werden bereits seit über 100 Jahren als Antriebe für Fahrzeuge genutzt. Hierbei weisen Dieselmotoren meist einen höheren Wirkungsgrad und damit einen geringeren spezifischen Kraftstoffverbrauch auf als Ottomotoren. Ein geringer Kraftstoffverbrauch führt zu einer geringen CO₂-Emission, da diese direkt proportional zur eingesetzten Kraftstoffmenge ist. CO₂ ist zwar ungiftig, steht aber im Verdacht, maßgeblich zur prognostizierten globalen Erwärmung beizutragen. Vor diesem Hintergrund haben sich die Mitglieder des Verbands der europäischen Automobilhersteller (ACEA) verpflichtet, den durchschnittlichen Kraftstoffverbrauch der neuzugelassenen PKW bis zum Jahr 2008 gegenüber dem Durchschnittswert von 1990 um 25 % zu senken [1, 2, 3]. In Europa wurde das Bewußtsein für den Kraftstoffverbrauch auch durch gestiegene Kraftstoffpreise und die Diskussion um das „3-Liter-Auto“ verstärkt.

Ottomotoren haben zwar in der Regel einen höheren spezifischen Kraftstoffverbrauch als vergleichbare Dieselmotoren, bieten aber den Vorteil eines geringeren konstruktiven Aufwands, einer höheren Leistungsdichte und besserer Komforteigenschaften. In Anbetracht dieser Vorteile werden verschiedene Technologien diskutiert, um auch den Kraftstoffverbrauch von Ottomotoren weiter zu verbessern. Unter ihnen wird die Benzin-Direkteinspritzung als die Einzelmaßnahme mit dem höchsten Potential angesehen [1, 4]. Derzeit arbeiten zahlreiche Automobilhersteller an dieser Technologie.

Neben dem Streben nach einem möglichst geringen Kraftstoffverbrauch wird die Entwicklung von Verbrennungsmotoren für Fahrzeuge heute vor allem durch gesetzlich vorgeschriebene Abgasgrenzwerte geprägt. Weltweit gibt es unterschiedliche Gesetzgebungen zur Limitierung der im Abgas von Verbrennungsmotoren enthaltenen Schadstoffe. Allen gemeinsam ist eine auch in Zukunft fortgesetzte stetige Absenkung der Grenzwerte. Diese Anforderungen können nur durch Optimierung des Gesamtsystems aus motorischer Verbrennung, Abgasnachbehandlungssystem und Motormanagement erfüllt werden. Als weitere Herausforderung werden auch an die Dauerhaltbarkeit von Abgasnachbehandlungssystemen immer höhere Ansprüche gestellt [3, 5].

Die Emissionen von konventionellen Ottomotoren können durch Abgasnachbehandlung mit einem Drei-Wege-Katalysator sehr wirkungsvoll verringert werden. Dies ist jedoch bei mit Luftüberschuß betriebenen Ottomotoren mit Direkteinspritzung nur eingeschränkt möglich. Daher sind neue Systeme zur Abgasnachbehandlung erforderlich, wobei für mittelfristige Anwendung nur der NOx-Speicher-Katalysator als geeignet angesehen wird [2, 6]. Um geringe Emissionen bei geringem Kraftstoffverbrauch zu erreichen, erfordert dieser Katalysatortyp ein optimiertes Zusammenwirken von Motorsteuerung und Katalysator [7]. Für die Motorsteuerung sind daher neue, katalysatorspezifische Funktionen zu entwickeln. Die vorliegende Arbeit leistet hierzu einen Beitrag.

2. Grundlagen

2.1 Emissionen bei der motorischen Verbrennung

2.1.1 Grundlagen der motorischen Verbrennung

Heutige Verbrennungsmotoren werden zum größten Teil mit fossilen Kraftstoffen betrieben. Hauptbestandteile dieser Kraftstoffe sind Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H₂) und Sauerstoff (O₂). Daneben sind geringe Mengen an Schwefel, Stickstoff, Asche und Wasser enthalten [8].

Zur Verbrennung ist ein Gemisch aus Luft und Kraftstoff erforderlich. Luft ist ein Gasgemisch, das zu 21 Vol.-% aus Sauerstoff besteht [8]. Die weiteren Bestandteile sind überwiegend Stickstoff sowie geringe Mengen von Edelgasen (z.B. Argon, Ar). Eine vollständige Verbrennung von 1 kg Kraftstoff erfordert etwa 14.5 kg Luft [9]. Wird dem Motor exakt die zur vollständigen Verbrennung erforderliche Luftmenge zugeführt, spricht man von stöchiometrischem Gemisch. Das Verhältnis zwischen der tatsächlichen Luftmenge und dem theoretischen Luftbedarf zur vollständigen Verbrennung des Kraftstoffs wird durch das Luftverhältnis λ beschrieben:

$$\lambda = \frac{\text{zugeführte Luftmenge}}{\text{theoretischer Luftbedarf}} \quad \text{Gl. 2-1 [9]}$$

Bei stöchiometrischem Gemisch beträgt das Luftverhältnis $\lambda = 1$. Bei Luftüberschuß ($\lambda > 1$) spricht man von magerem Luftverhältnis, bei Luftmangel ($\lambda < 1$) von fettem Luftverhältnis. Bei einem homogenen Gemisch ist die Zündfähigkeit nur gewährleistet, wenn das Luftverhältnis etwa zwischen $\lambda = 0.5$ und $\lambda = 1.3$ liegt [9].

Bei der vollständigen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen (engl. Hydrocarbons, HC) entstehen im Idealfall nur die Produkte Kohlendioxid (CO₂) und Wasser (H₂O). Aufgrund nicht idealer Bedingungen enthält das reale motorische Abgas aber auch Produkte der unvollständigen Verbrennung wie Kohlenmonoxid (CO), schwer oxidierbare Kohlenwasserstoffe sowie unverbrannten Sauerstoff. Zusätzlich entstehen Stickoxide, die als NO_x bezeichnet werden [8, 10].

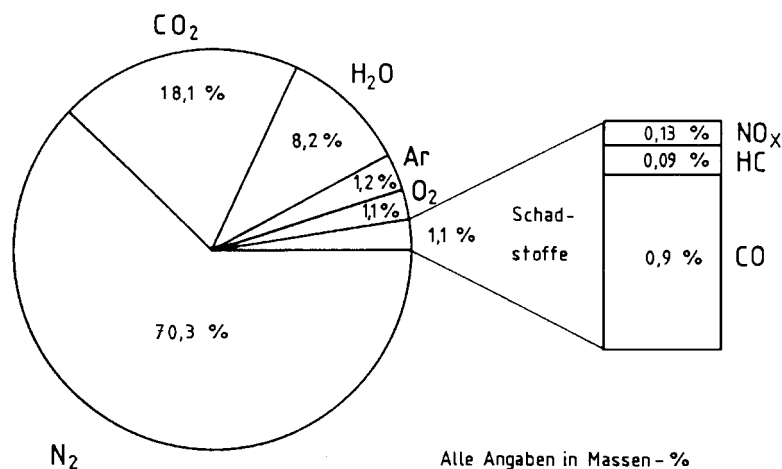


Abb. 2-1: Abgaszusammensetzung eines Mittelklassefahrzeugs mit Ottomotor, ohne Katalysator (ECE-Test) [11]

In Abb. 2-1 ist die typische Abgaszusammensetzung eines Ottomotors ohne Katalysator im Abgastest dargestellt. Man erkennt, daß NO_x, HC und CO zusammen rund 1 % des gesamten Abgases darstellen.

2.1.2 Entstehung und Eigenschaften schädlicher Abgaskomponenten

Die Abgaskomponenten CO, HC und NO_x werden als Schadstoffe bezeichnet, da sie schädliche Wirkungen auf Mensch und Umwelt haben. Nachfolgend werden die Entstehungsbedingungen und Eigenschaften dieser Abgaskomponenten beschrieben.

Kohlenmonoxid (CO):

CO entsteht bei unvollständiger Verbrennung bei Sauerstoffmangel [11, 12]. Durch Schwankungen des Luftverhältnisses von Arbeitsspiel zu Arbeitsspiel und durch unerwünschte Inhomogenitäten im Gemisch ist allerdings auch bei stöchiometrischem Betrieb noch eine merkliche CO-Emission festzustellen [12, 13]. Auch ein „Einfrieren“ der Verbrennung, beispielsweise in der Nähe der Brennraumwand, führt zu CO-Bildung. Kohlenmonoxid ist ein farbloses, geruchloses und sehr giftiges Gas. Da es sich wesentlich stärker an Hämoglobin (O₂-Träger des Blutes) bindet als Sauerstoff, führt es zu Erstickung. Bei einer CO-Konzentration von 0.4 % in der Atemluft tritt nach etwa zwei Stunden der Tod ein [8].

Kohlenwasserstoffe (HC):

Im Abgas enthaltene Kohlenwasserstoffe sind entweder unverbrannte Kraftstoffbestandteile oder teiloxidierte Kohlenwasserstoffe aus unvollständiger Verbrennung. Einen wesentlichen Einfluß auf die Emission unverbrannter Kohlenwasserstoffe hat der sogenannte „Wall Quenching Effect“, bei dem die Flamme in der Nähe der Wand erlischt. Weitere Quellen sind Gasräume, in die zwar das Gemisch, aber nicht die Flamme eindringt. Hier sind der Feuerstegraum, Bereiche an der Zylinderkopfdichtung, an den Ventilsitzen und an der Zündkerze sowie Poren von Brennraumablagerungen zu nennen. Auch der Schmierfilm an der Zylinderwand liefert einen Beitrag, da es zu einer kurzzeitigen Adsorption von Kohlenwasserstoffen kommt, die erst nach der Verbrennung wieder desorbiert werden und damit unverbrannt ausgeschoben werden. Bei einer schlechten Gemischbildung können Kraftstofftröpfchen in den Brennraum gelangen, die unter Umständen nicht vollständig verbrannt werden und damit ebenfalls zu einer erhöhten HC-Emission führen [12, 14].

Bei fettem Gemisch nimmt die Konzentration unverbrannter Kohlenwasserstoffe im Abgas infolge des Luftmangels und damit unvollständiger Verbrennung zu. Bei sehr magerem Gemisch kommt es durch eine schleppende Verbrennung und Entflammungsaussetzer ebenfalls zu einem Anstieg der HC-Emission [12].

Die verschiedenen Kohlenwasserstoffe (gesättigte, ungesättigte, aromatische) haben eine narkotische Wirkung. Teilweise sind sie geruchsbelästigend, schleimhautreizend und kanzerogen [11, 12, 15].

Stickoxide (NO_x):

Verbindungen aus Stickstoff und Sauerstoff werden als Stickoxide bezeichnet. Im Abgas von Verbrennungsmotoren sind im wesentlichen die Stickoxide NO, NO₂ und N₂O enthalten. Der Einfachheit halber werden diese üblicherweise unter der Bezeichnung „NO_x“ zusammengefaßt [16]. Der größte Teil der NO_x-Emission wird

durch NO dargestellt. Beim Ottomotor liegt der Anteil von NO bei etwa 90 %. NO₂ stellt etwa 9 % und N₂O etwa 1 % der gesamten NO_x-Emission dar [16].

Stickoxide entstehen bei hohen Temperaturen ab ca. 1500 K [8, 17] in Anwesenheit von Sauerstoff aus dem Stickstoff der Luft. NO ist ein farbloses Gas, das zu einer Veränderung der Lungenfunktion und zu Schleimhautreizungen führt [15, 16]. In der Atmosphäre wird NO hauptsächlich durch Ozon zu NO₂ umgesetzt [18]. NO₂ ist ein rotbraunes Gas mit einem stechenden Geruch. Es bewirkt Lungenreizungen, ist gewebeschädigend und schleimhautreizend und führt in höheren Konzentrationen zu Schädigungen des Zentralnervensystems [15, 16, 19]. Außerdem ist NO₂ Vorläufersubstanz für das Reizgas Ozon [20]. Mit Wasser können Stickoxide Salpetersäure bilden, was sauren Regen mit Nährstoffauswaschung der Böden und eine Zerstörung der Wachsschicht auf Blättern und Nadeln zur Folge haben kann [11, 21].

In Abb. 2-2 ist im linken Diagramm der Einfluß des Luftverhältnisses auf die Rohemission eines Ottomotors dargestellt. Der Begriff Rohemission bezeichnet die Abgasemission des Motors, bevor das Abgas ein System zur Abgasnachbehandlung passiert. Bei fettem Luftverhältnis treten hohe HC- und CO-Konzentrationen auf, da hier wegen des Luftmangels keine vollständige Verbrennung möglich ist. Da bei Luftverhältnissen von etwa $\lambda = 1.05$ bis 1.1 sowohl hohe Temperaturen als auch Sauerstoffüberschuß vorliegen, ergeben sich in diesem Bereich die höchsten NO_x-Konzentrationen [11, 12].

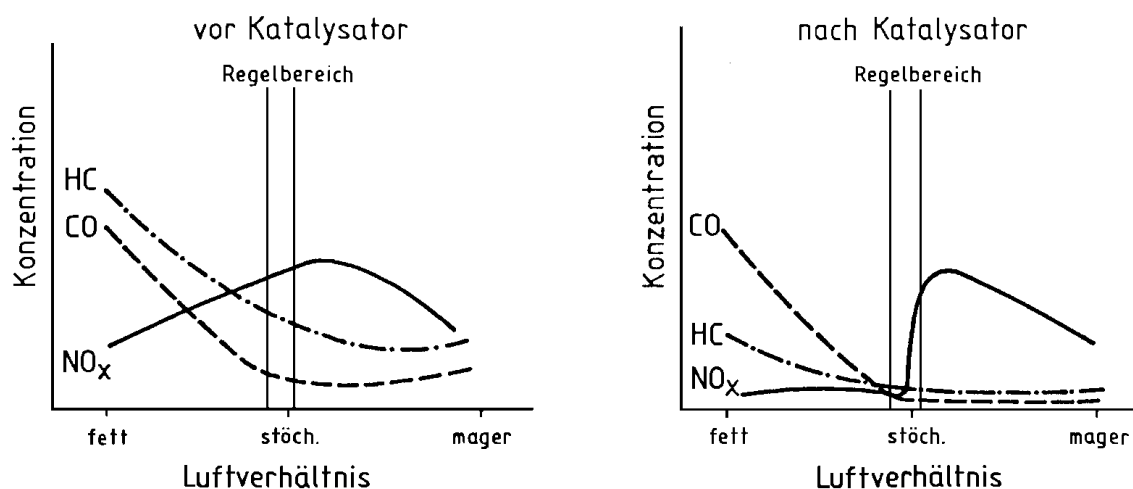


Abb. 2-2: Rohemissionen und Emissionen nach Drei-Wege-Katalysator bei einem Ottomotor in Abhängigkeit vom Luftverhältnis [11]

Je nach Luftverhältnis können die Abgaskomponenten CO, HC und NO_x mit einem dem Motor nachgeschalteten Drei-Wege-Katalysator erheblich verringert werden. Wie das rechte Diagramm in Abb. 2-2 zeigt, sind bei Luftverhältnissen $\lambda \geq 1$ die Schadstoffe CO und HC praktisch nicht mehr im Abgas enthalten. Vielmehr werden diese zu den unschädlichen Verbindungen CO₂ und H₂O oxidiert. Bei $\lambda < 1$ ist eine Umwandlung mangels Sauerstoff als Reaktionspartner dagegen nicht möglich. Im Gegensatz hierzu kann eine Reduktion von Stickoxiden zu unschädlichem Stickstoff nur bei $\lambda \leq 1$ erfolgen. Um alle drei Komponenten gleichzeitig verringern zu können, wird beim Ottomotor üblicherweise mit Hilfe einer Lambdaregelung ein etwa

stöchiometrisches Luftverhältnis eingestellt. Bei näherer Betrachtung ergibt sich ein Optimum bei einem Luftverhältnis, das geringfügig kleiner als das stöchiometrische Luftverhältnis ist (vgl. auch [10]). Als Sensor für die Lambda-Regelung werden Lambdasonden verwendet, deren Signal abhängig vom Sauerstoffgehalt des Abgases ist.

2.1.3 Abgasgesetzgebung

In allen Industrieländern gelten gesetzliche Vorschriften zur Abgasemission von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor. Die Höhe der Grenzwerte und die Fahrzyklen, in denen die Emissionen ermittelt werden, unterscheiden sich hierbei. Nachfolgend wird die in den Ländern der EU gültige Gesetzgebung für PKW beschrieben.

Emissionsmessungen von Fahrzeugen werden auf Rollenprüfständen durchgeführt. In den EU-Ländern wird hierfür der sogenannte „Neue Europäische Fahrzyklus“ (NEFZ) verwendet, der 1992 den ECE-Test ersetzt hat. Der NEFZ gibt ein Geschwindigkeitsprofil vor, das sowohl dem Stadtverkehr als auch außerstädtischen Verhältnissen nachempfunden ist. Im ersten Teil, dem sogenannten „City-Zyklus“, werden maximal 50 km/h erreicht. Im zweiten Teil, als EUDC bezeichnet (Extra Urban Driving Cycle), beträgt die maximale Geschwindigkeit 120 km/h (Abb. 2-3). Der Test dauert insgesamt 1180 s, die im gesamten NEFZ zurückgelegte Fahrstrecke beträgt 11.007 km [22].

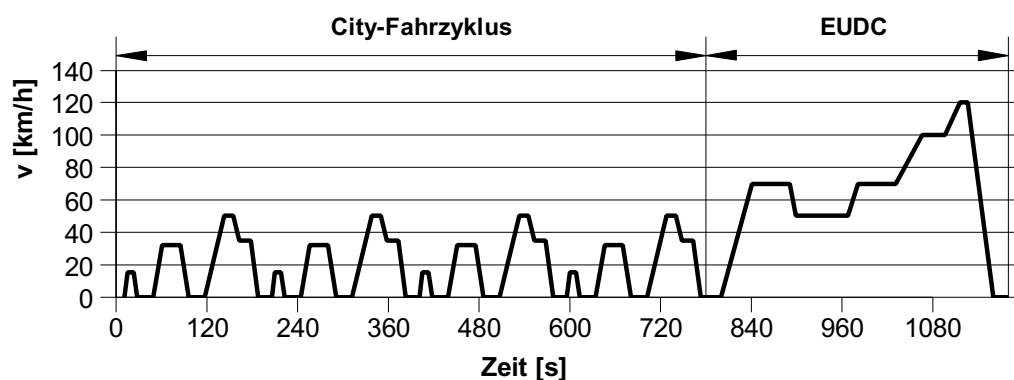


Abb. 2-3: Geschwindigkeitsprofil des Neuen Europäischen Fahrzyklus [22]

Das im Fahrzyklus emittierte Abgas wird mit Umgebungsluft verdünnt. Ein Teil des Abgases wird in gasdichten Beuteln gesammelt und nach Testende analysiert. Die Emissionen im Fahrzyklus werden auf die Fahrstrecke bezogen, so daß sich Werte in der Einheit g/km ergeben.

In Tab. 2-1 sind die Grenzwerte der Emissionsstufen EU1 bis EU4 für die Emissionen von PKW mit Otto- und Dieselmotoren im NEFZ angegeben [22]. Das jeweils angegebene Datum für das Inkrafttreten bezieht sich auf die sogenannte Typprüfung. Seit Einführung der Emissionsstufe EU3 erfolgt der Teststart und damit der Beginn der Abgas-Probenahme zeitgleich mit dem Starten des Motors. Bei den früheren Stufen EU1 und EU2 ging dem in Abb. 2-3 dargestellten Fahrzyklus eine 40 s lange Leerlaufphase voraus, in der noch keine Abgas-Probenahme stattfand [22]. Wegen dieser Unterschiede in der Testdurchführung ist ein direkter Vergleich der EU1- und EU2-Grenzwerte mit denen der Stufen EU3 und EU4 nicht möglich.

	CO [g/km]		HC [g/km]		NOx [g/km]		HC+NOx [g/km]		Partikel [g/km]		gültig ab
	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto	Diesel	Otto	Diesel	
EU1	2.72		-		-		0.97		0.14		01.07.1992
EU2	2.2	1.0	-	-	-	-	0.5	0.7	-	0.08	01.01.1996
EU3	2.3	0.64	0.2	-	0.15	0.5	-	0.56	-	0.05	01.01.2000
EU4	1.0	0.5	0.1	-	0.08	0.25	-	0.3	-	0.025	01.01.2005

Tab. 2-1: Europäische Grenzwerte für Abgasemissionen [22]

Ab der Emissionsstufe EU3 erfolgt eine Feldüberwachung, bei der die Fahrzeuge stichprobenartig auf die Einhaltung der Emissionen über eine Fahrstrecke von 80000 km beziehungsweise über 5 Jahre überprüft werden. Mit Inkrafttreten der Stufe EU4 ab 2005 wird die Feldüberwachung auf 100000 km ausgeweitet [3, 4, 22]. Die Emissionsstufe EU3 sieht außerdem eine On-Board-Diagnose des Emissionsverhaltens eines Fahrzeugs vor (European On Board Diagnosis, EOBD) [23]. Die Schwellenwerte für die Diagnose eines Fehlers werden mit Stufe EU4 nochmals deutlich verschärft [24]. Die Grenzwerte, deren Einhaltung durch die EOBD bei allen Fahrzeugen sichergestellt werden soll, sind allerdings höher als die in Tab. 2-1 genannten Abgasgrenzwerte [23]. An dieser Stelle sei erwähnt, daß auch in den USA eine On-Board-Diagnose (OBD) vorgeschrieben ist.

Der Schwefelgehalt im Kraftstoff ist ebenfalls gesetzlich limitiert. Zwischen dem 01.01.1995 und dem 31.12.1999 galt in den Ländern der EU für Ottokraftstoffe ein Grenzwert von 500 mg/kg [25]. Nach Direktive 98/70/EC sind seit 2000 nur noch 150 mg/kg zugelassen, ab 2005 tritt eine weitere Reduzierung auf 50 mg/kg in Kraft [3, 25, 26].

In Abb. 2-4 sind die tatsächlichen Schwefelgehalte von in den EU-Ländern erhältlichen Ottokraftstoffen dargestellt. Wie man erkennt, treten zwischen den einzelnen Ländern große Unterschiede auf. Der Schwefelgehalt des Kraftstoffs hängt unter anderem von der Herkunft des Rohöls ab [3, 32]. In der Nordsee gefördertes Öl weist beispielsweise etwa 0.2 % Schwefel auf, arabisches Öl dagegen etwa 1 % [32].

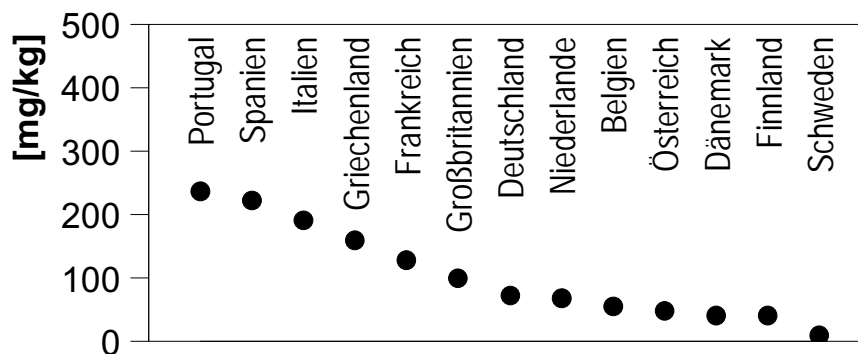


Abb. 2-4: Durchschnittlicher Schwefelgehalt in Ottokraftstoffen [5]

Als freiwillige Reaktion auf die Forderung der Automobilindustrie nach einer weiteren Absenkung des Schwefelgehalts [27] bieten verschiedene Mineralölkonzerne seit Mai 2000 zunehmend flächendeckend in Deutschland den teuersten Ottokraftstoff Super Plus mit einem Schwefelgehalt von maximal 10 mg/kg an [28 - 31].

In Japan gilt für Schwefel im Kraftstoff ein Grenzwert von 100 mg/kg [4]. Die tatsächlichen Schwefelgehalte sind nochmals deutlich niedriger und betragen im Regular Grade 25 mg/kg und im Premium Grade 5 mg/kg [25]. In den USA sind je nach Region praktisch schwefelfreie Kraftstoffe, aber auch Kraftstoffe mit über 600 mg/kg Schwefelgehalt zu finden [5]. Es ist davon auszugehen, daß schwefelarmer Kraftstoff dort auch mittelfristig nicht flächendeckend zur Verfügung stehen wird [26].

2.2 Ottomotor mit Direkteinspritzung

Durch Direkteinspritzung kann der Kraftstoffverbrauch von Ottomotoren deutlich verringert werden. Die Gründe hierfür und das Potential dieser Technologie werden nachfolgend erläutert.

2.2.1 Betriebsarten

Bei konventionellen Ottomotoren erfolgt die Zugabe des Kraftstoffs zur angesaugten Luft im Vergaser oder durch Einspritzung des Kraftstoffs in das Saugrohr. Somit erfolgt die Gemischbildung außerhalb des Brennraums. Bei Direkteinspritzung wird dagegen der Kraftstoff erst direkt in den Brennraum eingespritzt, nachdem zuvor die erforderliche Verbrennungsluft angesaugt wurde. Hierdurch sind zwei unterschiedliche Betriebsarten des Motors möglich, die nachfolgend beschrieben werden.

Homogener Betrieb:

In dieser Betriebsart wird der Kraftstoff während des Saughubes eingespritzt. Damit kann bis zum Zündzeitpunkt ein weitgehend homogenes Gemisch erzeugt werden. Die Gemischbildung und damit auch der Verbrennungsablauf sind in dieser Betriebsart einem konventionellen Motor mit Saugrohreinspritzung ähnlich. Bei Regelung des Luftverhältnisses auf $\lambda = 1$ ist eine Abgasnachbehandlung mit einem konventionellen Drei-Wege-Katalysator möglich [26, 33].

Ladungsschichtung:

Bei Betrieb mit Ladungsschichtung wird die Verbrennungsluft nahezu ungedrosselt angesaugt. Die Kraftstoff-Einspritzung erfolgt erst spät während des Kompressionshubs. Hierdurch wird nur im Bereich der Zündkerze eine Wolke mit einem zündfähigen Gemisch erzeugt, während sich im überwiegenden Teil des Brennraumes im Idealfall Luft und Restgas befindet. Je nach Brennverfahren sind im Leerlauf über den Brennraum gemittelte Luftverhältnisse bis $\lambda = 8$ möglich [34]. Wegen des Luftüberschusses in dieser Betriebsart ist mit einem konventionellen Drei-Wege-Katalysator keine nachmotorische Reduktion der Stickoxide im Abgas möglich (vgl. Abb. 2-2). Daher sind spezielle Systeme zur Abgasnachbehandlung erforderlich [26, 35].

In Abb. 2-5 ist der jeweilige Einspritzvorgang bei den beiden beschriebenen Betriebsarten schematisch dargestellt. Das Einspritzventil ist bei dem betrachteten Brennverfahren seitlich angeordnet, die Zündkerze ist zentral positioniert.

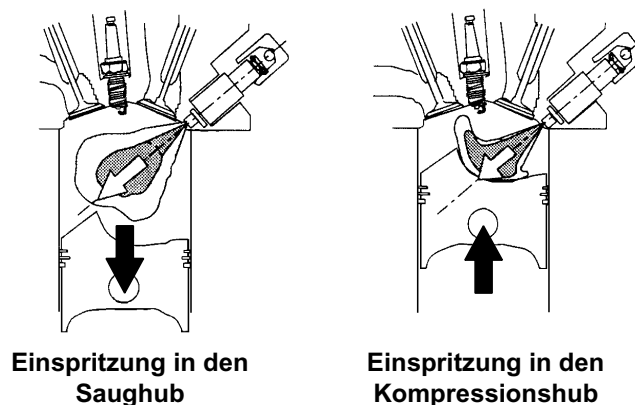


Abb. 2-5: Einspritzung bei verschiedenen Betriebsarten [36]

Der Betrieb mit Ladungsschichtung ist nur bei niedriger Last und Drehzahl möglich. Bei höherer Last und damit größerer eingespritzter Kraftstoffmenge wird die Gemischwolke bei Ladungsschichtung zunehmend fetter. Dies führt zu einer Verschlechterung des Emissionsverhaltens und insbesondere zu Rußbildung. Daher muß der Motor bei höherer Last homogen betrieben werden [5, 35, 37, 38]. Bei hohen Motordrehzahlen ist die Realisierung einer Ladungsschichtung wegen der ausgeprägten Ladungsbewegung im Brennraum nicht mehr möglich. Zudem führt der zwangsläufig frühere Einspritzbeginn bei höheren Drehzahlen zu einem teilweisen Verlust der Ladungsschichtung. Somit muß auch in diesem Fall zu homogenem Betrieb gewechselt werden [37, 39].

Aus verschiedenen Veröffentlichungen gehen effektive Mitteldrücke von $p_{me} = 3$ bis 4.5 bar als obere Grenze für Betrieb mit Ladungsschichtung hervor [6, 40, 41, 42]. Der effektive Mitteldruck ist eine Kenngröße zur Beschreibung der auf das Hubvolumen bezogenen Motorlast. In Gl. 2-2 ist der Zusammenhang zwischen effektivem Mitteldruck, Leistung, Hubvolumen und Drehzahl für einen Viertakt-Motor dargestellt [16].

Als maximale Motordrehzahl für den Betrieb mit Ladungsschichtung werden Werte um 3000 1/min genannt [41, 42].

$$P_e = p_{me} \cdot V_H \cdot \frac{n}{2}$$

P_e : Leistung, p_{me} : effektiver Mitteldruck
 V_H : Hubvolumen, n : Motordrehzahl

Gl. 2-2

In Abb. 2-6 sind die möglichen Betriebsarten des Ottomotors mit Direkteinspritzung im gesamten Betriebsbereich schematisch dargestellt. Es ist hierbei jedoch nicht zwingend erforderlich, daß alle hier dargestellten Betriebsarten tatsächlich realisiert werden. Im Übergangsbereich zwischen Ladungsschichtung und $\lambda=1$ -Betrieb kann homogener Betrieb mit Luftverhältnissen $\lambda > 1$ vorgesehen werden. In dieser Betriebsart kann ein höheres Motordrehmoment erreicht werden als bei Ladungsschichtung, wobei zugleich ein Verbrauchsvorteil gegenüber $\lambda=1$ -Betrieb erzielt wird [24, 37, 38, 41, 44]. Konzepte, bei denen der Motor nur in einem Teil des Betriebsbereichs mager betrieben wird, werden als Mager-Mix-Konzepte bezeichnet [10, 43].

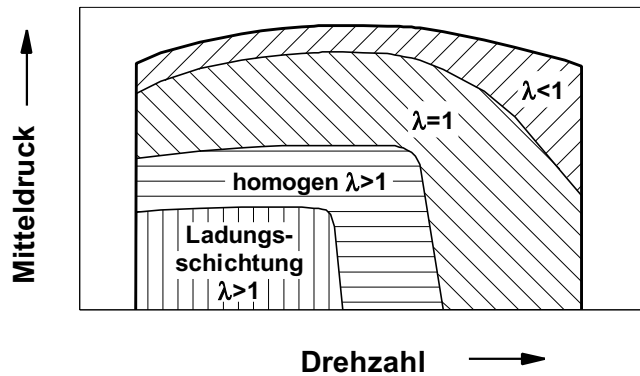


Abb. 2-6:
Betriebsarten eines
Ottomotors mit
Direkteinspritzung

Als Alternative zum homogenen Magerbetrieb kann bei mittleren Lasten auch Betrieb mit $\lambda = 1$ und Abgasrückführung gewählt werden. Durch die Abgasrückführung ergibt sich ebenfalls ein Verbrauchsvorteil gegenüber gewöhnlichem $\lambda=1$ -Betrieb, während die Bedingungen für eine wirksame Abgasnachbehandlung durch den stöchiometrischen Betrieb deutlich günstiger sind als bei homogenem Magerbetrieb [39, 42].

Bei Vollast werden Ottomotoren üblicherweise mit Luftverhältnissen $\lambda < 1$ betrieben, da hierdurch ein höheres Drehmoment als bei $\lambda = 1$ erzielt wird. Hierbei sind Luftverhältnisse von $\lambda = 0.85$ bis 0.95 optimal [9]. Nach [45] wird beispielsweise durch eine Anfettung auf $\lambda = 0.9$ eine Erhöhung des effektiven Mitteldrucks p_{me} um etwa 3 % erzielt. Zusätzlich führt die Anfettung bei Vollast auch zu einer verringerten Abgastemperatur, so daß Katalysatoren im Abgasstrang vor zu hoher thermischer Belastung geschützt werden [46]. Auch beim Ottomotor mit Direkteinspritzung ist eine Vollast-Anfettung vorzusehen [38, 39, 42].

Bis heute wurden zahlreiche Brennverfahren zur Realisierung von Ladungsschichtung entwickelt. Diese können in strahlgeführte, wandgeführte und luftgeführte Verfahren unterschieden werden (Abb. 2-7). Die Unterscheidung erfolgt danach, ob zur Erzeugung der Ladungsschichtung vorwiegend die Strahldynamik selbst (strahlgeführt), die Strahlumlenkung an einer Brennraumwand (wandgeführt) oder die Ladungsbewegung (luftgeführt) genutzt wird [34, 47]. In PKW-Serienfertigung wurden bisher nur wandgeführte Brennverfahren eingesetzt [26].

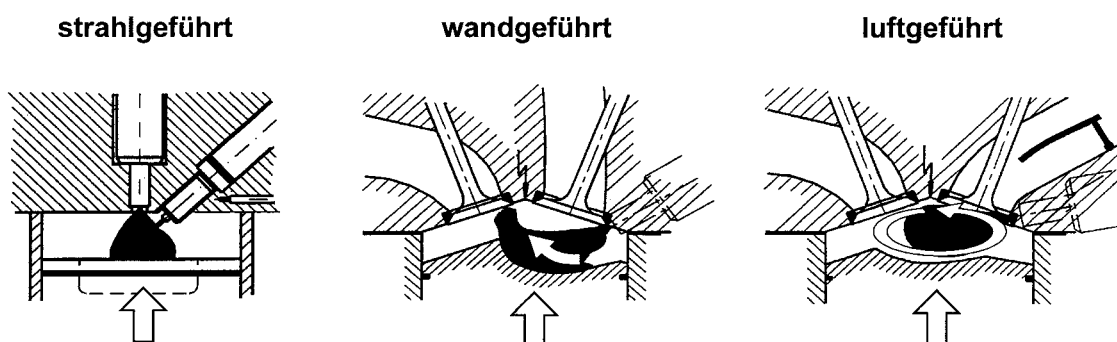


Abb. 2-7: Klassifizierung der Brennverfahren für Ladungsschichtung [47]

2.2.2 Vor- und Nachteile der Direkteinspritzung

Bei Betrieb mit Ladungsschichtung erreicht der Ottomotor mit Direkteinspritzung einen höheren Wirkungsgrad und damit einen geringeren Kraftstoffverbrauch als ein konventioneller Ottomotor im $\lambda=1$ -Betrieb. Folgende Effekte führen zu einer Erhöhung des Wirkungsgrads:

- Durch ungedrosselten Betrieb ist die Ladungswechselarbeit gering [4, 26, 35, 36]. Nach [36] werden durch diesen Effekt bereits 50 % des insgesamt möglichen Potentials erreicht.
- Wegen niedrigerer Temperaturen im Brennraum sind die Wandwärmeverluste geringer [4, 33, 35, 36].
- Durch die geänderte Gaszusammensetzung (Luftüberschuß, Abgasrückführung) erhöht sich der Adiabatenexponent κ und damit der thermodynamische Wirkungsgrad [26, 36, 41].
- Die Verdichtung kann erhöht werden, da die Direkteinspritzung zu einem Innenkühlungseffekt und damit zu einer verringerten Klopfneigung führt. Hierdurch erhöht sich der thermodynamische Wirkungsgrad im gesamten Betriebsbereich des Motors [4, 26, 36, 41].
- Der geringere Restgasgehalt im Leerlauf führt zu einer verbesserten Laufruhe. Daher kann die Leerlaufdrehzahl abgesenkt werden [48, 49].

Das theoretische Potential hinsichtlich einer Wirkungsgradsteigerung durch Ladungsschichtung kann jedoch nicht vollständig genutzt werden. Durch folgende Effekte wird ein Teil des Verbrauchsvorteils wieder kompensiert:

- Der Zeitpunkt der Gemischbildung ist nicht frei wählbar, wodurch eine hinsichtlich des Wirkungsgrades ungünstige Schwerpunktlage der Verbrennung erzielt wird [26, 41].
- Durch Wandauftrag des Kraftstoffs treten entsprechende Verluste auf [26].
- Höhere Zylinderdrücke bei ungedrosseltem Betrieb führen zu einer leichten Erhöhung der Reibarbeit [26, 44].
- Für den Antrieb der Hochdruck-Einspritzpumpe ist zusätzliche Arbeit erforderlich, ebenso zur Deckung des bei Direkteinspritzung höheren elektrischen Energiebedarfs der Einspritzventile [26, 41].
- Die Gestaltung der Einlaßkanäle für eine spezifische Ladungsbewegung kann zu einer leichten Erhöhung der Ladungswechselarbeit führen [26].

In der Literatur sind deutlich voneinander abweichende Ergebnisse für die Verbrauchsverbesserung durch Ladungsschichtung gegenüber $\lambda=1$ -Betrieb zu finden. Für stationären Betrieb mit $n=2000$ 1/min und $p_{me}=2$ bar wird von Verbrauchsvorteilen zwischen 14 und 25 % berichtet [1, 2, 38, 40, 44, 47, 48, 50, 51]. Dieser Betriebspunkt entspricht in etwa einer Konstantfahrt mit 60 km/h. Bei $\lambda=1$ -Betrieb verringert sich die Ladungswechselarbeit mit steigender Motorlast. Daher nimmt auch der Verbrauchsvorteil durch Magerbetrieb mit Ladungsschichtung ab. Bei $n=2000$ 1/min und $p_{me}=4$ bar werden Verbrauchsvorteile zwischen 5 und 10 % angegeben. Um diesen Betriebspunkt zu erreichen, kann je nach Brennverfahren bereits ein Wechsel zu homogenem Magerbetrieb erforderlich sein [40, 49, 51].

Im instationären Fahrbetrieb des NEFZ werden gemäß verschiedener Veröffentlichungen Verbesserungen zwischen 6 und 16 % erzielt. Hierbei hat das Hubvolumen des Motors und die Fahrzeuggröße einen deutlichen Einfluß [26, 41,

49, 51, 52, 53]. Somit liegt der Verbrauchsvorteil unter den bei stationärem Betrieb mit geringer Last erzielbaren Verbesserungen. Der Grund hierfür liegt unter anderem darin, daß generell große relative Vorteile durch Ladungsschichtung bei niedriger Last und damit bei geringem absolutem Kraftstoffverbrauch erzielt werden. Der Kraftstoffverbrauch im Fahrbetrieb wird jedoch vor allem durch die Phasen mit höherer Last und damit höherem absolutem Kraftstoffverbrauch bestimmt. Hinzu kommt, daß die Warmlaufphase auch bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung im $\lambda=1$ -Betrieb erfolgt [26, 41, 42, 54] und somit in dieser Phase kein Vorteil erzielt werden kann.

Ein moderner Dieselmotor mit Direkteinspritzung und Abgasturboaufladung hat gegenüber einem konventionellen Ottomotor im gleichen Fahrzeug beispielsweise bei 50 km/h einen um 31 % niedrigeren spezifischen Kraftstoffverbrauch. Bei 70 km/h beträgt der Vorteil 27 %, bei 100 km/h ist der Verbrauch um 18 % günstiger [1]. Der Vergleich mit den oben genannten Werten für den Ottomotor mit Direkteinspritzung zeigt, daß der Ottomotor alleine durch Einsatz der Direkteinspritzung den niedrigen Kraftstoffverbrauch des aufgeladenen Dieselmotors mit Direkteinspritzung nicht erreichen kann. Durch Kombination verschiedener Technologien könnte der Verbrauch des Ottomotors jedoch noch weiter verringert werden. In [52] wird beispielsweise berichtet, daß durch Einsatz der Direkteinspritzung zusammen mit anderen Technologien wie Downsizing über Abgasturboaufladung und variable effektive Verdichtung über eine Phasenverschiebung der Einlaßnockenwelle ein Potential zur Verbrauchsverringerung im Fahrzyklus um bis über 25 % erreicht wird. Wegen des steigenden konstruktiven Aufwands ist allerdings von deutlich höheren Herstellungskosten für einen solchen Motor im Vergleich zu einem konventionellen Ottomotor auszugehen.

In Kap. 2.1.2 wurde bereits festgestellt, daß mit einem Drei-Wege-Katalysator bei Magerbetrieb keine wirksame NO_x-Minderung möglich ist. Da die Vorteile des Ottomotors mit Direkteinspritzung jedoch gerade im Magerbetrieb vorliegen, ist somit ein spezielles System zur Abgasnachbehandlung erforderlich. Dies stellt den gravierendsten Nachteil des Ottomotors mit Direkteinspritzung dar, da hierdurch gegenüber einem konventionellen Ottomotor mit Drei-Wege-Katalysator ein erheblicher zusätzlicher Entwicklungsaufwand und Mehrkosten durch eine aufwendigere Abgasanlage erforderlich sind. Zudem liegen noch erheblich weniger Erfahrungen hinsichtlich der geforderten Einhaltung der Abgasgrenzwerte über eine Laufstrecke von 80000 bzw. 100000 km vor. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, daß motorische Maßnahmen im Zusammenhang mit der Abgasnachbehandlung erforderlich sind, die zu einer Verringerung des Verbrauchsvorteils führen [50].

2.2.3 Rohemission im Vergleich zum konventionellen Ottomotor

Bei homogenem $\lambda=1$ -Betrieb mit Direkteinspritzung ergeben sich sehr ähnliche Rohemissionen wie mit Saugrohreinspritzung [55 - 58]. Dagegen sind die Unterschiede bei Betrieb mit Ladungsschichtung deutlich größer. Im allgemeinen ist mit einer höheren HC-Emission zu rechnen, wobei die Zunahme gegenüber konventioneller Saugrohreinspritzung je nach Brennverfahren etwa zwischen 50 % und über 500 % liegen kann [47, 59].

Gemäß Abb. 2-2 führen magere Luftverhältnisse zu einer Absenkung der NO_x-Rohemission. Trotzdem tritt auch bei Ladungsschichtung eine relativ hohe NO_x-Rohemission auf. Eine Ursache hierfür ist das Vorhandensein von Zonen mit näherungsweise stöchiometrischem Gemisch, wodurch trotz des insgesamt hohen Luftüberschusses lokal hohe Spitzentemperaturen auftreten [1]. Als weitere Ursache ist eine frühe und damit thermodynamisch ungünstige Umsetzung zu nennen, die zu einer hohen NO_x-Rohemission führt [60].

Durch Abgasrückführung ist jedoch eine deutliche Absenkung der NO_x-Rohemission möglich. Dieser Effekt ist im wesentlichen auf die langsamere Verbrennung mit entsprechend niedrigeren Spitzentemperaturen sowie auf die Verringerung des O₂-Partialdrucks zurückzuführen [11, 61]. Die Literaturangaben zur NO_x-Verminderung durch Abgasrückführung reichen bis zu 85 % [38, 39, 44, 47, 62, 63]. Eine übermäßige Anhebung der Abgasrückführrate führt allerdings zu einer verschlechterten Laufruhe und erhöhter HC-Emission [44, 47]. Obwohl die NO_x-Emission bei Ladungsschichtung mit Abgasrückführung niedriger ist als bei homogenem $\lambda=1$ -Betrieb, ist zur Einhaltung der Abgasgrenzwerte ein spezielles System zur Abgasnachbehandlung bei Magerbetrieb zwingend erforderlich [64].

2.2.4 Entwicklungsgeschichte der Benzin-Direkteinspritzung

Das Prinzip der Benzin-Direkteinspritzung ist nicht neu. Bereits 1898 wurden Untersuchungen mit Direkteinspritzung nach dem Verfahren von Haselwander durchgeführt [60]. In den 1930er Jahren wurde die Benzin-Direkteinspritzung in Flugmotoren eingesetzt. Hierbei war primäres Ziel, die Nachteile von Vergasern wie Abhängigkeit der Gemischbildung von der Fluglage sowie Gefahren durch Vergaserbrände und Vergaservereissung zu vermeiden. Nach erfolgreichem Einsatz an Flugmotoren wurde das Verfahren auch für Fahrzeuge interessant. 1952 wurden die Zweitakt-Motoren der Fahrzeuge Gutbrod Superior und Goliath GP 700 mit Benzin-Direkteinspritzung ausgerüstet. Wesentlicher Vorteil war die deutliche Verringerung der für Zweitakt-Motoren typischen Spülverluste. Der erste Viertakt-Fahrzeugmotor mit Benzin-Direkteinspritzung wurde 1954 im Mercedes-Benz 300 SL eingeführt. Hier hatte der Einsatz der Direkteinspritzung das Ziel einer Leistungssteigerung gegenüber der Gemischbildung mittels Vergaser [26, 38, 56].

Bis heute wurden verschiedenste Brennverfahren mit Benzin-Direkteinspritzung und Ladungsschichtung entwickelt [5, 26, 38, 56, 60, 65]. Im Jahr 1996 begann Mitsubishi als erster Automobilhersteller die Serienproduktion eines Ottomotors mit Direkteinspritzung, der bei Teillast mit Luftüberschuß und Ladungsschichtung betrieben wird [5]. Weitere Automobilhersteller folgten bereits oder werden in nächster Zeit folgen und ebenfalls mager betriebene Ottomotoren mit Direkteinspritzung anbieten. Hier sind beispielsweise Toyota, Nissan, Volkswagen und PSA zu nennen. Andere Hersteller wie Renault haben sich dagegen dazu entschieden, die Direkteinspritzung zunächst nur an einem ausschließlich homogen mit $\lambda = 1$ betriebenen Motor einzusetzen [66]. Hierdurch wird das Potential der Direkteinspritzung zwar nur zu einem kleinen Teil genutzt, als Vorteil ist aber die Möglichkeit der Abgasnachbehandlung mit einem konventionellen Drei-Wege-Katalysator anzusehen.

Die Entwicklung von Ottomotoren mit Direkteinspritzung zur Serienreife umfaßt viele Aspekte. Hierzu gehört die Entwicklung der einzelnen Komponenten des Einspritzsystems, die Abstimmung des Brennverfahrens und die Realisierung eines geeigneten Motormanagements. Als schwierigste Aufgabenstellung wird aber die Entwicklung eines geeigneten Systems zur Abgasnachbehandlung angesehen [48].

2.3 Systeme zur Abgasnachbehandlung

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über verschiedene Systeme gegeben, mit denen die nachmotorische Verringerung der schädlichen Abgaskomponenten, insbesondere der Stickoxide, möglich ist.

2.3.1 Drei-Wege-Katalysator

Der Drei-Wege-Katalysator in Verbindung mit einer Lambdaregelung ist aus heutiger Sicht das wirksamste System zur Abgasnachbehandlung beim Ottomotor [10, 16]. Drei-Wege-Katalysatoren in Fahrzeugen bestehen meist aus einem keramischen Träger in Wabenform. Als Material wird hierbei ein Magnesium-Aluminium-Silikat mit der Bezeichnung Cordierit eingesetzt. Alternativ können auch Träger in Form einer gewickelten Metallfolie zum Einsatz kommen [67].

Auf diesen Trägern befindet sich eine als Washcoat bezeichnete Zwischenschicht, die hauptsächlich aus Aluminiumoxid und Ceroxid besteht [11]. Cer führt in Wechselwirkung mit den Edelmetallen zu einer Sauerstoff(O₂)-Speicherfähigkeit des Katalysators. Hierdurch wird eine Pufferfunktion gegenüber Abweichungen des Luftverhältnisses von $\lambda = 1$ erzielt, da durch die O₂-Speicherung auch in den Phasen mit $\lambda < 1$ Sauerstoff als Reaktionspartner für CO und HC zur Verfügung steht [23, 68 - 71]. Der Washcoat führt zu einer Vergrößerung der Oberfläche im Katalysator etwa um den Faktor 7000 gegenüber dem unbeschichteten Träger [67, 72] und dient als Träger für die feinverteilten Edelmetalle Platin, Palladium und Rhodium, die als katalytisch wirksame Materialien eingesetzt werden. Während Platin und Palladium vor allem die Oxidation von CO und HC katalysieren, dient der Zusatz von Rhodium der Reduktion von NO_x [46, 72].

Wie bereits in Kap. 2.1.2 dargestellt, ist mit dem Drei-Wege-Katalysator eine NO_x-Reduktion nur bei Luftverhältnissen $\lambda \leq 1$ und eine Oxidation von CO und HC nur bei $\lambda > 1$ möglich.

Die Verminderung der einzelnen Komponenten durch den Katalysator wird üblicherweise durch Konversionsraten beschrieben. Diese errechnen sich nach Gl. 2-3.

$$\text{Konversionsrate} = \frac{\text{Emission vor Katalysator} - \text{Emission nach Katalysator}}{\text{Emission vor Katalysator}} \quad \text{Gl. 2-3}$$

Mit Drei-Wege-Katalysatoren können bei $\lambda = 1$ Konversionsraten von über 90 % für alle drei Komponenten CO, HC und NO_x erreicht werden. Voraussetzung ist eine Temperatur des Katalysators deutlich über 250 °C [16, 72]. Drei-Wege-Katalysatoren werden in Europa seit über 15 Jahren in großen Stückzahlen eingesetzt und haben damit einen weitgehend ausgereiften technischen Stand.

2.3.2 Stickoxid-Minderung bei sauerstoffhaltigem Abgas

Nachfolgend werden verschiedene Systeme dargestellt, mit denen im Gegensatz zum Drei-Wege-Katalysator eine NO_x-Minderung auch bei sauerstoffhaltigem Abgas möglich ist. Diese Systeme sind allgemein sowohl für den mager betriebenen Ottomotor als auch für den Dieselmotor geeignet.

2.3.2.1 Passive SCR-Verfahren

Bei SCR-Verfahren (Selective Catalytic Reduction) findet trotz sauerstoffhaltiger Atmosphäre eine reduzierende Reaktion an den im Abgas enthaltenen Stickoxiden statt. Als Reduktionsmittel werden bei den in diesem Kapitel beschriebenen passiven Systemen die innermotorisch erzeugten Abgaskomponenten HC und CO genutzt. Hierbei ist ein deutlicher Überschuß gegenüber den zu reduzierenden Stickoxiden erforderlich [73, 74].

Passive SCR-Verfahren sind mit verschiedenen Katalysatortypen möglich [75]:

Ionenausgetauschte Zeolithe:

Diese Katalysatoren arbeiten in einem breiten Temperaturfenster. Mit dem kupferhaltigen Zeolith-Katalysator Cu-ZSM-5 ist beispielsweise zwischen 350 und 550 °C eine NO_x-Konversion von maximal etwa 40 % erreichbar. Voraussetzung hierfür ist ein ausreichendes Verhältnis zwischen der HC-Emission und den zu reduzierenden Stickoxiden von $HC/NO_x \geq 2$. Nachteil dieser Katalysatoren ist eine unbefriedigende HC-Oxidation, erst über 400 °C wird eine HC-Konversion über 90 % erreicht. Daher ist zusätzlich ein edelmetallhaltiger Katalysator zur HC-Oxidation erforderlich. Dieser muß zwangsläufig hinter dem Zeolith-Katalysator positioniert werden, da die Kohlenwasserstoffe für das SCR-Verfahren benötigt werden. Als Folge wird der edelmetallhaltige Katalysator beim Kaltstart nur langsam aufgeheizt, was zu einer entsprechend hohen HC-Emission im Abgastest führt. Weitere Nachteile der Zeolith-Katalysatoren sind die eingeschränkte thermische Haltbarkeit, insbesondere bei Anwesenheit von Wasser, sowie die Vergiftung durch Schwefel [7, 25, 43, 73, 76].

Edelmetallhaltige Katalysatoren:

Mit diesen Katalysatoren kann ebenfalls ein Teil der Stickoxide im Magerbetrieb reduziert werden. Mit Platin als Edelmetall ist dieser Katalysatortyp bei niedrigen Temperaturen von etwa 180 bis 300 °C aktiv. Hierbei werden NO_x-Konversionen von etwa 30 % erreicht. Bei höheren Temperaturen ist die Aktivität sehr gering. Das schmale Temperaturfenster der platinhaltigen Katalysatoren rührt daher, daß die Kohlenwasserstoffe bei höheren Temperaturen nicht mehr mit den Stickoxiden, sondern bevorzugt mit Sauerstoff reagieren. Nachteilig ist bei diesen Katalysatoren auch die unerwünschte Bildung von Lachgas (N₂O) [4, 25, 43, 73].

Iridium-Katalysatoren:

Auch iridiumhaltige Katalysatoren können zur selektiven NO_x-Reduktion mit HC als Reduktionsmittel eingesetzt werden [5, 73, 76, 77, 78]. Die erreichbare NO_x-Konversion hängt stark vom Verhältnis zwischen HC- und NO_x-Emission ab. Bei einem Verhältnis $HC/NO_x = 10$ wird eine NO_x-Konversion bis 75 % erreicht, bei $HC/NO_x = 5$ beträgt sie nur noch 40 %. Das Temperaturfenster ist als relativ schmal zu betrachten, maximale Konversionsraten werden bei etwa 400 °C erreicht. Als

Vorteile dieser Katalysatoren ist die Unempfindlichkeit gegenüber Schwefel zu nennen [5, 76]. Außerdem wird im Gegensatz zu den edelmetallhaltigen Katalysatoren kein Lachgas gebildet [76]. Der Restsauerstoff im Abgas reagiert allerdings mit Iridium zu Iridiumoxid, das im Gegensatz zu elementarem Iridium keine katalytische Wirkung hat. Daher sind regelmäßige Regenerationen bei $\lambda < 1$ erforderlich, in denen das Iridiumoxid durch HC und CO im Abgas wieder reduziert wird [77]. Hinsichtlich der Haltbarkeit der Katalysatoren können Probleme entstehen, da Iridium flüchtig ist [73].

2.3.2.2 Aktive SCR-Verfahren

Bei diesen SCR-Verfahren wird das Reduktionsmittel für die Stickoxide dem Abgas gezielt zugegeben. Reduktionsmittel können Ammoniak (NH_3) oder auch Kohlenwasserstoffe sein. Hiermit lassen sich höhere NO_x -Konversionsraten erzielen als mit passiven SCR-Verfahren.

NH_3 -SCR:

Dieses Verfahren stammt ursprünglich aus der Kraftwerkstechnik und wurde von Firma Siemens unter der Bezeichnung SINOX-System für Dieselmotoren im Nutzfahrzeug- und PKW-Bereich zur Serienreife entwickelt. Hierbei wird dem Abgas Harnstoff (NH_2CONH_2) in Form einer wässrigen Lösung zugeführt. Im Abgas wird hieraus Ammoniak gewonnen, der im nachgeschalteten SCR-Katalysator als Reduktionsmittel für Stickoxide dient. Der SCR-Katalysator besteht aus Vanadiumpentoxid (V_2O_5) auf einem Träger aus Titandioxid (TiO_2). Mit diesem System wird eine NO_x -Konversion bis über 70 % erreicht. Nachteilig ist allerdings, daß das Reduktionsmittel in Form eines zusätzlichen Betriebsstoffs mitgeführt werden muß [6, 74, 75, 79, 80]. Als Alternative zur wässrigen Harnstofflösung können auch reiner Ammoniak, Salmiak, fester Harnstoff oder Ammoniumcarbamat eingesetzt werden [80, 81].

HC-SCR:

Wie beim passiven SCR-Verfahren dienen auch bei diesem Verfahren Kohlenwasserstoffe als Reduktionsmittel für die Stickoxide. Im Unterschied zum passiven Verfahren wird hier jedoch eine Dosiereinrichtung eingesetzt, mit der der HC-Gehalt des Abgases durch Zugabe von Kraftstoff gezielt angehoben wird. Somit kann das HC/ NO_x -Verhältnis unabhängig vom Motorbetrieb variiert werden [74, 82].

2.3.2.3 NO_x -Speicher-Katalysatoren

Der NO_x -Speicher-Katalysator (NSK), teilweise auch als NO_x -Speicher-Reduktions-Katalysator bezeichnet [75], ist im Prinzip ein Drei-Wege-Katalysator mit einer zusätzlichen Speicherkomponenten für Stickoxide. Neben den üblichen Edelmetallen befinden sich auf dem Washcoat NO_x -Speicher-Materialien aus der Gruppe der schweren Alkalimetalle (z.B. Kalium, Natrium), der schweren Erdalkalimetalle (z.B. Barium, Calcium) oder der leichten Seltenen Erden (z.B. Lanthan, Cer) in Form des Oxids oder Carbonats [27, 68, 83]. Diese Speicher-Materialien sind in der Lage, im Abgas enthaltene Stickoxide während des Magerbetriebs zu binden (Adsorption). In regelmäßigen Abständen ist ein Wechsel zu fettem Luftverhältnis erforderlich, um die gespeicherten Nitrate wieder freizusetzen und zu reduzieren (Regeneration).

Somit ist ein aktiv gesteuerter Mager/Fett-Betrieb erforderlich [27, 68, 74, 83 - 86]. In der Literatur sind zahlreiche Beschreibungen dieses Funktionsprinzips zu finden [4, 25, 27, 43, 74, 84]. Danach können die Abläufe im Mager/Fett-Betrieb in vier Schritte aufgeteilt werden. Diese sind nachfolgend in den Gleichungen Gl. 2-4 a bis Gl. 2-4 d für Barium (Ba) als Speicherkomponente dargestellt:

1. Unter mageren Bedingungen wird vom Motor emittiertes NO an den Edelmetallkontakten des Katalysators zu NO₂ oxidiert.



2. Das Speichermaterial Ba liegt im Magerbetrieb als Carbonat vor [75]. Dieses reagiert mit NO₂ unter Bildung eines entsprechenden Nitrates und Freisetzung von CO₂. Durch die Nitratbildung erfolgt eine NO₂-Speicherung im NO_x-Speicher-Katalysator.



3. Durch kurzzeitigen Wechsel zu fetten Bedingungen werden dem NO_x-Speicher-Katalysator CO und HC zugeführt. Dies führt zu einem Zerfall des Nitrates. Die Speicherkomponente wird unter Freisetzung von NO und O₂ wieder in ihren Ausgangszustand zurückgeführt.



4. Das freigesetzte NO wird mit Hilfe der Reduktionsmittel HC, H₂ und CO an den Edelmetallkontakten, insbesondere an Rh, zu N₂ reduziert.

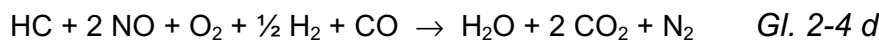


Abb. 2-8 zeigt NO_x-Konversionsraten verschiedener NO_x-Speicher-Katalysatoren in Abhängigkeit der Katalysator-Temperatur. Bei optimaler Temperatur werden Werte über 90 % erreicht. Die abnehmende Effektivität bei hohen Temperaturen ist auf die verringerte thermodynamische Stabilität der Nitrates zurückzuführen. Zudem begünstigen hohe Temperaturen die Umwandlung von NO₂ zu NO, so daß die Nitratbildung erschwert wird. Bei niedrigen Temperaturen ist die unzureichende Oxidation von NO zu NO₂ Ursache für den geringen NO_x-Umsatz [68, 74].

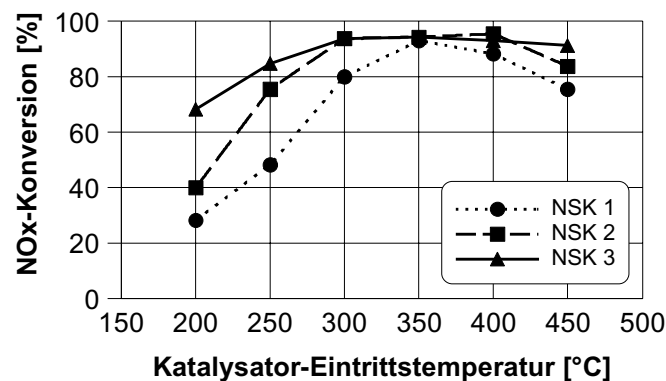


Abb. 2-8: NO_x-Konversion verschiedener NO_x-Speicher-Katalysatoren [74]

Wesentliche Schwachpunkte des NO_x-Speicher-Katalysators sind die starke Empfindlichkeit gegenüber Schwefel und eine noch unzureichende thermische Stabilität [6, 25, 26, 68, 74, 86, 87, 88].

Toyota hat im Jahr 1994 auf dem japanischen Markt ein Fahrzeug mit homogenem Magermotor und NO_x-Speicher-Katalysator eingeführt [25, 75, 89]. Zwei Jahre später wurde die Technologie dann auch an einem Fahrzeug mit Ottomotor und Direkteinspritzung eingesetzt [90]. Beide Fahrzeuge wurden nur auf dem japanischen Markt angeboten. Da in Japan praktisch schwefelfreier Kraftstoff verfügbar ist und die im üblichen Fahrbetrieb erreichten Katalysator-Temperaturen niedrig sind, sind dort die Einsatzbedingungen für den NO_x-Speicher-Katalysator deutlich günstiger als in Europa und USA.

Beim Dieselmotor ist der Fettbetrieb zur Regeneration des NO_x-Speicher-Katalysators prinzipiell schwieriger zu realisieren als beim Ottomotor. Dank hochentwickelter Motorsteuerungen ist allerdings auch bei Dieselmotoren mittlerweile der kurzzeitige Motorbetrieb mit $\lambda < 1$ möglich, so daß die Voraussetzungen für den Einsatz von NO_x-Speicher-Katalysatoren gegeben sind [32, 73, 91].

2.3.3 Abgasnachbehandlung beim Ottomotor mit Direkteinspritzung

Zur sicheren Einhaltung der EU4-Grenzwerte ist beim Ottomotor mit Direkteinspritzung eine relativ hohe NO_x-Konversion erforderlich. In [4] wird die Notwendigkeit einer NO_x-Konversion von über 90 % beschrieben. Da von den oben beschriebenen Abgasnachbehandlungssystemen nur der NO_x-Speicher-Katalysator diese Forderung erfüllen kann, favorisieren die meisten Automobilhersteller diese Technologie für die Abgasnachbehandlung beim Ottomotor mit Direkteinspritzung. Es wird davon ausgegangen, daß auch mittelfristig kein anderes System ein ähnlich hohes Potential bieten wird [2, 6]. In zahlreichen Veröffentlichungen werden Konzepte zur Abgasnachbehandlung beim Ottomotor mit Direkteinspritzung beschrieben, die einen NO_x-Speicher-Katalysator in Unterbodenposition und einen zusätzlichen motornahen Startkatalysator beinhalten [1, 4, 6, 12, 23, 26, 41, 42, 53, 73, 78, 92]. Durch die motornahe Position erreicht der Startkatalysator nach dem Kaltstart schnell die erforderliche Betriebstemperatur. Bei $\lambda=1$ -Betrieb arbeitet er als Drei-Wege-Katalysator, bei Magerbetrieb konvertiert er CO und HC und unterstützt darüber hinaus die für die Nitratbildung im NO_x-Speicher-Katalysator wichtige Oxidation von NO zu NO₂ [12, 41]. Auch in Fahrzeugen mit konventionellem Ottomotor wird heute teilweise ein motornaher Startkatalysator zusätzlich zum Drei-Wege-Katalysator eingesetzt.

In Abweichung zu dem oben beschriebenen Konzept wird bei Mitsubishi ein Iridium-Katalysator mit nachgeschaltetem Drei-Wege-Katalysator bevorzugt. Mit diesem System werden deutlich geringere NO_x-Konversionsraten erreicht als mit einem NO_x-Speicher-Katalysator (vgl. Kap. 2.3.2.1). Allerdings ist der Iridium-Katalysator weniger empfindlich gegenüber Schwefel und bietet daher bessere Voraussetzungen für den Einsatz in Ländern, in denen schwefelfreier Kraftstoff noch nicht flächendeckend zur Verfügung steht [5, 74, 76]. Daher wurde das erste in Europa erhältliche Fahrzeug mit Benzin-Direkteinspritzung, der Mitsubishi Carisma GDI, mit diesem Katalysatortyp ausgerüstet. Zur Erfüllung zukünftiger Abgasgrenzwerte wird dieses System allerdings vermutlich nicht ausreichen, da mit dem genannten Fahrzeug offensichtlich selbst die heute geltenden Grenzwerte nur knapp unterschritten werden [93].

3. NOx-Speicher-Katalysatoren - Stand der Technik

In der Literatur sind bereits zahlreiche Untersuchungen mit NOx-Speicher-Katalysatoren zu finden. Im Folgenden werden die wesentlichen Ergebnisse hierzu zusammengefaßt.

3.1 Parameter im Mager/Fett-Betrieb

Wie bereits dargestellt, erfordert der Einsatz eines NOx-Speicher-Katalysators einen aktiv gesteuerten Mager/Fett-Betrieb, in dem die NOx-Adsorptionsphasen durch regelmäßige Nitrat-Regenerationen unterbrochen werden. Wesentliche Parameter des Mager/Fett-Betriebs sind die Adsorptionsdauer, die Regenerationsdauer sowie das Luftverhältnis während der Regeneration. Bei der Optimierung gibt es allerdings einen Zielkonflikt zwischen hohem NOx-Umsatz und geringem Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Regenerationen. Für maximalen NOx-Umsatz sind zwar kurze Adsorptionsphasen und damit häufige Regenerationen günstig, ein geringes Verhältnis aus Adsorptions- und Regenerationsdauer führt aber zu einem hohen Kraftstoffverbrauch [7, 42, 63].

Für jede Adsorptionsdauer gibt es eine optimale Regenerationsdauer, bei der gerade eine vollständige Regeneration erreicht wird. Eine zu geringe Regenerationsdauer bewirkt einen verringerten NOx-Umsatz, während eine zu lange Regeneration zu Durchbrüchen der Reduktionsmittel CO und HC führt [7, 63, 68]. Die erforderliche Dauer für eine vollständige Regeneration nimmt hierbei linear mit der gespeicherten NOx-Masse zu [68].

Wie bereits in Abb. 2-8 zu erkennen, wird die Funktion des NOx-Speicher-Katalysators wesentlich durch die Temperatur des zugeführten Abgases beeinflusst [6, 17, 40, 68, 74]. Für eine maximale NOx-Konversion ist eine Katalysator-Temperatur etwa zwischen 300 und 400 °C anzustreben. Weitere wichtige Einflußgrößen auf die NOx-Speicherung und damit auf die erreichbare NOx-Konversion sind die NOx-Konzentration im zugeführten Abgas und die Raumgeschwindigkeit. Die Raumgeschwindigkeit, häufig mit S.V. abgekürzt (Space Velocity), beschreibt gemäß Gl. 3-1 das Verhältnis aus dem Abgasvolumenstrom unter Normbedingungen und dem Katalysatorvolumen [17].

$$S.V. = \frac{\dot{V}_{\text{Abgas (Norm)}}}{V_{\text{Katalysator}}} \quad \text{Gl. 3-1}$$

Wie in Abb. 3-1 zu erkennen, führen sowohl eine höhere Raumgeschwindigkeit als auch eine höhere NOx-Rohemission zu einer deutlichen Verringerung der NOx-Konversion, sofern die Adsorptionsdauer konstant gehalten wird. Durch Verkürzung der Adsorptionsphase kann die NOx-Konversion wieder erhöht werden [39, 40, 68]. Hieraus ergibt sich die Forderung nach einer möglichst niedrigen NOx-Rohemission des Motors und einer möglichst geringen Raumgeschwindigkeit, da andernfalls sehr häufige Regenerationen mit entsprechendem Kraftstoff-Mehrverbrauch erforderlich sind [39, 68]. Die NOx-Rohemission ist unter anderem vom Brennverfahren und der realisierten Abgasrückführrate abhängig. Eine geringe Raumgeschwindigkeit kann durch ein möglichst großes Volumen des NOx-Speicher-Katalysators erreicht

werden. Grenzen werden hierbei vor allem durch den verfügbaren Bauraum im Fahrzeug sowie auch durch zusätzliche Kosten gesetzt.

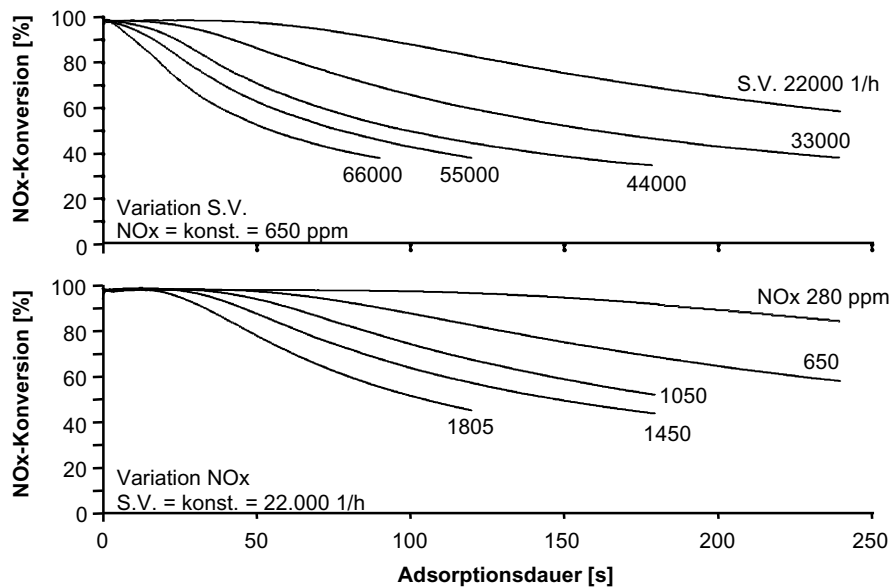


Abb. 3-1: Einfluß von Raumgeschwindigkeit und NO_x-Konzentration auf die NO_x-Konversion ($T_{NSK} = 350 \text{ °C}$) [68]

Die oben genannten Parameter und Randbedingungen beeinflussen die NO_x-Konversion und den Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Nitrat-Regenerationen. Unter günstigen Bedingungen wird ein NO_x-Umsatz von über 90 % erreicht [17, 63, 68, 94, 96]. Hierbei wird der Verbrauchsvorteil durch Magerbetrieb im NEFZ um 1 bis 2.5 Prozentpunkte verringert [42, 53, 68, 95].

3.2 Thermische Alterung

3.2.1 Alterung von NO_x-Speicher-Katalysatoren

Von Drei-Wege-Katalysatoren ist bekannt, daß je nach Katalysatorbeschichtung und Abgaszusammensetzung ab etwa 950 °C eine thermische Schädigung einsetzt [2, 6]. Hierbei führt Sinterung zu einer verringerten Edelmetall-Dispersion und damit zu einer Reduzierung der katalytisch aktiven Oberfläche [23, 96, 97]. Als Folge weist ein thermisch gealterter Katalysator eine verringerte Schadstoffumsetzung und eine erhöhte Anspringtemperatur auf [11, 98].

Beim NO_x-Speicher-Katalysator ist die thermische Alterung stärker ausgeprägt als beim Drei-Wege-Katalysator, da auch bei der Speicherkomponente ein Wachstum der Teilchengröße und damit ein Oberflächenverlust auftritt. Darüber hinaus bildet ein Teil des Speichermaterials bei hohen Temperaturen mit dem Aluminiumoxid des Washcoats Aluminate (z.B. BaAl₂O₄) [68, 94, 96, 97]. Als Folge sind eine Abnahme der NO_x-Speicherfähigkeit und eine Verkleinerung des Aktivitätsfensters festzustellen [39]. Die Angaben über die Temperaturschwelle, oberhalb derer thermische Alterung des NO_x-Speicher-Katalysators einsetzt, liegen in der Literatur zwischen 700 und 850 °C [6, 25, 26, 41, 68, 78, 88, 96]. Gegenüber älteren Katalysator-Mustern konnte die Beständigkeit gegenüber hohen Temperaturen

bereits deutlich verbessert werden. Eine weitere Erhöhung der Temperaturbeständigkeit durch Modifikationen der Beschichtungen ist ein wichtiges Entwicklungsziel der Katalysatorhersteller [78, 86].

Bei gleich hohen Temperaturen tritt bei Luftüberschuß ($\lambda > 1$) und insbesondere in Phasen mit Schubabschaltung eine stärkere Alterung auf als bei Luftmangel [4, 39, 96, 99]. Ursache ist vor allem die durch Luftüberschuß begünstigte Bildung von Platinoxid, das weniger stark gebunden ist als elementares Platin und so die Sinterung von Platinpartikeln ermöglicht [99].

3.2.2 Maßnahmen zur Verringerung thermischer Alterung

Wie bereits in Kap. 2.2.1 beschrieben, wird üblicherweise bei hoher Motorlast zu Luftverhältnissen $\lambda < 1$ übergangen. Ziel ist unter anderem die Vermeidung zu hoher Katalysator-Temperaturen. In Verbindung mit einem ausreichenden Abstand zwischen Motor und Katalysator kann so eine starke thermische Alterung von Drei-Wege-Katalysatoren weitgehend vermieden werden.

Um einen NO_x-Speicher-Katalysator vor thermischer Alterung zu schützen, ist eine verstärkte Anfettung bei hoher Last und eine Erhöhung des Abstandes zum Motor erforderlich. Dagegen ist jedoch eine motornaher Position des NO_x-Speicher-Katalysators vorteilhaft, um ein schnelles Ansprechen nach dem Kaltstart und eine ausreichende Temperatur bei niedrigsten Lasten sicherzustellen.

Als alternative Maßnahme zur Reduzierung der Katalysator-Temperatur werden in der Literatur Abgasanlagen mit zuschaltbarer Kühlvorrichtung vorgeschlagen. Diese kann als Kühlschleife [6, 88, 100, 101, 102] oder als Wärmetauscher [103, 104] ausgeführt werden. Bei geeigneter Betriebsstrategie können mit derartigen Systemen sowohl die Vorteile einer motornahen Anordnung des NO_x-Speicher-Katalysators als auch ausreichender Temperaturschutz erreicht werden.

3.3 Schwefelproblematik

3.3.1 Schwefelvergiftung

Im Kraftstoff enthaltener Schwefel wird bei der motorischen Verbrennung überwiegend zu Schwefeldioxid (SO₂) oxidiert. Das im Abgas enthaltene SO₂ hat beim NO_x-Speicher-Katalysator zwei negative Effekte [27, 86]. Es konkurriert mit NO um Adsorptionsplätze am Platin und behindert damit die zur Speicherung erforderliche NO₂-Bildung. Vor allem aber verringert es die NO_x-Speicherfähigkeit, indem es nach Oxidation zu SO₃ mit dem Speichermaterial Sulfate bildet. Die Sulfatbildung stellt hierbei eine Konkurrenzreaktion zur Nitratbildung dar. Da die gebildeten Sulfate stabiler als die Nitrate sind, werden sie bei den regelmäßigen Nitrat-Regenerationen nicht zersetzt und blockieren somit die belegten Speicherplätze. Diese Schwefelvergiftung führt nach längerem Betrieb zu einer deutlichen Verringerung der NO_x-Speicherfähigkeit [17, 27, 40, 74, 75, 86, 87].

In der Literatur sind zahlreiche Untersuchungen zum Einfluß des Schwefelgehalts im Kraftstoff auf die Verringerung des NO_x-Umsatzes zu finden [4, 25, 27, 86, 87]. Exemplarisch sind in Abb. 3-2 Ergebnisse von Dauerlaufversuchen dargestellt, die mit einem mit Benzin-Direkteinspritzung ausgerüsteten Fahrzeug im sogenannten

AMA-Zyklus ermittelt wurden. Der AMA-Zyklus ist ein insgesamt 66 km langer Zyklus mit einer Höchstgeschwindigkeit von 113 km/h und einer mittleren Fahrgeschwindigkeit von 44 km/h [25]. Bei Verwendung von Kraftstoff mit 50 mg/kg Schwefel sinkt die NO_x-Konversion im NEFZ-Warmtest nach 7000 km von über 90 % auf 24 %. Auch bei einem sehr niedrigen Schwefelgehalt von 8 mg/kg ist nach 10000 km eine Verringerung der NO_x-Konversion erkennbar.

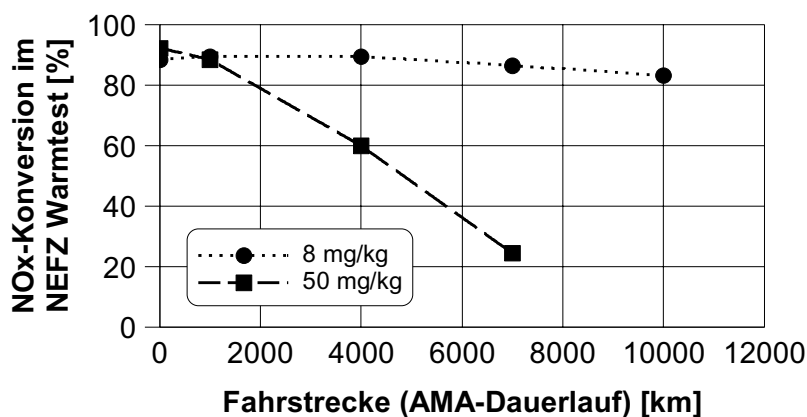


Abb. 3-2: Verringerung der NO_x-Konversion in Abhängigkeit des Schwefelgehalts im Kraftstoff [25]

Der dem NO_x-Speicher-Katalysator zugeführte Schwefel wird praktisch vollständig gespeichert [105]. Hierbei erfolgt die Speicherung vor allem im Eintrittsbereich des NO_x-Speicher-Katalysators [105, 106]. Wie grundlegende Untersuchungen gezeigt haben, nimmt der NO_x-Speicher-Katalysator sowohl bei Magerbetrieb als auch bei Betrieb mit $\lambda < 1$ SO₂ auf [63, 86].

In [7, 107] wird vorgeschlagen, durch Vorschalten einer sogenannten Schwefel-Falle den Schwefel vom NO_x-Speicher-Katalysator fern zu halten. Aufgabe der Schwefel-Falle ist, den Schwefel bei Magerbetrieb zu speichern und nur bei Betrieb mit $\lambda < 1$ und hohen Temperaturen wieder freizusetzen. Es wird angenommen, daß die freigesetzten Schwefelverbindungen unter diesen Bedingungen im nachgeschalteten NO_x-Speicher-Katalysator nicht gespeichert werden. In Versuchen wurde zwar eine Verringerung der Schwefelvergiftung festgestellt, eine vollständige Vermeidung konnte jedoch nicht erreicht werden [7].

In Veröffentlichungen von Automobilherstellern werden Schwefel-Fallen als Komponenten eines Abgasnachbehandlungssystems kaum berücksichtigt. Daher ist davon auszugehen, daß dieses Konzept derzeit allgemein als wenig geeignet betrachtet wird.

Es sei noch angemerkt, daß Schwefel im Kraftstoff auch bei Drei-Wege-Katalysatoren zu einer Beeinträchtigung der Wirksamkeit führt, da Speicherplätze belegt werden und eine intermittierende Sulfatbildung stattfindet. Allerdings ist das Ausmaß der Verschlechterung geringer, zudem ist die Schädigung durch Wechsel zu Kraftstoff mit niedrigerem Schwefelgehalt oder durch Betrieb bei Temperaturen über 500 °C reversibel [27, 108].

3.3.2 Desulfatisierung

Die oben beschriebene Schwefelvergiftung des NOx-Speicher-Katalysators kann durch Zersetzung der Sulfate mit Hilfe einer speziellen Desulfatisierungsprozedur prinzipiell rückgängig gemacht werden [25, 26, 27, 109].

Unter mageren Bedingungen ist erst oberhalb von 1000 °C eine thermische Zersetzung der Sulfate möglich [4, 96]. Bei fetter Abgaszusammensetzung ist dies dagegen bereits bei deutlich niedrigeren Temperaturen möglich. Die Literaturangaben zur mindestens erforderlichen Desulfatisierungs-Temperatur liegen größtenteils zwischen 600 und 650 °C [1, 17, 25, 26, 27, 39, 96, 109]. In [86] werden je nach Formulierung und Präparation der Beschichtung dagegen Mindesttemperaturen von bis zu 750 °C genannt.

In [96, 99] wird berichtet, daß beim untersuchten NOx-Speicher-Katalysator auch nach etwa 25 Verschwefelungen mit jeweils anschließender Desulfatisierung keine nennenswerte Verschlechterung der NOx-Konversion feststellbar ist und die im Katalysator verbliebene Schwefelmenge nur etwa 1 g beträgt. Es wird jedoch nicht ausgeschlossen, daß über die Lebensdauer des NOx-Speicher-Katalysators die irreversibel gespeicherte Schwefelmenge zunimmt und somit doch noch eine bleibende Verschlechterung des NOx-Speicherverhaltens herbeigeführt wird. In [86] beschriebene Untersuchungen zeigen, daß auch nach über 90 Verschwefelungen und Desulfatisierungen eine NOx-Konversion von etwa 95 % immer wieder erreicht wird. Offensichtlich kann also auch nach zahlreichen Verschwefelungen der Ausgangszustand durch Desulfatisierungen zumindest näherungsweise wieder erreicht werden. In [87] wird allerdings beschrieben, daß der Abfall der NOx-Konversion bei der Verschwefelung nach wiederholter Desulfatisierung schneller erfolgt als bei erstmaliger Verschwefelung.

Prinzipiell erfolgt die Desulfatisierung um so schneller, je kleiner das Luftverhältnis und je höher die Temperatur gewählt wird [27, 87, 105]. Zur erforderlichen Dauer der Desulfatisierung sind in der Literatur sehr unterschiedliche Angaben zu finden. Nach [63] liegen die Zeitdauern bei bisher veröffentlichten Desulfatisierungs-Methoden zwischen 1.5 und 15 min. Aus [87, 99] geht hervor, daß etwa nach 3 min eine mindestens zu 90 % vollständige Desulfatisierung erzielt wird. Nach [27] wird die bestmögliche NOx-Konversion nach 5 min wieder erreicht. In [39] wird dagegen berichtet, daß die ursprüngliche NOx-Speicherkapazität auch nach 10 min erst zu etwa 75 % wiederhergestellt werden kann.

Bei der Desulfatisierung wird der Schwefel im wesentlichen in Form der gasförmigen Schwefelverbindungen Schwefeldioxid (SO₂), Schwefelwasserstoff (H₂S) und Kohlenoxidsulfid (COS) freigesetzt [25, 105, 110]. Nachfolgend werden die Eigenschaften dieser Schwefelverbindungen erläutert.

Schwefeldioxid (SO₂):

SO₂ ist ein farbloses Gas mit stechendem Geruch. Es ist giftig und führt zu Reizungen der Augen und Atemwege. Mit dem bei der Verbrennung entstehenden Wasser kann schweflige Säure gebildet werden. Der Geruchsschwellenwert liegt zwischen 0.16 und 1.3 mg/m³ entsprechend einer Volumenkonzentration zwischen 0.3 und 2.5 ppm. Der Luftgrenzwert (TRGS 900) liegt bei 5 mg/m³ [11, 111, 112].

Schwefelwasserstoff (H₂S):

H₂S ist sehr giftig und führt ebenfalls zu Reizungen der Augen und Atemwege. Besonders charakteristisch ist der üble Geruch, der mit dem Geruch fauler Eier

assoziiert wird. Als Geruchsschwelle sind in der Literatur deutlich voneinander abweichende Konzentrationen angegeben. Diese sind in Abb. 3-3 dargestellt und liegen zwischen 0.8 und 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ entsprechend einer Volumenkonzentration von 0.5 ppb bis 0.1 ppm [27, 112 - 116]. Der Luftgrenzwert (TRGS 900) beträgt 15 mg/m^3 und liegt damit um den Faktor 100 über der maximalen Geruchsschwelle [112].

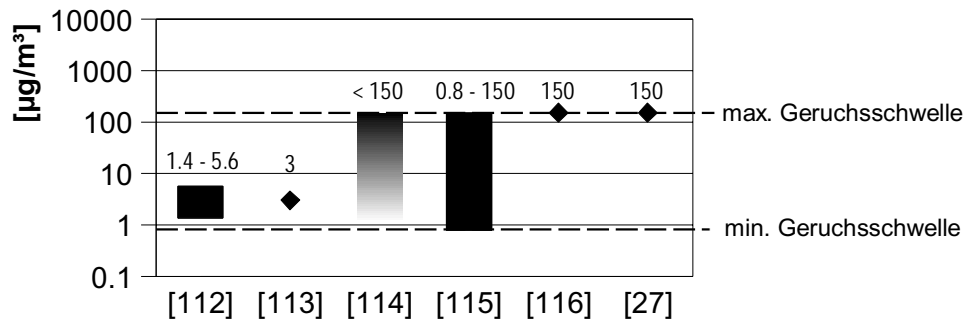


Abb. 3-3: Literaturangaben zur H₂S-Geruchsschwelle

Kohlenoxidsulfid (COS):

COS, auch als Carbonylsulfid bezeichnet, ist ein farb- und geruchloses Gas. Es ist sehr leicht entzündlich, giftig beim Einatmen und hat eine narkotische Wirkung. In der deutschen Gefahrstoffverordnung und entsprechenden europäischen Regularien ist COS bisher nicht berücksichtigt. Für die ehemalige UdSSR ist ein MAK-Wert von 10 mg/m^3 bekannt [117 - 121].

Welche der oben genannten Schwefelverbindungen bei der Desulfatisierung überwiegend auftreten, hängt im wesentlichen vom Luftverhältnis bei der Desulfatisierung ab. Je näher das Luftverhältnis an $\lambda = 1$ gewählt wird, desto größer ist der Anteil SO₂ an der Schwefel-Emission. Bei kleinerem Luftverhältnis wird der Schwefel dagegen überwiegend in Form von H₂S freigesetzt [4, 7, 17, 24, 25, 40, 87, 96, 99, 122].

In Abb. 3-4 sind Desulfatisierungen mit unterschiedlichen Luftverhältnissen dargestellt. Vor der Desulfatisierung wurde der NO_x-Speicher-Katalysator jeweils bei $\lambda > 1$ aufgeheizt, bevor etwa bei $t = 600$ s zu $\lambda < 1$ gewechselt wurde. In beiden dargestellten Fällen tritt zunächst kurzzeitig eine hohe SO₂-Emission auf, bevor es je nach Luftverhältnis zu einer mehr oder weniger starken Bildung von H₂S kommt [99].

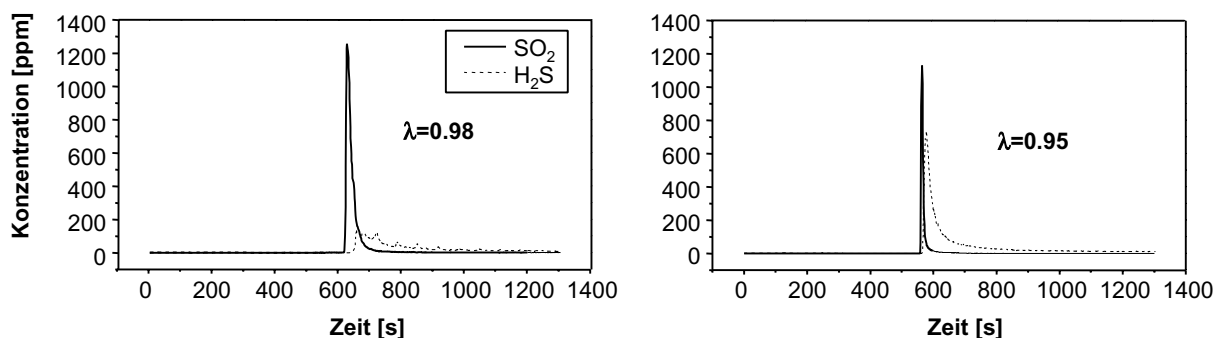


Abb. 3-4: Desulfatisierung mit unterschiedlichen Luftverhältnissen (Aufheizung mit $\lambda > 1$) [99]

Um eine Geruchsbelästigung durch hohe H₂S-Konzentrationen zu vermeiden, ist ein Luftverhältnis nahe $\lambda = 1$ anzustreben. Dies bestätigen auch olfaktometrische Untersuchungen in [122], bei denen bei einer Desulfatisierung mit einem Luftverhältnis von etwa $\lambda = 0.88$ ein sehr hohes Geruchsbelästigungspotential festgestellt wird.

Während in den meisten bereits genannten Literaturstellen Luftverhältnisse $\lambda < 1$ als Voraussetzung für eine Desulfatisierung genannt werden, ist nach [87] auch bei Betrieb mit $\lambda = 1$ eine Desulfatisierung möglich. Bei Temperaturen über 650 °C ist hierfür allerdings mit etwa 12 min die vierfache Dauer gegenüber Desulfatisierungsversuchen mit $\lambda = 0.95$ erforderlich.

In [4, 96, 99] werden Desulfatisierungsversuche mit periodischem Wechsel zwischen magerem und fettem Abgas beschrieben (Abb. 3-5). Bei einem Versuch mit jeweils 10s langen Phasen bei $\lambda = 1.05$ und $\lambda = 0.98$ wird der Schwefel praktisch ausschließlich als SO₂ freigesetzt. Diese Variante ist also vorteilhaft zur Vermeidung einer hohen H₂S-Emission. Ein kleineres Luftverhältnis in den Fettphasen von $\lambda = 0.95$ führt dagegen wieder zu einer höheren H₂S-Emission.

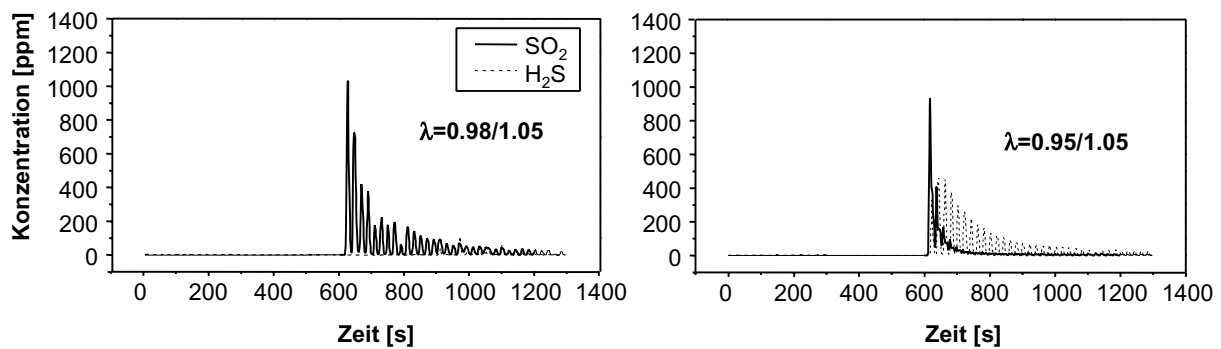


Abb. 3-5: Desulfatisierung mit periodischem Wechsel zwischen $\lambda > 1$ und $\lambda < 1$ (Aufheizung mit $\lambda > 1$) [99]

Den oben genannten Untersuchungen zufolge erscheint eine fast vollständige Vermeidung der H₂S-Bildung bei der Desulfatisierung möglich. Dagegen wird in [6] festgestellt, daß die H₂S-Bildung zwar minimiert, aber nicht vollständig verhindert werden kann. Auch nach [105] scheint die H₂S-Bildung bei einer wirksamen Desulfatisierung unvermeidlich zu sein.

Die Weiterentwicklung der NO_x-Speicher-Katalysatoren zielt unter anderem auf eine schnellere Freisetzung des gespeicherten Schwefels bei der Desulfatisierung. Aus diesem Grund setzt Toyota seit Juni 1998 auf dem japanischen Markt einen NO_x-Speicher-Katalysator mit sechseckigen Kanalquerschnitten ein. Hierdurch soll wegen der gleichmäßigeren Washcoat-Stärke im Vergleich zu üblichen Katalysatoren mit quadratischen Kanalquerschnitten die Desorption von gespeichertem Schwefel verbessert werden [123,124].

Auch eine Absenkung der zur Desulfatisierung erforderlichen Temperaturen ist wünschenswert. Allerdings besteht ein Zusammenhang zwischen der thermodynamischen Stabilität der mit der Speicherkomponenten gebildeten Nitrate und der Stabilität der Sulfate [125]. Somit ist es prinzipiell nicht möglich, einen Katalysatortyp mit hohen NO_x-Konversionsraten auch bei relativ hohen

Temperaturen und zugleich niedriger Mindesttemperatur zur Desulfatisierung zu entwickeln.

Bei Schwefelgehalten von unter 50 mg/kg sind nach [24, 53] etwa alle 700 bis 2000 km Desulfatisierungen erforderlich. In [126] wird beschrieben, daß bei einem Schwefelgehalt von 100 mg/kg etwa alle 300 km eine Desulfatisierung durchgeführt werden muß. Falls motorische Maßnahmen zur Anhebung der Katalysator-Temperatur auf die zur Desulfatisierung erforderlichen Werte nötig sind, ist bei hohen Schwefelgehalten im Kraftstoff und entsprechend häufigen Regenerationen mit einem spürbaren Kraftstoff-Mehrverbrauch zu rechnen [6]. Nach [126] wird der Verbrauchsvorteil durch Magerbetrieb je 50 mg Schwefel pro kg Kraftstoff um ein bis zwei Prozentpunkte verringert. In [27] wird bei einem Schwefelgehalt von 100 mg/kg ein Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Desulfatisierungen von etwa 1.4 % angegeben.

3.4 Motorsteuerung für einen Ottomotor mit Direkteinspritzung und NOx-Speicher-Katalysator

Die Motorsteuerung für einen Ottomotor mit Direkteinspritzung muß bei Einsatz eines NOx-Speicher-Katalysators unter anderem folgende zusätzliche Aufgaben erfüllen:

- rascher drehmomentneutraler Wechsel zwischen Ladungsschichtung und Betrieb mit $\lambda < 1$ zur Nitrat-Regeneration
- Regelung des Luftverhältnisses bei Betrieb mit $\lambda < 1$
- Regelung des Mager/Fett-Betriebs (Zeitpunkte und Dauer der Regenerationen)
- Durchführung von Desulfatisierungen
- Diagnose des Katalysatorzustands, insbesondere der NOx-Speicherfähigkeit

Auf diese Aufgaben und die dafür erforderlichen Funktionen in der Motorsteuerung wird nachfolgend eingegangen.

3.4.1 Betriebsartwechsel für Nitrat-Regenerationen

Für die Durchführung der regelmäßig erforderlichen Nitrat-Regenerationen ist ein Wechsel von Ladungsschichtung zu Betrieb mit $\lambda < 1$ erforderlich. Der Betrieb mit $\lambda < 1$ muß homogen erfolgen, um Rußbildung zu vermeiden. Ausgehend von Betrieb mit Ladungsschichtung ist also ein Betriebsartwechsel erforderlich, um die Regeneration zu ermöglichen. Dieser soll selbstverständlich drehmomentneutral erfolgen und damit für den Fahrer nicht spürbar sein. Das gleiche gilt für den Wechsel zurück zu Magerbetrieb. Speziell für den Einsatz eines NOx-Speicher-Katalysators ist es zusätzlich wichtig, daß möglichst schnell ein kleines Luftverhältnis eingestellt wird. Hintergrund ist zum einen die Meidung des Bereichs zwischen $\lambda = 1$ und $\lambda = 1.2$ wegen der hohen NOx-Rohemission, zum anderen eine Minimierung des NOx-Desorptionspeaks zu Beginn der Regeneration mit Hilfe eines hohen Reduktionsmittelangebots [68].

Um den Wechsel zwischen den Betriebsarten in der oben beschriebenen Weise realisieren zu können, ist eine Motorsteuerung mit Drehmomentführung erforderlich [37, 41, 64, 79]. Bei einem derartigen System stellt das geforderte Motordrehmoment die wesentliche Eingangsgröße dar. Mit Hilfe eines im Steuergerät implementierten

Motormodells werden hieraus die erforderlichen Werte für Einspritzdauer, Zündwinkel und weitere Parameter ermittelt. Eine weitere Voraussetzung für die Realisierung der verschiedenen Betriebsarten ist die Entkopplung der Drosselklappe von der Fahrpedalstellung. Daher ist eine elektronisch gesteuerte Drosselklappe nötig [35, 37, 41].

Für eine detaillierte Beschreibung des erforderlichen Ablaufs in der Motorsteuerung beim Betriebsartwechsel sei beispielsweise auf [64, 127 - 129] verwiesen.

3.4.2 Regelung des Luftverhältnisses bei Betrieb mit $\lambda < 1$

Mit einer konventionellen binären Lambdasonde ist eine Regelung des Luftverhältnisses nur auf $\lambda = 1$ möglich. Mit einer Breitband-Lambdasonde kann eine Regelung dagegen im gesamten Meßbereich erfolgen. Dieser kann je nach verwendetem Sondentyp beispielsweise von $\lambda = 0.7$ bis $\lambda = \infty$ reichen [130]. Somit ist eine Regelung des Luftverhältnisses auch bei Nitrat-Regenerationen und Desulfatisierungen möglich. Sofern homogener Magerbetrieb vorgesehen ist, kann durch den Einsatz einer Breitband-Lambdasonde auch in dieser Betriebsart eine Regelung des Luftverhältnisses erfolgen [24, 53].

Mit einer Breitband-Lambdasonde kann eine lineare Lambdaregelung realisiert werden, da die Regelabweichung jeweils präzise ermittelt werden kann. Eine übliche Lambdaregelung mit einer binären Lambdasonde ist dagegen nur als Zwei-Punkt-Regelung zur Regelung des Luftverhältnisses auf $\lambda = 1$ ausgeführt. Hierbei oszilliert das Luftverhältnis ständig mit einer entsprechenden Abweichung um den Wert $\lambda = 1$ [10, 72, 131].

Nachteil einer Breitband-Lambdasonde ist die gegenüber einer binären Lambdasonde geringere Genauigkeit bei $\lambda = 1$. Um dies auszugleichen, kann zusätzlich eine binäre Lambdasonde eingesetzt werden, um bei $\lambda=1$ -Betrieb eine Korrektur des mit der motornahen Breitband-Lambdasonde geregelten Luftverhältnisses durchzuführen [12, 23, 39, 79].

3.4.3 Regelung des Mager/Fett-Betriebs

In einem typischen Teillast-Betriebspunkt bei 70 km/h Konstantfahrt ergibt sich eine Adsorptionsdauer von etwa 60 s und eine Regenerationsdauer von etwa 2 s [132]. Fest vorgegebene Regenerations- und Adsorptionsdauern sind jedoch als ungeeignet zu betrachten. Vielmehr müssen Zeitpunkte und Dauern von Nitrat-Regenerationen dem Fahrzustand und dem Katalysatorverhalten angepaßt werden [4, 39, 68]. Nachfolgend wird dargestellt, welche Ansätze hierzu in der Literatur beschrieben werden.

3.4.3.1 Wahl der Zeitpunkte für Nitrat-Regenerationen

Eine Nitrat-Regeneration und damit eine Beendigung der Adsorptionsphase ist erforderlich, wenn die Speicherfähigkeit des NOx-Speicher-Katalysators nachläßt und damit die NOx-Konzentration nach NOx-Speicher-Katalysator unzulässig hoch wird. Hierbei gibt es mehrere Wege, Informationen über die Speicherfähigkeit des NOx-Speicher-Katalysators zu erhalten. Diese werden im Folgenden erläutert.

Das Verhalten des NOx-Speicher-Katalysators kann durch ein in der Motorsteuerung implementiertes mathematisches Modell nachgebildet werden. Als wichtige Eingangsgrößen für die Modellierung des NOx-Speicherverhaltens sind die NOx-Rohemission, die bisherige Adsorptionsdauer, der Abgasmassenstrom und die Abgastemperatur zu nennen. Die NOx-Rohemission des Motors kann zum Beispiel mit Hilfe eines Grundkennfelds und diversen Einflußfaktoren wie Kühlwassertemperatur und Abgasrückführtrate ermittelt werden. Die Modellierung der Katalysator-Temperatur kann auf Basis eines Temperatursensors nach Startkatalysator und der gemessenen Luftmasse erfolgen [23]. Mit Hilfe des Katalysatormodells kann nun die im NOx-Speicher-Katalysator gespeicherte NOx-Masse und der aktuelle Wirkungsgrad der NOx-Speicherung ermittelt werden. Beispielsweise bei Überschreiten einer maximal zulässigen NOx-Beladung oder bei Unterschreiten eines vorgegebenen minimalen Wirkungsgrades bei der Speicherung kann dann eine Regeneration ausgelöst werden [6, 23, 37, 39, 42, 68, 79, 88, 133]. Dieses Verfahren ist jedoch prinzipbedingt sehr ungenau, da sich beispielsweise die NOx-Rohemission über die Laufzeit, durch Serienstreuungen und durch äußere Einflüsse wie Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit wesentlich verändern kann. Auch das Katalysatorverhalten kann sich durch Verschwefelung und thermische Alterung ändern. Eine unzulässig hohe NOx-Emission nach NOx-Speicher-Katalysator kann somit nur mit großen Sicherheitsreserven zuverlässig vermieden werden. Da hierbei von einem ungünstigen Fall mit hoher NOx-Rohemission und geringer NOx-Speicherfähigkeit des Katalysators ausgegangen wird, ergeben sich unnötig häufige Regenerationen und damit ein erhöhter Kraftstoffverbrauch [53, 133, 134].

Durch Einsatz eines NOx-Sensors kann die Regelung der Adsorptionsdauer deutlich besser an die tatsächlichen Bedingungen angepaßt werden. Beispielsweise kann die gemessene aktuelle NOx-Konzentration nach NOx-Speicher-Katalysator oder der hieraus berechnete NOx-Massenstrom als Kriterium für das Einleiten einer Nitrat-Regeneration herangezogen werden. Ebenso ist es möglich, auf Basis der aktuellen NOx-Konzentration nach NOx-Speicher-Katalysator mit Hilfe des Katalysatormodells die gespeicherte NOx-Masse zu bestimmen und diese mit einem maximal zulässigen Wert zu vergleichen [4, 6, 23, 53, 68, 79, 134, 135].

Die Genauigkeit des Modells kann auch durch Adaption mit Hilfe einer Lambdasonde nach NOx-Speicher-Katalysator verbessert werden. Wie im nächsten Kapitel noch erläutert wird, liefert eine nach NOx-Speicher-Katalysator angeordnete Lambdasonde eine Information über die tatsächlich benötigte Regenerationsdauer. Bei Abweichen dieses Wertes gegenüber der mit dem Modell errechneten theoretischen Regenerationsdauer kann eine Korrektur des Modells erfolgen. Mit diesem Verfahren wird allerdings ein höherer Kraftstoffverbrauch erzielt als bei Einsatz einer mittels NOx-Sensor optimierten Regenerationsstrategie [53].

Als geeignete Fahrzustände für Nitrat-Regenerationen sind vor allem Beschleunigungen anzusehen, da in diesen Phasen wegen hoher NOx-Rohemission und hoher Abgastemperatur ungünstige Bedingungen für die NOx-Speicherung vorliegen [63]. Hinzu kommt, daß bei höherer Motorlast der Verbrauchsnachteil durch Verzicht auf Magerbetrieb während der Regeneration geringer ist als bei niedriger Last. Prinzipiell sind jedoch auch im Leerlauf und in Schubphasen bei Verzicht auf Schubabschaltung Regenerationen möglich [68].

Eine Nitrat-Regeneration kann auch unabhängig von der aktuellen Speicherfähigkeit des NOx-Speicher-Katalysators erforderlich sein. Dies ist dann der Fall, wenn die Drehmomentforderung durch den Fahrer so stark erhöht wird, daß von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb gewechselt werden muß. Vor $\lambda=1$ -Betrieb ist generell eine Nitrat-Regeneration erforderlich, da andernfalls die im Magerbetrieb gespeicherten Stickoxide allmählich desorbiert werden, ohne jedoch durch entsprechende Reduktionsmittel umgesetzt werden zu können [68, 136]. Hinzu kommt, daß durch im Magerbetrieb gespeicherten Sauerstoff die Reduktion der Stickoxide gemäß der Drei-Wege-Funktion des Katalysators zu Beginn des $\lambda=1$ -Betriebs stark eingeschränkt ist. Aus diesem Grund wird auch bei Ottomotoren mit einem konventionellen Drei-Wege-Katalysator üblicherweise nach Betrieb mit Schubabschaltung zunächst kurz ein Luftverhältnis $\lambda < 1$ eingestellt, bevor zu $\lambda = 1$ übergegangen wird [68].

3.4.3.2 Regelung der Regenerationsdauer

Der Reduktionsmittelbedarf bei der Nitrat-Regeneration wird im wesentlichen durch die gespeicherte NOx-Masse sowie durch die Umsetzung von im Washcoat gespeichertem Sauerstoff bestimmt [40, 68]. Diese Größen können beispielsweise durch Nachbildung des Katalysatorverhaltens mit einem mathematischen Modell ermittelt werden. Somit ist der Reduktionsmittelbedarf bekannt, so daß die Berechnung der in Abhängigkeit von Betriebspunkt und Luftverhältnis erforderlichen Regenerationsdauer erfolgen kann [23, 37, 68]. Hierbei ist allerdings die Genauigkeit der mit dem Modell ermittelten Größen als kritisch anzusehen.

Ein anderes in der Literatur mehrfach beschriebenes Verfahren stützt sich auf die Information, die eine Lambdasonde nach NOx-Speicher-Katalysator liefert. Es ist bekannt, daß das Luftverhältnis nach NOx-Speicher-Katalysator bei einer Nitrat-Regeneration mit $\lambda < 1$ zunächst etwa bei $\lambda = 1$ verharrt. Dieser Effekt ist durch die Freisetzung des gespeicherten Sauerstoffs sowie durch die Nitrat-Zersetzung bedingt, bei der neben Stickoxid auch Sauerstoff freigesetzt wird (vgl. Kap. 6.2.2.1). Durch die Reaktion von Sauerstoff und Stickoxid mit den bei Motorbetrieb mit $\lambda < 1$ in großer Menge zugeführten Reduktionsmitteln CO und HC ergibt sich ein etwa stöchiometrisches Luftverhältnis [68]. Erst wenn der Sauerstoff und die Nitrate vollständig umgesetzt sind, fällt das Luftverhältnis nach NOx-Speicher-Katalysator auf den Wert vor NOx-Speicher-Katalysator. Folglich kann mit Hilfe einer nach NOx-Speicher-Katalysator angeordneten Lambdasonde das Ende der Regeneration detektiert und somit vor Einsetzen eines hohen HC- und CO-Durchbruchs wieder zu Magerbetrieb gewechselt werden.

Eine vollständige Vermeidung des Reduktionsmittel-Durchbruchs ist allerdings auch bei Regelung der Regenerationsdauer mit Hilfe einer Lambdasonde nach NOx-Speicher-Katalysator nicht möglich, da zum einen der Signalabfall auf $\lambda < 1$ unmittelbar mit dem Einsetzen des Reduktionsmittel-Durchbruchs zusammenhängt, zum anderen sich bei Erreichen des Abbruchkriteriums noch ein gewisses Abgasvolumen mit unverändertem Luftverhältnis vor Katalysator in der Abgasanlage befindet [68]. Prinzipiell ist für dieses Verfahren sowohl eine Breitband-Lambdasonde als auch eine binäre Lambdasonde geeignet [53, 68, 135, 137, 138]. Eine binäre Lambdasonde ist jedoch vorteilhaft, da sie, wie bereits erwähnt, auch für eine Korrektur des mit der motornahen Breitband-Lambdasonde geregeltten Luftverhältnisses genutzt werden kann.

3.4.4 Durchführung von Desulfatisierungen

Bei Verwendung von schwefelhaltigem Kraftstoff sind in regelmäßigen Abständen Desulfatisierungen erforderlich. Wie bereits dargestellt, werden hierzu Katalysator-Temperaturen von mindestens 600 °C benötigt. Derartige Temperaturen werden im Fahrbetrieb bei hohen Lasten, beispielsweise bei zügiger Autobahnfahrt, von selbst erreicht. Wenn in diesen Phasen Luftverhältnisse $\lambda < 1$ durch Vollast-Anfettung oder durch gezielte Vorgabe eingestellt werden, können auf einfache Weise Desulfatisierungen durchgeführt werden [1, 26, 92, 96]. Es kann jedoch nicht vorausgesetzt werden, daß dieser Fahrzustand bei jedem Fahrzeug ausreichend häufig und stets mit der erforderlichen Dauer erreicht wird. Somit sind gezielte Maßnahmen zur Anhebung der Katalysator-Temperatur erforderlich, um auch unter ungünstigen Bedingungen regelmäßige Desulfatisierungen durchführen zu können [1, 26, 27, 40, 63, 96].

In der Literatur werden verschiedene motorische und außermotorische Maßnahmen beschrieben, mit deren Hilfe eine Anhebung der Katalysator-Temperatur möglich ist:

- Spätzündung: Hohe Abgastemperaturen infolge einer sehr späten Verbrennung führen zu einer Aufheizung des Katalysators [4, 26, 100, 139, 140].
- Lufteinblasung: Bei Motorbetrieb mit $\lambda < 1$ wird der eingesetzte Kraftstoff wegen des Luftmangels unvollständig verbrannt. Durch Lufteinblasung im Abgasstrang können CO und HC im Katalysator nachmotorisch oxidiert werden. Die Exothermie dieser Reaktionen führt zur Aufheizung von Katalysator und Abgas [100, 141].
- Zylinder-Vertrimmung: Ein Teil der Zylinder wird mit Luftmangel, der Rest mit Luftüberschuß betrieben. Dadurch erfolgt die vollständige Umsetzung des eingesetzten Kraftstoffs erst in dem Katalysator, vor dem das Abgas der verschiedenen Zylinder zusammengeführt wird. Bei einer zweiflutigen Gestaltung der Abgasanlage vor dem NO_x-Speicher-Katalysator und entsprechender Aufteilung der Zylinder für Betrieb mit Luftüberschuß und Luftmangel wird die Wärme erst im NO_x-Speicher-Katalysator freigesetzt. Bei einflutiger Abgasanlage erfolgt die Wärmefreisetzung bereits im Startkatalysator [26, 100, 142, 143]. Ein ähnlicher Effekt wie durch Zylinder-Vertrimmung kann dadurch erreicht werden, daß alle Zylinder jeweils im Wechsel zwei Arbeitsspiele mit Luftüberschuß und zwei Arbeitsspiele mit Luftmangel betrieben werden [144].
- Spezielle Einspritzstrategie: Bei Direkteinspritzung kann durch Wahl von geeigneten Strategien zur Einspritzung eine Anhebung der Abgastemperatur realisiert werden. Wesentliche Parameter sind hierbei der Einspritzzeitpunkt und die Anzahl der Einspritzungen pro Arbeitsspiel. Beispielsweise kann durch eine zweite Kraftstoff-Einspritzung spät im Expansionstakt eine Anreicherung des Abgases mit unverbrannten Kohlenwasserstoffen erfolgen. Durch die Oxidation der Kohlenwasserstoffe im Katalysator wird eine Temperaturanhebung erreicht [26, 100].
- Deaktivierung der Abgaskühlung bei motornaher Katalysator-Anordnung: In Kap. 3.2.2 werden Abgasanlagen mit zuschaltbarer Kühlvorrichtung beschrieben. Mit derartigen Systemen kann der NO_x-Speicher-Katalysator motornah angeordnet werden, ohne eine verstärkte thermische Alterung in Kauf nehmen zu müssen. Sofern ein solches System eingesetzt wird, führt die Deaktivierung der Kühlvorrichtung unmittelbar zu einer Anhebung der Katalysator-Temperatur. Im

Gegensatz zu den oben genannten Verfahren ist diese Maßnahme verbrauchsneutral, allerdings ist die erreichbare Temperaturerhöhung begrenzt.

- Zusätzliche Heizeinrichtung: Der NOx-Speicher-Katalysator kann auch durch eine dem NOx-Speicher-Katalysator vorgeschaltete elektrische Heizeinrichtung oder einen Brenner aufgeheizt werden. Diese Heizmaßnahmen können praktisch unabhängig vom Motorbetrieb eingesetzt werden [100, 137].

Nach [25, 63, 92] ist es noch unklar, inwieweit auch unter ungünstigen Bedingungen eine Desulfatisierung im Fahrbetrieb realisiert werden kann. Dagegen wird in [88] berichtet, daß mit Spätzündung und einer motornahen Katalysator-Anordnung im City-Zyklus des NEFZ Temperaturen über 600 °C erreicht werden können. Somit erscheint es möglich, auch unter ungünstigen Bedingungen durch geeignete Maßnahmen die zur Desulfatisierung erforderlichen Temperaturen zu erreichen.

Hierbei ist es Aufgabe der Motorsteuerung, geeignete Fahrzustände für gezielt herbeigeführte Desulfatisierungen auszuwählen und die Einhaltung der erforderlichen Temperaturen über die gesamte Dauer der Desulfatisierung sicherzustellen. Wichtige Voraussetzung hierfür ist die Kenntnis der aktuellen Katalysator-Temperatur durch Modellierung oder Messung.

Die erforderliche Dauer für eine Desulfatisierung kann beispielsweise über ein abgelegtes Kennfeld vorgegeben werden. Ebenso ist es möglich, den Desulfatisierungsfortschritt mit Hilfe eines Modells in Abhängigkeit der Katalysator-Temperatur und des Luftverhältnisses nachzubilden. Die Desulfatisierung kann dann beendet werden, wenn die modellierte Speicherfähigkeit wieder einen zufriedenstellenden Wert erreicht hat [1, 140].

Falls die Verschwefelung über ein Modell nachgebildet wird, sind auch Fahrzustände zu berücksichtigen, in denen ohne gezielte Aufheizmaßnahmen eine Desulfatisierung erfolgt und somit die gespeicherte Schwefelmasse verringert wird [139].

3.4.5 Diagnose des Katalysatorzustands

Wie bereits beschrieben, kann die NOx-Speicherfähigkeit des NOx-Speicher-Katalysators durch Schwefelvergiftung oder thermische Alterung verringert werden. Die Beurteilung des aktuellen Katalysatorzustands, als Diagnose bezeichnet, ist somit eine wichtige Aufgabe der Motorsteuerung. Zum einen kann hierdurch die Notwendigkeit einer Desulfatisierung festgestellt werden, zum anderen kann so die Forderung des Gesetzgebers nach einer On-Board-Diagnose (OBD, EOBD) erfüllt werden.

Die Diagnose des NOx-Speicher-Katalysators kann beispielsweise durch Vergleich des mittels NOx-Sensor oder Lambdasonde gemessenen tatsächlichen Verhaltens mit dem in der Motorsteuerung modellierten Verhalten erfolgen. Ein verstärkter NOx-Schlupf oder eine verkürzte Dauer für eine vollständige Regeneration weisen hierbei auf eine Verschlechterung der Speicherfähigkeit hin [1, 4, 24, 37, 138, 145, 146, 147]. Wie bei der Wahl der Regenerations-Zeitpunkte kann auch hier mit einem NOx-Sensor ein genaueres Ergebnis erzielt werden als mit einer Lambdasonde [24]. Die Diagnose eines verschlechterten NOx-Speicherverhaltens weist zunächst auf die Notwendigkeit einer Desulfatisierung hin. Falls nach erfolgter Desulfatisierung keine zufriedenstellende Verbesserung des Speicherverhaltens erreicht wird, liegt eine irreversible Schädigung, die beispielsweise durch thermische Alterung bedingt ist

[24, 53, 148]. Da die Drei-Wege-Funktion des NOx-Speicher-Katalysators jedoch erhalten bleibt, kann der Motor in diesem Fall weiter mit $\lambda = 1$ betrieben werden und so ein starker Anstieg der NOx-Emission nach NOx-Speicher-Katalysator vermieden werden [53]. Parallel hierzu kann eine Warnlampe zur Überprüfung des Katalysators in der Werkstatt auffordern [148].

Alternativ sind auch andere Verfahren denkbar, um auf die Notwendigkeit einer Desulfatisierung zu schließen. Beispielsweise kann eine Berechnung der im NOx-Speicher-Katalysator gespeicherten Schwefelmenge mit Hilfe eines einfachen Modells erfolgen. Die wesentlichen Eingangsgrößen sind hierbei der Schwefelgehalt des Kraftstoffs und die eingespritzte Kraftstoffmasse. Problematisch ist bei diesem Ansatz, daß der Schwefelgehalt des Kraftstoffs nicht exakt bekannt ist, da bis heute kein hierfür geeigneter Sensor verfügbar ist. Da der Schwefelgehalt des Kraftstoffs je nach Herkunft stark schwanken kann (vgl. Kap. 2.1.3), ist sicherheitshalber ein relativ hoher Wert anzunehmen. Hierdurch kann es zu unnötigen Desulfatisierungen mit entsprechend erhöhtem Kraftstoffverbrauch kommen [4, 43, 44, 139].

Zusätzlich zur Diagnose des NOx-Speicherverhaltens ist, wie bei Drei-Wege-Katalysatoren, eine Überwachung der HC- und CO-Konversion erforderlich. Dies sehen die Vorschriften für die On-Board-Diagnose vor. Hierbei ist es üblich, indirekt durch die Bestimmung der O₂-Speicherfähigkeit auf das Konversionsverhalten zu schließen. Um die O₂-Speicherfähigkeit zu detektieren, wird durch periodische Variation der Luft- und Kraftstoffmenge eine Schwingung des Luftverhältnisses erzeugt. Diese wird durch den Katalysator je nach O₂-Speicherfähigkeit mehr oder weniger stark gedämpft. Mit einer Lambdasonde nach Katalysator kann somit die O₂-Speicherfähigkeit des Katalysators detektiert werden [23, 149].

Bei einem alternativen Verfahren wird mit einem Temperatursensor die Anhebung der Abgastemperatur detektiert, die sich nach Katalysator durch die Oxidation von CO und HC ergibt [23].

3.4.6 Erforderliche Sensorik

Aus den vorangegangenen Kapiteln wird deutlich, daß das System zur Motorsteuerung gegenüber einem konventionellen Ottomotor mit Drei-Wege-Katalysator um einige Sensoren erweitert werden muß. Die in der Literatur beschriebenen Systeme unterscheiden sich in dieser Hinsicht nur geringfügig. Die Anordnung der Sensoren entspricht hierbei der Darstellung in Abb. 3-6 [1, 4, 12, 23, 26, 37, 39, 42, 53, 79]. Die einzelnen Aufgaben der Sensoren werden nachfolgend zusammengefaßt.

Breitband-Lambdasonde:

Mit einer motornahen Breitband-Lambdasonde kann eine Regelung des Luftverhältnisses nicht nur bei $\lambda = 1$, sondern im gesamten Meßbereich der Breitband-Lambdasonde und somit auch bei Nitrat-Regenerationen, Desulfatisierungen und bei homogenem Magerbetrieb erfolgen.

Temperatursensor:

Um die Temperatur im NOx-Speicher-Katalysator zuverlässig modellieren zu können, ist eine Messung der Abgastemperatur vor NOx-Speicher-Katalysator

erforderlich. Durch Messung der Abgastemperatur an dieser Stelle kann auch eine Diagnose der HC- und CO-Konversion im Startkatalysator erfolgen.

Binäre Lambdasonde:

Mit einer binären Lambdasonde nach NOx-Speicher-Katalysator kann das Ende einer Nitrat-Regeneration detektiert werden. Daneben ist eine Korrektur des mit der motornahen Breitband-Lambdasonde geregelten Luftverhältnisses bei $\lambda=1$ -Betrieb möglich. Zusätzlich kann durch Vergleich mit dem Signal der motornahen Lambdasonde eine Diagnose der O₂-Speicherfähigkeit der beiden Katalysatoren erfolgen.

NOx-Sensor:

Mit einem NOx-Sensor hinter dem NOx-Speicher-Katalysator kann die Notwendigkeit einer Nitrat-Regeneration detektiert werden. Dabei kann das Sensorsignal direkt oder indirekt als Eingangsgröße für ein Katalysatormodell verwendet werden. Zusätzlich ist mit einem NOx-Sensor die Diagnose des NOx-Speicherverhaltens möglich. Hierdurch kann Desulfatisierungsbedarf oder eine irreversible Schädigung erkannt werden.

Ein Verzicht auf den NOx-Sensor, beispielsweise aus Kostengründen oder wegen begrenzten Bauraums, erscheint prinzipiell möglich, hat aber eine Verschlechterung der Betriebsstrategie mit Nachteilen hinsichtlich NOx-Emission und Kraftstoffverbrauch zur Folge.

In [53, 138] wird ein NOx-Sensor mit integrierter Lambdasonden-Funktion beschrieben. Bei Einsatz eines derartigen Sensors kann die separate Lambdasonde nach NOx-Speicher-Katalysator entfallen.

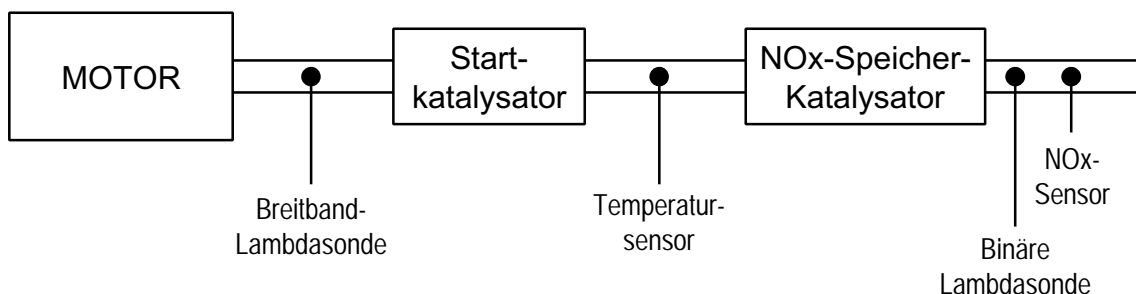


Abb. 3-6: Sensorik für die Motorsteuerung eines Ottomotors mit Direkteinspritzung und NOx-Speicher-Katalysator

4. Aufgabenstellung

Im vorangegangenen Kapitel wurde dargestellt, daß bereits vielfältige Untersuchungen zum Betrieb eines mager betriebenen Ottomotors mit NO_x-Speicher-Katalysator durchgeführt wurden. Nachfolgend wird der weitere Untersuchungsbedarf beschrieben, der sich aus bisherigen Veröffentlichungen ergibt und daher Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist.

Wie aus verschiedenen Veröffentlichungen hervorgeht, besteht eine wesentliche Aufgabe bei Einsatz eines NO_x-Speicher-Katalysators in der Optimierung der Nitrat-Regenerationen. Die prinzipiellen Einflüsse der verschiedenen Parameter sind aus stationären Untersuchungen bekannt. Hierbei wurde auch bereits festgestellt, daß bei der Optimierung der Parameter ein Zielkonflikt zwischen geringer NO_x-Emission und geringem Kraftstoffverbrauch auftritt. Untersuchungen zur detaillierten Optimierung der Regenerationsparameter mit Fahrzeugen im Abgastest sind bislang noch nicht veröffentlicht.

Daher soll im Rahmen dieser Arbeit das Potential untersucht werden, das sich im Abgastest durch Optimierung der Regenerationsstrategie ergibt. Hierzu sind zunächst Stationäruntersuchungen erforderlich, in denen einzelne Schritte wie die Regelung des Mager/Fett-Betriebs und die Optimierung des Reduktionsmittelangebots untersucht werden. Darauf aufbauend soll eine optimierte Strategie zur Nitrat-Regeneration im Neuen Europäischen Fahrzyklus entwickelt und erprobt werden. Ziel ist hierbei eine bestmögliche NO_x-Minderung bei zugleich niedrigen HC- und CO-Emissionen und geringem Kraftstoff-Mehrverbrauch. In Tab. 4-1 sind die Parameter der Nitrat-Regeneration dargestellt, die zur Optimierung der Regenerationsstrategie betrachtet werden sollen.

	Parameter
<i>Regenerationsphase</i>	Zeitpunkt für Einleitung der Regeneration
	Dauer der Regeneration
	Luftverhältnis bei der Regeneration
<i>Adsorptionsphase</i>	NO _x -Rohemission im Magerbetrieb
	Kennfeldbereich mit Magerbetrieb
<i>NO_x-Speicher-Katalysator</i>	O ₂ -Speicherfähigkeit

Tab. 4-1: Parameter bei den Untersuchungen zur Nitrat-Regeneration

Die schädliche Wirkung von Schwefel auf die Wirksamkeit des NO_x-Speicher-Katalysators wurde in der Literatur eingehend betrachtet und ist somit bekannt. Die Schädigung kann durch Desulfatisierungen rückgängig gemacht werden. Zur Desulfatisierung von NO_x-Speicher-Katalysatoren wurden bislang überwiegend grundlegende Untersuchungen zur Ermittlung der wesentlichen Parameter veröffentlicht. Bei Auswertung dieser Veröffentlichungen wurden teilweise Widersprüche festgestellt, beispielsweise hinsichtlich einer vollständigen Vermeidung der H₂S-Bildung und der Möglichkeit zur Desulfatisierung bei stöchiometrischem Luftverhältnis.

Darüber hinaus sind einzelne Quellen zu finden, in denen Teilaspekte zur Realisierung einer solchen Prozedur im realen Fahrbetrieb betrachtet werden. Hier ist die Diskussion von Verfahren zur Katalysator-Aufheizung oder der Hinweis auf eine mögliche Geruchsbelästigung durch H_2S zu nennen. Detaillierte Untersuchungen mit gezielt herbeigeführten Desulfatisierungen im Fahrbetrieb sind allerdings bisher nicht veröffentlicht, so daß auch hier Untersuchungsbedarf besteht.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollen zunächst stationäre Untersuchungen zur Optimierung der Desulfatisierungsprozedur durchgeführt werden. Hierbei soll auch auf die erwähnten Widersprüche zwischen bisherigen Veröffentlichungen eingegangen werden. Im zweiten Schritt soll die Realisierung von Desulfatisierungen im Fahrbetrieb untersucht werden, wobei in diesem Zusammenhang vor allem Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung und zur Minimierung der H_2S -Emission betrachtet werden sollen. Abschließend sollen Messungen mit der entwickelten Strategie auf dem Rollenprüfstand durchgeführt werden. Die wesentlichen Parameter, die zur Optimierung dieser Strategie betrachtet werden sollen, sind in Tab. 4-2 dargestellt.

	Parameter
<i>Verschwefelung</i>	gespeicherte Schwefelmenge
<i>Desulfatisierung</i>	Luftverhältnis bei der Desulfatisierung
	Temperatur bei der Desulfatisierung
	Verfahren zur Katalysatoraufheizung
	Dauer der Desulfatisierung
	spezielle Maßnahmen zur H_2S -Minimierung

Tab. 4-2: *Parameter bei den Untersuchungen zur Desulfatisierung*

5. Versuchsumgebung und Versuchsdurchführung

5.1 Versuchsträger

5.1.1 Versuchsmotor

Die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen wurden an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung und luftgeführtem Brennverfahren durchgeführt. Die wichtigsten Daten des Motors sind in Tab. 5-1 zu finden. Bei dem Motor handelt es sich um einen prototypischen Versuchsträger.

Der Motor weist vier Ventile pro Zylinder auf. Von den zwei Einlaßkanälen je Zylinder ist ein Einlaßkanal als Füllungskanal, der andere als spiralförmiger Drallkanal ausgeführt. Zur Stabilisierung des Brennverfahrens wird bei Ladungsschichtung jeweils der Füllungskanal mit einem Klappensystem verschlossen, so daß sich eine ausgeprägte Drallbewegung um die Zylinderachse ausbildet. Das Einspritzventil ist zwischen den Einlaßventilen unter einem Winkel von 45° gegenüber der Zylinderachse positioniert. Die Zündkerze ist zentral im Brennraum angeordnet. Der Kolben weist eine speziell auf das Brennverfahren abgestimmte Mulde auf.

Der Motor ist mit einer äußeren Abgasrückführung (AGR) ausgerüstet. Die Einleitung des rückgeführten Abgases erfolgt zwischen Drosselklappe und Luftsammler. Der rückgeführte Abgasmassenstrom wird durch ein elektromagnetisch betätigtes Ventil gesteuert. Die Drosselklappe wird ebenfalls elektrisch betätigt.

Bauart	4-Zylinder-4-Takt-Reihenmotor mit Benzin-Direkteinspritzung
Anzahl der Ventile	2 Einlaßventile, 2 Auslaßventile je Zylinder
Bohrung [mm]	89.0
Hub [mm]	86.6
Hubvolumen [cm ³]	2155
Verdichtungsverhältnis [-]	11
Leistung [kW]	92 (bei 5500 1/min)
Drehmoment [Nm]	195 (bei 3500 1/min)
Brennraumform	Flachbrennraum, Kolbenmulde
Brennverfahren (Ladungsschichtung)	Luftgeführtes Brennverfahren, durch Drall stabilisiert
Einspritzsystem	Radialkolben-Hochdruckpumpe, Druckspeicher (Common Rail), elektromagnetisch betätigte Einspritzventile
Einspritzdruck [bar]	40 - 70
Geometrie des Einspritzstrahls	Kegelstrahl, Strahlwinkel 70°
Abgasrückführung	äußere Abgasrückführung, elektromagnetisch betätigtes Ventil

Tab. 5-1: Technische Daten des Versuchsmotors

In folgenden Betriebsarten des Motors wurden Untersuchungen durchgeführt:

- Ladungsschichtung, $\lambda \geq 1.5$, mit Abgasrückführung
- Homogenbetrieb, $\lambda = 0.65 - 1.05$, ohne Abgasrückführung

Der Betrieb mit Ladungsschichtung ist beim Versuchsmotor bis zu einem effektiven Mitteldruck von etwa $p_{me} = 5$ bar möglich. Für höhere Mitteldrücke muß zu homogenem Betrieb mit $\lambda = 1$ gewechselt werden. Homogener Magerbetrieb wurde beim Versuchsmotor nicht realisiert.

Abb. 5-1 zeigt den Kraftstoffverbrauch des Versuchsmotors bei Stationärbetrieb auf dem Motorprüfstand in Abhängigkeit der Motordrehzahl und des effektiven Mitteldrucks. Im linken Diagramm ist der spezifische Kraftstoffverbrauch bei Magerbetrieb mit Ladungsschichtung dargestellt. Das rechte Diagramm zeigt den Verbrauchsvorteil, der im jeweiligen Betriebspunkt bei Ladungsschichtung gegenüber homogenem Betrieb mit $\lambda = 1$ erzielt wird.

Bei den absoluten Angaben ist zu berücksichtigen, daß bei den Prüfstandsuntersuchungen die Hochdruckpumpe extern angetrieben wird und auch die Energieversorgung der Motorsteuerung und Zündanlage extern erfolgt.

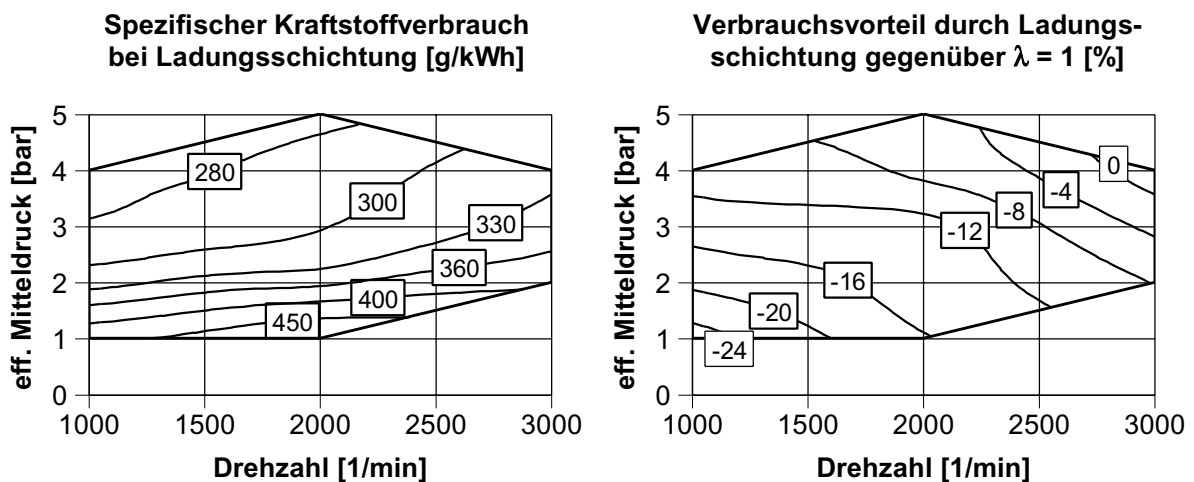


Abb. 5-1: Kraftstoffverbrauch des Versuchsmotors

Die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen im Stationärbetrieb auf dem Motorprüfstand wurden zum größten Teil bei einer Drehzahl $n = 2000$ 1/min und einem effektiven Mitteldruck $p_{me} = 2$ bar durchgeführt. Tab. 5-2 zeigt Meßwerte bei Ladungsschichtung in diesem Betriebspunkt.

Luftverhältnis [-]	2.1
Abgasrückführtrate [%]	12.5
Abgasmassenstrom [kg/h]	83
NO _x -Rohemission [ppm] / [g/h]	560 / 70
CO-Rohemission [ppm] / [g/h]	2030 / 152
HC-Rohemission [ppm] / [g/h]	920 / 110

Tab. 5-2: Meßwerte bei Ladungsschichtung ($n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar)

Diese Angaben gelten allgemein für die in Kap. 6 diskutierten Prüfstandsergebnisse. Die in Kap. 6.4.1 und Kap. 7 beschriebenen Ergebnisse wurden jedoch mit einer modifizierten Motorabstimmung erzielt. Die NO_x-Rohemission bei Ladungsschichtung lag in diesem Fall bei nur 320 ppm bzw. 37 g/h.

5.1.2 Versuchsfahrzeug

Um Untersuchungen im Fahrbetrieb durchführen zu können, wurde ein zweiter Versuchsmotor in einem Fahrzeug eingebaut. Hierbei wurde eine Mercedes-Benz C-Klasse (interne Bezeichnung W202) verwendet. In Tab. 5-3 sind die wichtigsten Daten des Fahrzeugs dargestellt. Die Angabe der Schwungmasse bezieht sich hierbei auf die Einstellung des Rollenprüfstands bei den Versuchen.

Fahrzeugtyp	Mercedes-Benz C-Klasse (W202)
Karosserie	Limousine, 4 Türen
Getriebe	5-Gang-Schaltgetriebe
Getriebeübersetzungen	3.91/2.17/1.37/1.00/0.81
Achsübersetzung	3.67
Reifengröße	205/60 R 15
Masse (Schwungmasse) [kg]	1490

Tab. 5-3: Technische Daten des Versuchsfahrzeugs

Im Fahrzeug wird die Hochdruckpumpe im Gegensatz zu den Prüfstandsuntersuchungen direkt vom Motor angetrieben und die Motorelektronik aus dem Bordnetz gespeist. Die Abstimmung des im Fahrzeug eingebauten Motors ist ähnlich wie die des Motors auf dem Prüfstand.

5.2 Motorsteuerung

Zur Entwicklung neuer Funktionen in der Motorsteuerung wurde im Rahmen dieser Arbeit eine spezielle Entwicklungsumgebung aufgebaut. Nachfolgend werden die verschiedenen Komponenten des verwendeten Systems zur Motorsteuerung näher erläutert.

5.2.1 Basis-Steuergerät

Wie in Kap. 3.4 dargestellt, sind für die Steuerung eines Ottomotors mit Direkteinspritzung gegenüber der Steuerung für einen konventionellen Ottomotor zahlreiche zusätzliche Funktionen erforderlich. Das bei den Untersuchungen verwendete Steuergerät beinhaltet diese Funktionen und wird nachfolgend als Basis-Steuergerät bezeichnet. Zu den Aufgaben des Basis-Steuergerätes gehört beispielsweise die Vorgabe der Zeitpunkte für Einspritzung und Zündung, die Regelung des Einspritzdrucks und die Regelung des Luftverhältnisses bei Homogenbetrieb.

Folgende Sensoren und Aktoren kommen zum Einsatz:

- Sensoren: Kurbelwinkelsensor, Nockenwellengeber, Breitband-Lambdasonde, Heißfilm-Luftmassenmesser, Sensor für Saugrohrdruck, Sensor für Kraftstoffdruck, Sensor für Kraftstofftemperatur, Sensor für Kühlwassertemperatur, Pedalwertgeber, zwei Lagesensoren der Drosselklappe, Lagesensor des Abgasrückführventils
- Aktoren: vier Zündspulen, vier elektromagnetisch betätigte Einspritzventile, elektrisch betätigte Drosselklappe, elektromagnetisch betätigtes Abgasrückführventil, elektromagnetisch betätigtes Ventil zur Steuerung des Kraftstoffdrucks

Die verwendete Motorsteuerung arbeitet mit Drehmomentführung. Das Prinzip einer derartigen Motorsteuerung wurde bereits in Kap. 3.4.1 beschrieben.

In der Motorsteuerung ist eine lineare Lambdaeolung realisiert. Dies wird durch Verwendung einer Breitband-Lambdasonde vom Typ Bosch LSU 4.7 ermöglicht. Dieser Sondentyp wird beispielsweise in [130, 131, 150] beschrieben.

5.2.2 Bypass-Steuergerät

Zusätzlich zum Basis-Steuergerät beinhaltet die Entwicklungsumgebung ein sogenanntes Bypass-Steuergerät. Hierbei kommt das Algorithm Prototyping System von Hewlett Packard zum Einsatz [151]. Die Bezeichnung „Bypass“ rührt daher, daß einzelne Funktionen des Basis-Steuergerätes gezielt ausgelagert und im Bypass-Steuergerät beliebig modifiziert werden können. Hierzu wurden in der Software des Basis-Steuergerätes spezielle Eingriffsmöglichkeiten geschaffen. Das Bypass-Steuergerät kommuniziert mit dem Basis-Steuergerät über den CAN-Bus.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind zahlreiche spezielle Funktionen zur Nitrat-Regeneration sowie zur Desulfatisierung des NOx-Speicher-Katalysators entwickelt worden. Diese Funktionen wurden mit der Software MATRIXx von Integrated Systems Inc. auf einer regelungstechnisch orientierten grafischen Oberfläche entworfen. Zur Erstellung des Programmcodes für das Bypass-Steuergerät wurde der AutoCode-Generator von MATRIXx verwendet. Die Programmierung des Bypass-Steuergerätes erfolgt in der Programmiersprache „C“. Gegenüber der konventionellen Steuergeräte-Programmierung wird mit dem eingesetzten System eine deutliche Zeitersparnis bei der Realisierung neuer Funktionen zur Motorsteuerung erzielt.

Das Bypass-Steuergerät bietet die Möglichkeit, mit Hilfe zahlreicher Analog- und Digitaleingänge verschiedene Sensoren in die Motorsteuerung einzubinden. Im einzelnen sind ein NOx-Sensor mit integrierter Breitband-Lambdasonde, eine binäre Lambdasonde sowie ein Thermoelement zur Messung der Temperatur des NOx-Speicher-Katalysators an das Bypass-Steuergerät angeschlossen.

Nach Kap. 3.4.3 kann der Einsatz eines mathematischen Katalysatormodells in der Motorsteuerung vorteilhaft sein, um eine optimierte Regelung des Mager/Fett-Betriebs zu realisieren. Bei dem hier eingesetzten Steuerungssystem wurde allerdings auf ein Katalysatormodell verzichtet, da dies wegen des hohen Aufwands für Implementierung und Applikation den Rahmen für die Versuchsvorbereitung gesprengt hätte.

5.2.3 Sensorik nach NO_x-Speicher-Katalysator

Wie bereits erwähnt, beinhaltet das eingesetzte System zur Motorsteuerung zwei Sensoren, die hinter dem NO_x-Speicher-Katalysator eingebaut sind. Diese werden nachfolgend beschrieben.

5.2.3.1 NO_x-Sensor mit integrierter Breitband-Lambdasonde

Der eingesetzte NO_x-Sensor ist in seiner Funktionsweise mit einer Breitband-Lambdasonde vergleichbar. Das Meßprinzip basiert auf der Idee, die Stickoxidmessung auf eine Sauerstoffmessung zurückzuführen. Der Sensor ist, wie in Abb. 5-2 dargestellt, aus insgesamt sechs elektrisch beheizten Schichten aus Zirkondioxid (ZrO₂) aufgebaut [53, 132, 152].

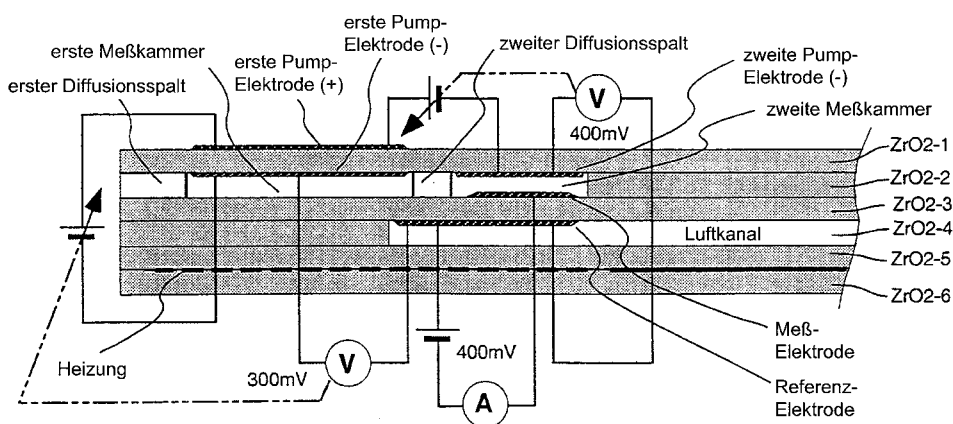


Abb. 5-2: Schematische Schnittdarstellung des NO_x-Sensors [152]

Der Meßvorgang besteht aus folgenden Schritten:

1. In einer ersten Meßkammer wird die O₂-Konzentration des Meßgases auf einige ppm abgesenkt. Hierfür wird eine sogenannte Sauerstoff-Pumpzelle eingesetzt. An dieser Zelle kann ein Signal für das Luftverhältnis abgegriffen werden.
2. In einer zweiten Meßkammer wird die O₂-Konzentration des Meßgases mit einer zweiten Pumpzelle weiter verringert. An der Rhodium-Elektrode einer dritten Pumpzelle erfolgt eine Zersetzung der im Meßgas enthaltenen Stickoxide in Sauerstoff und Stickstoff. Der freigesetzte Sauerstoff führt zu einem Pumpstrom, der proportional zur NO_x-Konzentration des Meßgases ist.

Das bei den Untersuchungen eingesetzte Versuchsmuster liefert bei Konzentrationen zwischen 0 und 500 ppm ein der NO_x-Konzentration proportionales Spannungssignal zwischen 0 und 5 V. Dies gilt jedoch nur bei Luftverhältnissen $\lambda > 1$. Bei $\lambda \leq 1$ wird ebenso wie bei NO_x-Konzentrationen über 500 ppm kein verwertbares Signal geliefert, in diesen Fällen liegt die maximale Ausgangsspannung von 5 V an.

In Abb. 5-3 sind exemplarisch das Signal des Sensors und der Meßwert eines konventionellen Chemolumineszenz-Detektors (CLD) im Mager/Fett-Zyklus gegenübergestellt. Man erkennt eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen Sensor und Meßgerät. Mit zunehmender NO_x-Konzentration wird die Abweichung

zwischen den beiden Signalen größer. Insgesamt wurden bei dem verwendeten Versuchsmuster Abweichungen gegenüber einem CLD von maximal etwa 10% festgestellt.

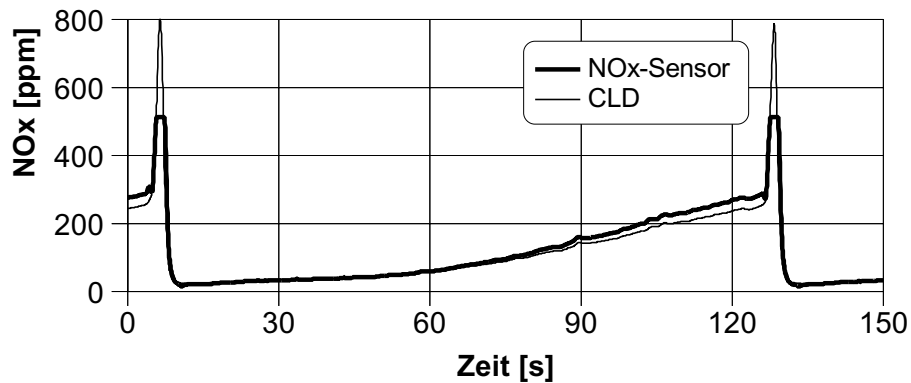


Abb. 5-3: Signal des NOx-Sensors im Vergleich mit CLD-Messung

Aus dem beschriebenen Aufbau des NOx-Sensors ergibt sich, daß er neben der Messung der NOx-Konzentration auch eine Messung der O₂-Konzentration ermöglicht. Somit beinhaltet der NOx-Sensor auch die Funktion einer Breitband-Lambdasonde. Die gemessene Sondenkennlinie dieser integrierten Breitband-Lambdasonde ist in Abb. 5-4 dargestellt. Eine Spannung von 2.5 V entspricht einem Luftverhältnis $\lambda = 1$. Der Meßbereich reicht etwa von $\lambda = 0.7$ bis $\lambda > 2$.

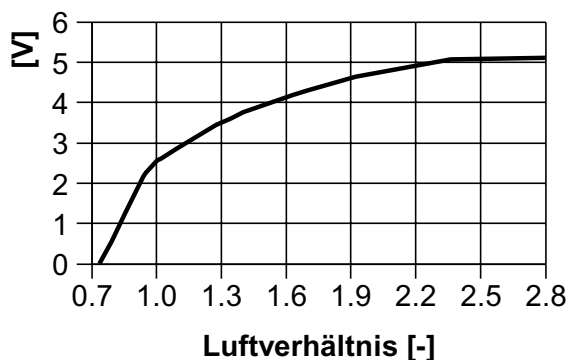


Abb. 5-4:
Kennlinie der in den NOx-Sensor integrierten Breitband-Lambdasonde

5.2.3.2 Binäre Lambdasonde

Neben der in den NOx-Sensor integrierten Breitband-Lambdasonde ist hinter dem NOx-Speicher-Katalysator auch eine binäre Lambdasonde vom Typ Bosch LSF 4.7 eingebaut. Dieser Sondentyp besteht aus drei ZrO₂-Schichten (Abb. 5-5). Die Meßzelle wird an einer Seite von Abgas beaufschlagt, an der anderen Seite befindet sich Umgebungsluft. Bei unterschiedlichen O₂-Konzentrationen im Abgas und in der Umgebungsluft detektiert die Meßzelle einen entsprechenden Spannungsabfall entsprechend der Nernst'schen Gleichung [10]. Dieser Spannungsabfall wird als Meßsignal verwendet.

Da sich die Konzentration des im Abgas enthaltenen Sauerstoffs in der Nähe des stöchiometrischen Luftverhältnisses um mehrere Zehnerpotenzen ändert, ergibt sich auch bei der Sondenspannung eine große Spannungsänderung. Abb. 5-6 zeigt die gemessene Kennlinie der binären Lambdasonde.

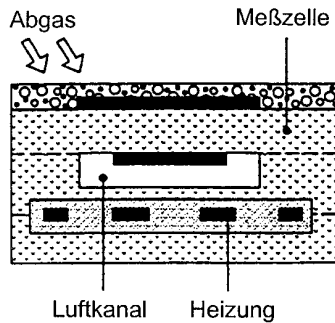


Abb. 5-5:
Schematische Schnittdarstellung der
binären Lambdasonde [131]

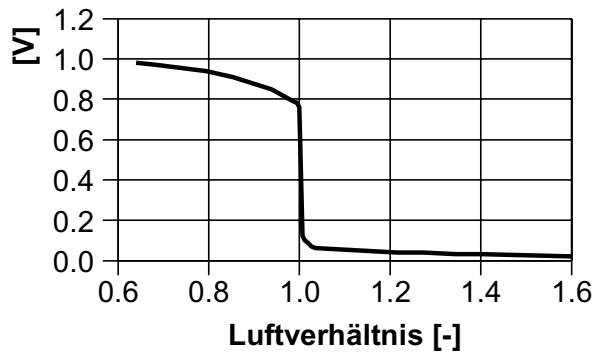


Abb. 5-6:
Kennlinie der binären
Lambdasonde

Mit einer binären Lambdasonde können sehr kleine Änderungen des Luftverhältnisses im Bereich um $\lambda = 1$ aufgelöst werden. Aus diesem Grund werden binäre Lambdasonden bei Ottomotoren mit Drei-Wege-Katalysator eingesetzt, um eine Regelung des Luftverhältnisses zu ermöglichen. Eine optimale Wirkung des Drei-Wege-Katalysators wird bei Sondenspannungen über 550 mV erreicht [10].

5.2.4 Betriebsartwechsel für eine Nitrat-Regeneration

Der Übergang von einem großen Luftverhältnis im Magerbetrieb zu einem Luftverhältnis $\lambda < 1$ zur Nitrat-Regeneration soll möglichst sprunghaft erfolgen, um eine hohe NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator zu vermeiden (vgl. Kap. 3.4.1). Beim Ottomotor mit Direkteinspritzung ist dieser Übergang mit einem Betriebsartwechsel von Ladungsschichtung zu Homogenbetrieb verbunden. Hierbei ändern sich die Sollwerte für Luftmassenstrom, Abgasrückführung, Einspritzbeginn, Einspritzdauer und Zündwinkel. Der Ablauf bei diesem Betriebsartwechsel wird von der Motorsteuerung so vorgegeben, daß der Übergang schnell und praktisch drehmomentneutral erfolgt.

In Abb. 5-7 ist der mit einer Breitband-Lambdasonde vor NO_x-Speicher-Katalysator gemessene Verlauf des Luftverhältnisses bei einer Regeneration dargestellt. Die gestrichelten Linien kennzeichnen den Zeitpunkt der Einleitung beziehungsweise der Beendigung der Nitrat-Regeneration. Zur Einleitung der Nitrat-Regeneration wird zunächst das Ventil der Abgasrückführung geschlossen. Erst einige Arbeitsspiele später wird der eigentliche Betriebsartwechsel eingeleitet, indem die Drosselklappe weiter geschlossen wird. Die in Abb. 5-7 erkennbare Totzeit zwischen der Einleitung der Regeneration und dem Abfall des Luftverhältnisses ergibt sich aus der gerade erläuterten Wartezeit und der Laufzeit der Gassäule bis zur Meßstelle vor NO_x-Speicher-Katalysator.

Nach Ablauf dieser Totzeit fällt das Signal der Lambdasonde innerhalb von weniger als 0,4 s von $\lambda > 2$ auf $\lambda = 0,7$. Das tatsächlich eingestellte Luftverhältnis $\lambda_{\text{Reg}} = 0,65$

liegt außerhalb des Meßbereichs der Lambdasonde und wird daher nicht korrekt ermittelt. Der Übergang zurück zu Magerbetrieb erfolgt in ähnlich kurzer Zeit wie der Übergang zu $\lambda < 1$.

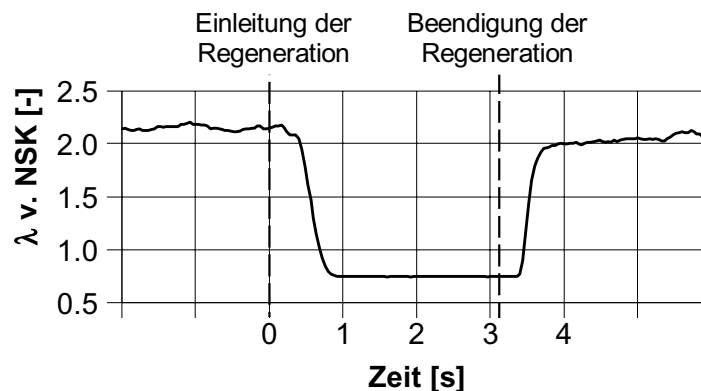


Abb. 5-7: Verlauf des Luftverhältnisses vor NO_x-Speicher-Katalysator bei einer Nitrat-Regeneration ($n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, $\lambda_{Reg} = 0.65$)

5.2.5 Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Nitrat-Regenerationen

Eine präzise meßtechnische Erfassung des Kraftstoff-Mehrverbrauchs, der sich durch die Nitrat-Regenerationen gegenüber reinem Magerbetrieb ergibt, ist mit der auf dem Prüfstand verfügbaren Meßtechnik kaum möglich. Zum einen ist die zu messende Verbrauchsdifferenz sehr gering, zum anderen stellt die zeitliche Synchronisation zwischen der Verbrauchsmessung und dem Mager/Fett-Zyklus eine Schwierigkeit dar.

Um dennoch eine zuverlässige Aussage über Unterschiede in der eingespritzten Kraftstoffmenge machen zu können, wurde in der Motorsteuerung ein Verfahren zur rechnerischen Ermittlung des Kraftstoff-Mehrverbrauchs entwickelt. Als Grundlage hierfür dient der in der Motorsteuerung für jeden Einspritzvorgang errechnete Sollwert für die Kraftstoffmasse. Durch Mittelwertbildung über den gesamten Mager/Fett-Zyklus kann die mittlere eingespritzte Kraftstoffmasse pro Arbeitsspiel ermittelt werden. Der Vergleich mit der bei reinem Magerbetrieb benötigten Kraftstoffmasse ergibt den Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Nitrat-Regeneration. Der Abgleich zwischen den Sollwerten für die eingespritzte Kraftstoffmasse und dem tatsächlichen Kraftstoffverbrauch wird durch Korrekturfaktoren gewährleistet, die zuvor durch entsprechende Messungen ermittelt wurden. Mit diesem Verfahren können auch sehr kleine Verbrauchsunterschiede bei Variation von Parametern für die Nitrat-Regeneration zuverlässig aufgelöst werden.

5.3 Abgasanlage

5.3.1 Konfiguration der Abgasanlage

Aus Kap. 2.3.3 geht hervor, daß der Einsatz eines Startkatalysators vor dem NO_x-Speicher-Katalysator in der Literatur als notwendig erachtet wird. Daher wurde auch bei allen im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen ein motornaher Startkatalysator verwendet.

Um den NO_x-Speicher-Katalysator vor zu hohen Temperaturen zu schützen, wurde eine Position gewählt, die im Fahrzeug einer Anordnung im Unterbodenbereich entspricht. Eine Vorrichtung zur Abgaskühlung, wie in Kap. 3.2.2 beschrieben, stand nicht zur Verfügung.

Abb. 5-8 zeigt eine Skizze der bei den Prüfstandsuntersuchungen eingesetzten Abgasanlage. Neben den beiden Katalysatoren sind auch die verschiedenen Meßstellen und Sensoren dargestellt. Die Entfernung vom Motorflansch des Abgaskrümmers zum Eintritt des Startkatalysators beträgt etwa 1.20 m, der Eintritt des NO_x-Speicher-Katalysators ist etwa 2.10 m vom Motorflansch entfernt. Hinter dem NO_x-Speicher-Katalysator entspricht die Abgasanlage mit den beiden Schalldämpfern der serienmäßigen Abgasanlage des Mercedes-Benz C220 (W202).

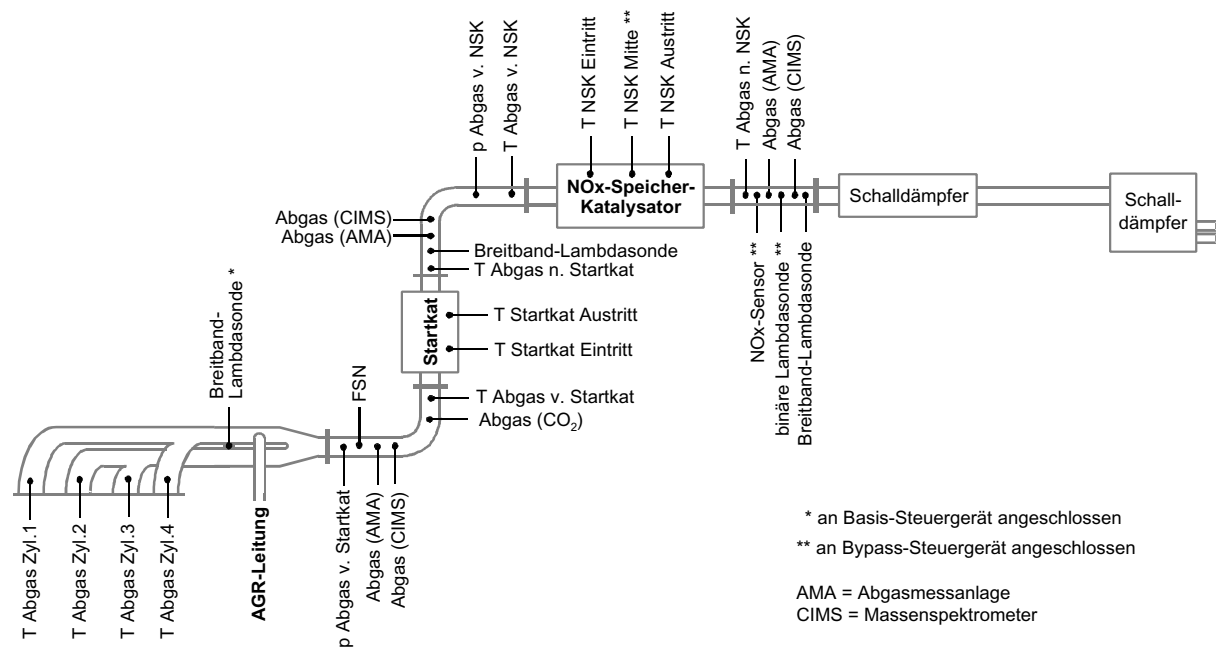


Abb. 5-8: Abgasanlage für die Prüfstandsuntersuchungen

Die im Fahrzeug eingesetzte Abgasanlage entspricht prinzipiell ebenfalls Abb. 5-8. Allerdings ist die Anzahl der Meßstellen reduziert. Der Startkatalysator ist im vorderen Unterbodenbereich positioniert, die Entfernung vom Motorflansch des Abgaskrümmers zum Eintritt des Startkatalysators beträgt ca. 1.10 m. Prinzipiell wäre eine motornähere Positionierung wünschenswert, dies war jedoch wegen des beschränkten Bauraums im Versuchsfahrzeug nicht möglich. Bis zum Eintritt des NO_x-Speicher-Katalysators beträgt die Entfernung ca. 2.00 m.

5.3.2 Untersuchte Katalysatoren

Als Startkatalysator wurde bei allen Untersuchungen der gleiche Typ eingesetzt. Dieser Typ wird vom Katalysator-Hersteller als geeignet für die Kombination mit den untersuchten NO_x-Speicher-Katalysatoren empfohlen. Die Daten dieses Startkatalysators sind in Tab. 5-4 aufgeführt.

Als NO_x-Speicher-Katalysatoren wurden zwei verschiedene Typen untersucht. Diese werden nachfolgend als Typ A und Typ B bezeichnet. Von Typ A wurden verschiedene Katalysatoren mit verschiedenen Alterungszuständen betrachtet. Maximal lag die vorangegangene Einsatzdauer bei etwa 300 h im Teillast-Betrieb. Die Daten dieser Katalysator Typen sind ebenfalls in Tab. 5-4 dargestellt.

Bezeichnung	Startkatalysator	NSK Typ A	NSK Typ B
Funktion	Drei-Wege-Katalysator	NO _x -Speicher-Katalysator	NO _x -Speicher-Katalysator
Trägermaterial	Cordierit	Cordierit	Cordierit
Breite x Höhe [in]	5.68 x 2.68 (oval)	6.68 x 3.18 (oval)	6.68 x 3.18 (oval)
Länge [in]	3.54	6 + 3 (2 Monolithen)	6 + 3 (2 Monolithen)
Volumen (gesamt) [l]	0.76	2.7	2.7
Zelldichte [1/in ²]	400	400	400
Wandstärke [mil]	6.5	6.5	6.5
Edelmetallgehalt [g]	2.95	12.39	10.01
Cer-Gehalt	sehr gering	hoch	gering
NO _x -Speicherkomponente	-	Barium	Barium
Laufzeit vor den Messungen [h]	10 - 600	10 - 300	10 - 100

Tab. 5-4: Daten der eingesetzten Katalysatoren

Die Raumgeschwindigkeit im NO_x-Speicher-Katalysator, die gemäß Kap. 3.1 einen wesentlichen Einfluß auf das NO_x-Speicherverhalten hat, betrug bei den Untersuchungen im Betriebspunkt mit $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar mit Ladungsschichtung etwa $S.V. = 24000$ 1/h. Die Temperatur im NO_x-Speicher-Katalysator lag bei Betrieb mit Ladungsschichtung im genannten Betriebspunkt bei etwa 400 °C.

Auf dem Motorprüfstand wurden beide in Tab. 5-4 beschriebenen NO_x-Speicher-Katalysatoren untersucht, im Versuchsfahrzeug wurde dagegen ausschließlich Typ A eingesetzt.

5.4 Meßtechnik

Die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen wurden sowohl auf dem Motorprüfstand als auch mit dem Versuchsfahrzeug auf dem Rollenprüfstand durchgeführt. Nachfolgend wird die Meßtechnik beschrieben, die bei diesen Untersuchungen eingesetzt wurde.

5.4.1 Motorprüfstand

Der für die Untersuchungen genutzte Stationärprüfstand ist mit einer Vierquadranten-Pendelmaschine ausgestattet. Mit dieser Pendelmaschine kann der Motor sowohl gebremst als auch geschleppt werden. Die maximale Brems- bzw.

Antriebsleistung beträgt 300 kW. Die Maschine ist pendelnd gelagert und stützt sich über eine Kraftmeßdose ab. Aus der gemessenen Kraft, dem zugehörigen Hebelarm und der Drehzahl der Maschine können Drehmoment und Leistung des Motors bestimmt werden. Darüber hinaus kann der effektive Mitteldruck p_{me} gemäß Gl. 2-2 ermittelt werden.

Die Prüfstandssteuerung und -überwachung erfolgt über das System PUMA der Firma AVL. Die Untersuchungen werden mit geregelter Drehzahl durchgeführt. Hierbei wird eine Soll-Motordrehzahl vorgegeben, die durch Regelung des Bremsmoments der Pendelmaschine konstant gehalten wird. Der gewünschte effektive Mitteldruck wird durch Anpassung des Lastsignals in der Motorsteuerung mit Hilfe des Pedalwertgebers eingestellt.

Die Temperatur des Kühlwassers wird bei den Untersuchungen auf einen konstanten Wert von 90 °C geregelt. Auch die angesaugte Luft wird konditioniert. Das angesaugte Luftvolumen wird mit einem Radialkolbenzähler gemessen.

In den Ölkreislauf des Motors wird nicht eingegriffen. Je nach Betriebspunkt stellt sich eine Öltemperatur zwischen etwa 80 °C und 110 °C ein.

Der Versuchsaufbau für die Prüfstandsuntersuchungen umfaßt folgende Meßtechnik:

- Temperatur- und Druckmessung
- 2 Breitband-Lambdasonden, jeweils mit Anzeigegerät
- 2 Standard-Abgasmeßanlagen
- CO₂-Abgasmeßanlage
- Massenspektrometer
- Meßgerät AVL Smoke Meter 415
- Anlage zur Kraftstoffverbrauchsmessung

Zur Temperaturmessung in der Abgasanlage werden Thermoelemente vom Typ NiCr/Ni eingesetzt. Die Messung in den Katalysatoren erfolgt mit Thermoelementen mit einem Durchmesser von 1.5 mm. Diese sind radial in vorbereitete Bohrungen im Monolithen eingeführt, wobei die Spitzen der Thermoelemente jeweils etwa in der Mitte des Monolithen positioniert sind. Im Startkatalysator wird die Temperatur 25 mm nach Eintritt und 25 mm vor Austritt gemessen. Der Monolith selbst ist 3.54 in (90 mm) lang. Der NO_x-Speicher-Katalysator besteht aus zwei Monolithen mit einer Gesamtlänge von 9 in (229 mm). Die Temperaturmessung erfolgt hier 25 mm nach Eintritt, 125 mm nach Eintritt und 25 mm vor Austritt.

In Abb. 5-8 sind die verschiedenen Meßstellen für Temperaturen und Drücke in der Abgasanlage zu erkennen.

Vor und nach NO_x-Speicher-Katalysator ist jeweils eine Breitband-Lambdasonde des Typs Bosch LSU 4.7 eingebaut. Das zugehörige Anzeigegerät ETAS LA3 führt die Auswertung des SONDENSIGNALS durch und liefert eine dem Luftverhältnis proportionale Ausgangsspannung. Der Meßbereich dieses Systems liegt zwischen $\lambda = 0.7$ und $\lambda = 32$ [153]. Die beiden Lambdasonden dienen nur zu Meßzwecken und sind nicht in die Motorsteuerung eingebunden.

Zur Abgasmessung stehen zwei Standard-Abgasmeßanlagen vom Typ Pierburg AMA 2000 zur Verfügung. Mit diesen beiden Anlagen können die wichtigsten Abgaskomponenten gleichzeitig vor und nach Katalysator gemessen werden. Bei stationären Untersuchungen werden die Abgasmeßwerte auch für eine Berechnung

des Luftverhältnisses aus der Abgaszusammensetzung nach Brettschneider herangezogen [154].

In den Abgasmeßanlagen kommen folgende Analysatoren zum Einsatz:

- Nichtdispersiver Infrarot-Absorptionsanalysator (NDIR) zur Messung der Konzentration von CO und CO₂ [155]
- Flammenionisations-Detektor (FID) zur Messung der Konzentration von HC [156]
- Chemolumineszenz-Detektor (CLD) zur Messung der Konzentration von NO_x [157]
- Siemens Oxymat 5 zur Messung der Konzentration von O₂ [158]

Allgemeine Erläuterungen zur Funktionsweise der Abgas-Analysatoren werden beispielsweise in [159, 160] gegeben.

Die Probenahmeleitungen zur Abgasmessung werden elektrisch auf T = 190 °C geheizt, um eine Kondensation der Kohlenwasserstoffe zu vermeiden. Es sei noch angemerkt, daß sich Angaben zu NO_x-Massen oder NO_x-Massenströmen stets auf NO₂ beziehen.

Zur Bestimmung der Abgasrückführrate wird eine spezielle CO₂-Abgasmeßanlage von Hartmann & Braun eingesetzt. Diese besteht aus zwei CO₂-Analysatoren, mit denen die CO₂-Konzentrationen im Abgas und im Saugrohr gemessen werden. Aus den Meßwerten kann die Abgasrückführrate (AGR-Rate) gemäß Gl. 5-1 ermittelt werden.

$$\text{AGR - Rate} = \frac{c(\text{CO}_2)_{\text{Saugrohr}}}{c(\text{CO}_2)_{\text{Abgas}}} \quad \text{AGR-Rate: Abgasrückführrate} \quad \text{Gl. 5-1}$$

$c(\text{CO}_2)$: CO₂-Konzentration

Für die Messung der Abgaskomponenten SO₂, H₂S und COS wird ein chemisch ionisierendes Massenspektrometer (CIMS) vom Typ AIRSENSE 500 der Firma V&F eingesetzt. Dieses Gerät ist universell zur Messung gasförmiger Komponenten geeignet. Zur Messung bestimmter Komponenten muß jedoch eine geeignete Konfiguration des Gerätes gewählt werden. Es ist auch möglich, mehrere Komponenten parallel zu messen, indem die entsprechenden Einstellungen periodisch gewechselt werden. Allerdings verringert sich hierdurch die zeitliche Auflösung bei der Messung.

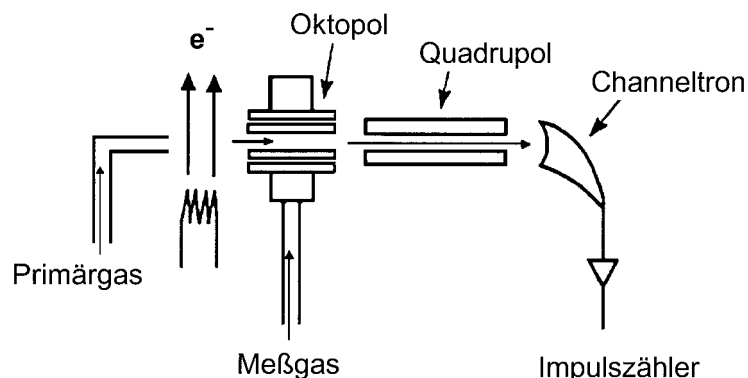


Abb. 5-9: Aufbau des chemisch ionisierenden Massenspektrometers [161]

Abb. 5-9 zeigt schematisch den Aufbau des CIMS. Aus einem glühenden Wolframdraht (Filament) treten Elektronen aus, die in einem elektrischen Feld beschleunigt werden. Durch Kollision mit diesen Elektronen wird das zugeführte Primärgas (Xenon, Krypton oder Quecksilber) ionisiert. Die erzeugten Ionen werden in einem Oktopol zu einem Ionenstrahl gebündelt. Beim Zusammentreffen dieses Ionenstrahls mit dem Meßgas erfolgt ein Elektronenaustausch, der zu einer Ionisierung des Meßgases führt. Typischerweise erfolgt dies bei einem Druck von 10^{-3} Pa. Das ionisierte Meßgas durchläuft ein Massenfilter (Quadrupol), das aus vier parallel angeordneten Stabelektroden besteht. Durch eine hochfrequente Wechselspannung werden die Ionen je nach ihrem Verhältnis aus Masse und Ladung in Schwingungen versetzt. Nur Ionen mit dem gewünschten Verhältnis passieren den Quadrupol, die übrigen Ionen treffen auf die Stabelektroden und werden entladen. Die durch den Quadrupol gelangten Ionen werden im Channeltron detektiert. Hierbei ermittelt ein Impulszähler die Anzahl der auftreffenden Teilchen pro Zeiteinheit. Durch Abgleich mit einem Kalibriergas kann ein direkter Zusammenhang zwischen diesem Wert und der Konzentration der betrachteten Komponente im Meßgas hergestellt werden [161 - 164].

Für die Messung von SO_2 und COS wird Xenon als Primärgas eingesetzt, zur H_2S -Messung ist dagegen Quecksilber erforderlich. Daher erfolgt während der Messung ein periodisches Umschalten zwischen den beiden Gasen. Die drei genannten Komponenten können mit einer Abtastfrequenz von etwa 6 Hz gemessen werden.

Als Kalibriergase werden Mischungen aus den Meßgasen und Stickstoff verwendet. Aus Untersuchungen in [163] ist bekannt, daß die Komponenten SO_2 und H_2S im Abgas zum Teil mit Wasser reagieren, so daß gegenüber einer Kalibrierung ohne Anwesenheit von Wasser ein Minderbefund auftritt. Dieser Effekt wird bei den Untersuchungen durch einen entsprechenden Korrekturfaktor nachträglich kompensiert.

Das AVL Smoke Meter 415 wird zur Bestimmung der Filter Smoke Number (FSN) eingesetzt. Die Filter Smoke Number ist eine Größe zur Beschreibung der Abgastrübung durch Rußpartikel. Das Gerät leitet ein definiertes Abgasvolumen durch ein spezielles Filterpapier, um anschließend die Schwärzung des Filterpapiers photometrisch zu bestimmen [165].

Die Anlage zur Kraftstoffverbrauchsmessung ist vom Typ PLU 401-107W und stammt von der Pierburg Luftfahrtgeräte Union. Die Messung des Verbrauchs erfolgt in einer Schwimmerkammer, deren Zufluß geregelt wird. Über eine Dichte- und Temperaturmessung wird der gemessene Volumenstrom in einen Massenstrom umgerechnet.

Die Erfassung der Meßdaten erfolgt wie die Prüfstandssteuerung über das System PUMA der Firma AVL. Signale mit hoher Dynamik, wie beispielsweise die Signale der Lambdasonden, werden mit einer Frequenz von bis zu 25 Hz abgetastet. Da die Analysatoren der Abgasmeßanlage dagegen nur eine eingeschränkte Dynamik aufweisen, ist hier eine Abtastung mit 3 Hz ausreichend.

Alle prüfstandsseitigen Meßwerte werden bei den Messungen parallel aufgezeichnet und gemeinsam in einer Datei abgelegt.

5.4.2 Rollenprüfstand

Die Untersuchungen mit dem Versuchsfahrzeug wurden sowohl im regulären Fahrbetrieb als auch auf einem Rollenprüfstand durchgeführt. Hierbei rollen die angetriebenen Räder auf einer Trommel mit einem fahrbahnähnlichen Belag und einem Umfang von 6 m. Aus der Drehzahl der Trommel ergibt sich eine entsprechende Fahrgeschwindigkeit. Die Trommel ist mit einem Elektromotor gekoppelt, der die Fahrwiderstände in Abhängigkeit der aktuellen Fahrgeschwindigkeit simuliert. Die Parameter hierfür werden so gewählt, daß das Ausrollverhalten des Fahrzeugs dem eines Referenzfahrzeugs gleichen Typs auf realer Fahrbahn entspricht.

Auf dem Rollenprüfstand sind Untersuchungen in verschiedenen gesetzlich vorgeschriebenen Fahrzyklen möglich. Hierzu wird auf einem Bildschirm die entsprechende Fahrkurve grafisch vorgegeben. Während des Tests zeigt ein Cursor jeweils die aktuelle Fahrgeschwindigkeit an, die in einem definierten Streubereich um die Soll-Fahrkurve liegen muß.

Zur Steuerung des gesamten Meßablaufs wird das System VETS 9000 AK von Horiba eingesetzt [166].

Der Versuchsaufbau auf dem Rollenprüfstand umfaßt folgende Meßtechnik:

- Temperaturmessung
- Breitband-Lambdasonde mit Anzeigegerät
- 2 Abgasmeßanlagen
- CVS-Anlage
- Massenspektrometer

Die Anordnung der Temperaturmeßstellen in der Abgasanlage des Versuchsfahrzeugs entspricht der bei den Untersuchungen auf dem Motorprüfstand (Abb. 5-8).

Bei den Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand wird eine Breitband-Lambdasonde Bosch LSU 4.7 mit Anzeigegerät ETAS LA3 eingesetzt, um das Luftverhältnis vor Startkatalysator zu messen.

Die in den beiden Abgasmeßanlagen vom Typ Horiba MEXA 9430 D bzw. 9130 D verwendeten Analysatoren entsprechen im Meßprinzip den am Motorprüfstand eingesetzten Analysatoren. Allerdings weisen die Geräte verkürzte Gaswege und kleinere Küvetten auf, um ein schnelleres Ansprechen zu gewährleisten [167].

Im Unterschied zum Motorprüfstand kann die Abgasmessung auf dem Rollenprüfstand auf zwei verschiedene Arten erfolgen. Während des Tests kann eine direkte Messung der zeitlichen Emissionsverläufe vor und nach Katalysator erfolgen (Modalanalyse). Beim Versuchsfahrzeug wird das Abgas hierfür vor Startkatalysator und nach NO_x-Speicher-Katalysator entnommen. Diese Emissionsverläufe liefern wichtige Informationen über das Verhalten der Katalysatoren im instationären Fahrbetrieb.

Zur Ermittlung der Gesamtemission im Test wird das Verfahren der Beutelmessung eingesetzt [16, 72, 160]. Hierzu wird das während des Tests emittierte Abgas in der CVS-Anlage mit gereinigter Umgebungsluft verdünnt. Die Verdünnung des Abgases erfolgt so, daß der gesamte Volumenstrom konstant gehalten wird (CVS = Constant Volume Sampling). Somit variiert der als Verdünnungsluft zugegebene Volumenstrom je nach momentanem Abgasvolumenstrom. Durch die Verdünnung

wird eine Auskondensation des im Abgas enthaltenen Wasserdampfes vermieden, wodurch die Stickoxidverluste im Beutel gering gehalten werden. Zudem wird eine Nachreaktion der Komponenten untereinander, vor allem der Kohlenwasserstoffe, verringert. Nach Durchlaufen eines Wärmetauschers wird ein Teilstrom des verdünnten Abgases mit einer Dosierpumpe entnommen und in gasdichten Beuteln gesammelt. Bei Fahrzyklen mit mehreren Phasen werden mehrere Beutel befüllt, der Wechsel erfolgt automatisch zum entsprechenden Zeitpunkt. Bei Tests im NEFZ werden beispielsweise die Emissionen im City-Zyklus und im EUDC in getrennten Beuteln gesammelt. Nach Beendigung des Tests werden die Konzentrationen der verschiedenen Abgaskomponenten in den Beuteln bestimmt. Hieraus können die Emissionen in g/km ermittelt werden. Diese Werte können nun mit den gesetzlich vorgeschriebenen Abgasgrenzwerten verglichen werden.

Wie bei den Untersuchungen auf dem Motorprüfstand wird auch auf dem Rollenprüfstand ein chemisch ionisierendes Massenspektrometer des Typs V&F AIRSENSE 500 zur Messung der Abgaskomponenten SO_2 , H_2S und COS verwendet.

Die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs im Fahrzyklus erfolgt mit Hilfe einer Kohlenstoffbilanz. Hierzu wird aus der im gesamten Test emittierten Masse von CO_2 , CO und HC die emittierte Kohlenstoffmasse ermittelt. Mit Hilfe des bekannten Kohlenstoffanteils im Kraftstoff kann auf die eingesetzte Kraftstoffmasse geschlossen werden [22, 160].

Die Aufzeichnung der Prüfstands-Meßdaten erfolgt mit einer Abtastung von 1 Hz. Mit Recorderfunktionen in den Applikationsprogrammen für das Basis-Steuergerät und das Bypass-Steuergerät ist es zusätzlich möglich, unabhängig von der prüfstandsseitigen Datenerfassung alle relevanten Größen in der Motorsteuerung aufzuzeichnen.

5.5 Versuchsdurchführung

5.5.1 Untersuchungen auf dem Motorprüfstand

Die Untersuchungen zur Nitrat-Regeneration des NO_x -Speicher-Katalysators wurden auf dem Motorprüfstand überwiegend bei einer Drehzahl $n = 2000$ 1/min und einem effektiven Mitteldruck $p_{me} = 2$ bar durchgeführt. Die Emissionen bei Ladungsschichtung in diesem Betriebspunkt sind bereits in Tab. 5-2 dargestellt.

Bei den Prüfstandsuntersuchungen zur Nitrat-Regeneration wurde als Kraftstoff Super Plus mit einem reduzierten Schwefelgehalt von 20 mg/kg verwendet. Trotz des niedrigen Schwefelgehalts wurden regelmäßig Desulfatisierungen durchgeführt, um einen unerwünschten Einfluß von Schwefel auf das Verhalten des NO_x -Speicher-Katalysators zu vermeiden.

Bei den Prüfstandsuntersuchungen zur Desulfatisierung wurde auf die Verwendung schwefelarmen Kraftstoffs verzichtet. Statt dessen wurde handelsüblicher Kraftstoff Super bleifrei mit einem Schwefelgehalt von 100 mg/kg verwendet.

Nachfolgend gegenübergestellte Ergebnisse wurden jeweils mit dem identischen NO_x -Speicher-Katalysator in vergleichbarem Alterungszustand durchgeführt. Die

verschiedenen Versuchsreihen, die weitgehend unabhängig voneinander diskutiert werden, wurden jedoch bei unterschiedlichem Alterungszustand des NO_x-Speicher-Katalysators und teilweise auch mit unterschiedlichen Katalysatoren des gleichen Typs durchgeführt. Daher sind Quervergleiche zwischen den verschiedenen Untersuchungen nur eingeschränkt möglich.

5.5.2 Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand

Im Versuchsfahrzeug wurde handelsüblicher Kraftstoff Super bleifrei mit einem Schwefelgehalt von 100 mg/kg verwendet.

Die Untersuchungen zur Nitrat-Regeneration auf dem Rollenprüfstand wurden mit einem NO_x-Speicher-Katalysator durchgeführt, der zuvor über eine Fahrstrecke von etwa 2500 km im Einsatz war und vor der Versuchsreihe desulfatisiert wurde.

Die Untersuchungen zur Desulfatisierung auf dem Rollenprüfstand wurden mit einem Katalysator durchgeführt, der zuvor über eine Fahrstrecke von etwa 5000 km im Einsatz war.

In Zusammenhang mit Strategien zur Nitrat-Regeneration werden im Rahmen dieser Arbeit nur Ergebnisse im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) diskutiert. Hierbei werden größtenteils Warmtests betrachtet, bei denen Motor und Katalysator vor Teststart im 3. Gang bei 40 km/h auf Betriebstemperatur gebracht wurden. In diesem Betriebspunkt betrug die Temperatur im NO_x-Speicher-Katalysator etwa 330 °C. Der Teststart erfolgte bei laufendem Motor. Durch die Betrachtung von Warmtests lassen sich die Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten besser erkennen als bei Kalttests, bei denen die HC- und CO-Emissionen im City-Zyklus zu einem großen Teil in der für alle Varianten gleichen Warmlaufphase mit Luftverhältnissen $\lambda \leq 1$ entstehen.

Vor Kalttests hat jeweils über Nacht eine Abkühlung von Motor und Katalysator auf Raumtemperatur stattgefunden. Nach dem Kaltstart wurde der Motor, wie auch in der Literatur beschrieben, zunächst homogen betrieben (vgl. Kap. 2.2.2). Das Luftverhältnis wurde hierbei bis zum Einsetzen der Lambdaregelung auf $\lambda = 1$ gesteuert. Während der Warmlaufphase wurde für eine Dauer von 70 s der Zündzeitpunkt stark in Richtung spät verschoben, um durch die resultierende hohe Abgastemperatur eine schnelle Aufheizung der Katalysatoren zu realisieren. Die Spätzündung wird beispielsweise in [23, 168] als wirksame Maßnahme zur Verringerung der Kaltstart-Emissionen beschrieben. In Abhängigkeit der Kühlwassertemperatur wurde etwa 145 s nach Start zu Magerbetrieb mit Ladungsschichtung gewechselt.

Auf eine weitergehende Optimierung der Start- und Warmlaufphase wurde aus Zeitgründen verzichtet, da die Kalttests nicht Schwerpunkt der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen waren.

Die Ergebnisse der Tests im Fahrzyklus auf dem Rollenprüfstand unterlagen einer gewissen Streuung. Diese war beispielsweise bedingt durch Schwankungen der Motor-Rohemission, durch den Beladungszustand des NO_x-Speicher-Katalysators mit Schwefel oder durch leichte Abweichungen von der Soll-Fahrkurve. Um die Streuungseinflüsse gering zu halten, wurden daher die Ergebnisse mehrerer Tests gemittelt.

5.6 Auswertung

5.6.1 Berechnung von Abgasmassenströmen

Für die Diskussion der Emissionen ist es erforderlich, die entsprechenden Massenströme zu kennen. Die eingesetzten Geräte zur Abgasmessung liefern prinzipiell jedoch nur Volumenkonzentrationen. Daher war eine Umrechnung von Konzentrationen bzw. Konzentrationsverläufen in Massenströme erforderlich. Die Vorgehensweise bei dieser Umrechnung ist im Anhang dargestellt.

Bei Auswertungen von Mager/Fett-Zyklen erfolgte die Berechnung der Massenströme nach Aufteilung in die einzelnen Phasen mit magerem beziehungsweise fettem Motorbetrieb. Hieraus ergaben sich über die einzelnen Phasen oder über den gesamten Mager/Fett-Zyklus gemittelte Massenströme. Die Gaslaufzeit des Abgases zu den in einem separaten Raum aufgestellten Abgasmeßanlagen sowie die unterschiedlichen Ansprechzeiten der verschiedenen in den Meßanlagen enthaltenen Analysatoren wurden bei der Auswertung berücksichtigt.

Auch die im instationären Betrieb auf dem Rollenprüfstand gemessenen Konzentrationsverläufe konnten nach dem gleichen Verfahren in Massenstromverläufe umgerechnet werden. Dies war dadurch möglich, daß der Volumenstrom der zugeführten Verdünnungsluft gemessen und aufgezeichnet wurde. Hieraus wurde nachträglich der Verlauf des Abgasmassenstroms während des instationären Betriebs ermittelt.

Alle stationär ermittelten Emissionen werden als Massenströme in g/h angegeben. Die Ergebnisse im Abgastest auf dem Rollenprüfstand werden dagegen in g/km angegeben, da die Emissionen auf die Fahrstrecke im Test bezogen werden.

5.6.2 Beschreibung der Katalysator-Effektivität

Zur Beschreibung der Effektivität des NO_x-Speicher-Katalysators kommen in den folgenden Kapiteln je nach Zusammenhang zwei unterschiedliche Kenngrößen zum Einsatz. Bei der Entwicklung einer optimierten Strategie zur Nitrat-Regeneration (Kap. 6) ist die Ermittlung einer Konversionsrate im Mager/Fett-Zyklus nicht sinnvoll, da sich bei einer Variation der Parameter für die Regeneration auch die Rohemission im Mager/Fett-Zyklus als Bezugsbasis ändert. Um dennoch einen Bezug zur Rohemission herzustellen, wird die Minderung der jeweiligen Komponente gegenüber der Rohemission im reinen Magerbetrieb betrachtet. Als Beispiel beschreibt Gl. 5-2 die Berechnung der NO_x-Minderung gegenüber reinem Magerbetrieb.

$$\text{NO}_x\text{-Minderung} = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{NO}_x} \text{ nach NSK (mager / fett)}}{\dot{m}_{\text{NO}_x} \text{ roh (mager)}} \quad \text{Gl. 5-2}$$

Im Zusammenhang mit der Schwefelvergiftung und Desulfatisierung (Kap. 7) ist die Betrachtung der Konversionsrate im Mager/Fett-Zyklus dagegen sinnvoll, da die Parameter im Mager/Fett-Zyklus bei den verschiedenen Messungen immer gleich sind. Die NO_x-Konversionsrate im Mager/Fett-Zyklus errechnet sich nach Gl. 5-3.

$$\text{NOx – Konversionsrate} = 1 - \frac{\dot{m}_{\text{NOx}} \text{ nach NSK (mager / fett)}}{\dot{m}_{\text{NOx}} \text{ roh (mager / fett)}} \quad \text{Gl. 5-3}$$

Bei Auswertungen im Mager/Fett-Betrieb wurden nur Zyklen berücksichtigt, in denen ein stabiler, eingeschwungener Zustand des Katalysators zu erkennen war. Um zuverlässige Aussagen über das Katalysatorverhalten machen zu können, wurden zur Auswertung stets mindestens drei aufeinanderfolgende Zyklen herangezogen. Hierbei waren die Abweichungen zwischen den Zyklen meist sehr gering.

6. Strategie zur Nitrat-Regeneration von NO_x-Speicher-Katalysatoren

In diesem Kapitel wird eine Strategie zur Nitrat-Regeneration dargestellt, durch die sich bei Einsatz eines NO_x-Speicher-Katalysators an einem Ottomotor mit Direkteinspritzung minimale Emissionen bei möglichst niedrigem Kraftstoffverbrauch realisieren lassen. Hierzu soll der bekannte Zielkonflikt zwischen geringer NO_x-Emission und geringem Kraftstoffverbrauch näher untersucht werden, um geeignete Kompromisse zu finden. Zielsetzung ist die Einhaltung der EU4-Abgasgrenzwerte. Zunächst werden verschiedene Vorversuche im Stationärbetrieb auf dem Motorprüfstand beschrieben. Danach folgen Fahrzeuguntersuchungen mit der entwickelten Strategie auf dem Rollenprüfstand im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ). Die Stationäruntersuchungen wurden überwiegend im Betriebspunkt mit $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar mit einem frischen NO_x-Speicher-Katalysator vom Typ A durchgeführt. In diesem Betriebspunkt beträgt die Temperatur im NO_x-Speicher-Katalysator, je nach Häufigkeit von Nitrat-Regenerationen im Mager/Fett-Betrieb, etwa 400 bis 450 °C. Zusätzlich wurden auch andere Betriebspunkte betrachtet, zudem kam bei einigen Untersuchungen auch ein NO_x-Speicher-Katalysator vom Typ B zum Einsatz (vgl. Tab. 5-4).

Tab. 6-1 zeigt eine Übersicht über die in diesem Kapitel beschriebenen Variationen. Hierbei wird zwischen Untersuchungen auf dem Stationärprüfstand und Fahrzeuguntersuchungen unterschieden.

Varierte Größe		Prüfstand	Fahrzeug
Zeitpunkt für Einleitung der Regeneration	- nach Ablauf der vorgegebenen Adsorptionsdauer	X	
	- bei Überschreiten eines NO _x -Schwellenwertes nach NSK (Regelung mit NO _x -Sensor)	X	X
	- bei Verlassen des Kennfeldbereichs mit Magerbetrieb	X	X
Dauer der Regeneration	- Vorgabe einer festen Regenerationsdauer	X	
	- Regelung mit binärer Lambdasonde nach NSK	X	X
	- Regelung mit Breitband-Lambdasonde nach NSK	X	
Luftverhältnis bei der Regeneration	- konstante Vorgabe (0.65 - 0.85)	X	
	- mehrstufige Vorgabe (0.65 - 0.93, 2 - 3 Stufen)	X	X
NO _x -Rohemission im Magerbetrieb	- Basis-Motorabstimmung (NO _x 510 ppm)	X	X
	- modifizierte Motorabstimmung (NO _x 310 ppm) (Werte gelten für $n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar)	X	
Kennfeldbereich mit Magerbetrieb	- Basis-Motorabstimmung (bis $p_{me} = 4$ bar)		X
	- modifizierte Motorabstimmung (bis $p_{me} = 5$ bar)		X
O ₂ -Speicherfähigkeit des NSK	- relativ hoch (NSK Typ A)	X	X
	- relativ gering (NSK Typ B)	X	

Tab. 6-1: Variationen bei den Untersuchungen zur Nitrat-Regeneration

6.1 Grundlegende Untersuchungen zur Nitrat-Regeneration

6.1.1 Emissionsverläufe bei der Nitrat-Regeneration

Wie aus Kap. 3.1 hervorgeht, ist das prinzipielle Verhalten eines NO_x-Speicher-Katalysators bei einer Nitrat-Regeneration bereits eingehend untersucht worden. Daher sind die wesentlichen Einflüsse auf das Emissionsverhalten bekannt und werden nachfolgend nur kurz diskutiert.

Zur Verdeutlichung der Vorgänge im Mager/Fett-Betrieb ist in Abb. 6-1 beispielhaft der Emissionsverlauf bei $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar dargestellt. Hierbei wurde ein Regenerations-Luftverhältnis von $\lambda_{Reg} = 0.65$ eingestellt, die Adsorptionsdauer betrug 120 s, die Regenerationsdauer lag bei 4.5 s. Zur Unterscheidung der Adsorptions- und Regenerationsphasen ist zusätzlich der Verlauf des Luftverhältnisses dargestellt.

CO und HC werden während der Adsorptionsphase durch Startkatalysator und NO_x-Speicher-Katalysator fast vollständig oxidiert. Die Stickoxide werden im NO_x-Speicher-Katalysator als Nitrate gespeichert. Mit zunehmender gespeicherter NO_x-Masse sinkt die Speicherfähigkeit, so daß die NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator langsam ansteigt. Daher ist eine Nitrat-Regeneration des Katalysators mit $\lambda < 1$ erforderlich, bei der dem NO_x-Speicher-Katalysator große Mengen CO und HC als Reduktionsmittel für die desorbierten Stickoxide zugeführt werden. Zu Beginn der Regeneration tritt dabei kurzzeitig ein NO_x-Durchbruch auf. Dieser wird in der Literatur bereits mehrfach beschrieben und besteht überwiegend aus NO. Er nimmt mit höherer Beladung und höherer Temperatur des NO_x-Speicher-Katalysators zu, durch einen hohen Reduktionsmittel-Massenstrom zu Beginn der Regeneration wird er vermindert [17, 53, 63, 68]. Erst wenn der im Katalysator gespeicherte Sauerstoff umgesetzt wurde, können die eingespeicherten Stickoxide reduziert werden [63].

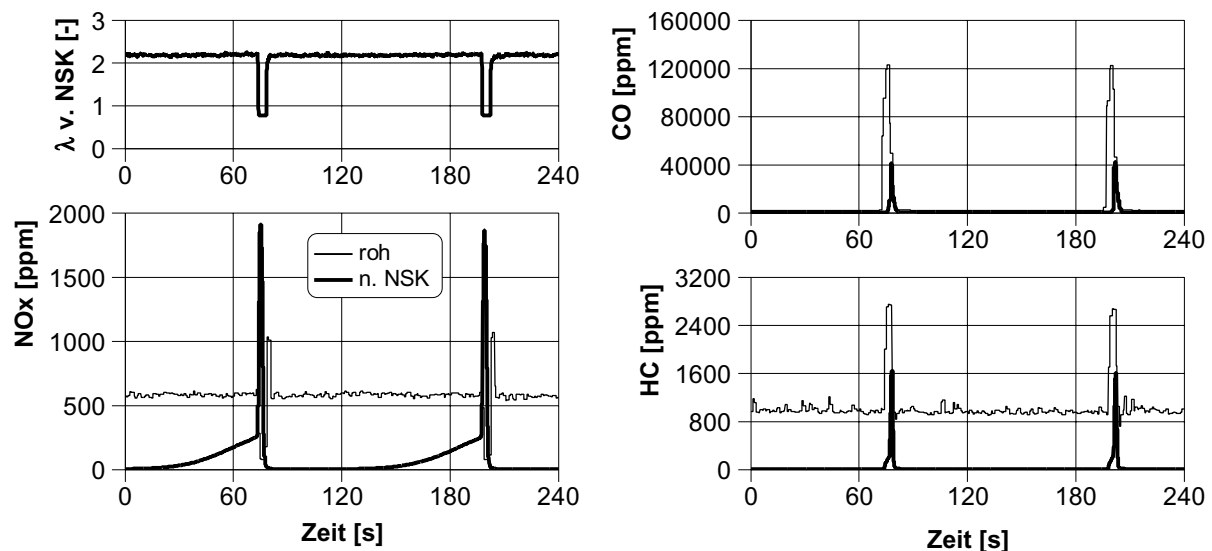


Abb. 6-1: Emissionen im Mager/Fett-Betrieb ($n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, $t_{Ads} = 120$ s, $t_{Reg} = 4.5$ s, $\lambda_{Reg} = 0.65$, NSK Typ A frisch)

Während der Regeneration ist CO bevorzugter Reaktionspartner und wird zunächst praktisch vollständig verbraucht. Hinsichtlich der Kohlenwasserstoffe kann dagegen bereits in einer frühen Phase der Regeneration ein leichter Schlupf auftreten [68, 79]. Gegen Ende der Regeneration kommt es nach NO_x-Speicher-Katalysator zu einem starken Anstieg von CO und HC, da nicht mehr ausreichend Stickoxide als

Reaktionspartner zur Verfügung stehen und die Reduktionsmittel somit teilweise ungenutzt den NO_x-Speicher-Katalysator passieren. Dieser nachfolgend als Reduktionsmittel-Durchbruch bezeichnete Effekt weist auf eine zu lange Regenerationsdauer hin.

6.1.2 Einfluß der Adsorptions- und Regenerationsdauer

Um die Einflüsse der Adsorptions- und Regenerationsdauer auf die NO_x-, HC- und CO-Emissionen sowie den Kraftstoff-Mehrverbrauch zu untersuchen, wurden diese beiden Parameter bei jeweils konstantem Regenerations-Luftverhältnis variiert. Sofern kein nennenswerter NO_x-Schlupf auftritt, ist die Dauer der Adsorptionsphase hierbei gleichbedeutend mit der im Magerbetrieb gespeicherten NO_x-Masse.

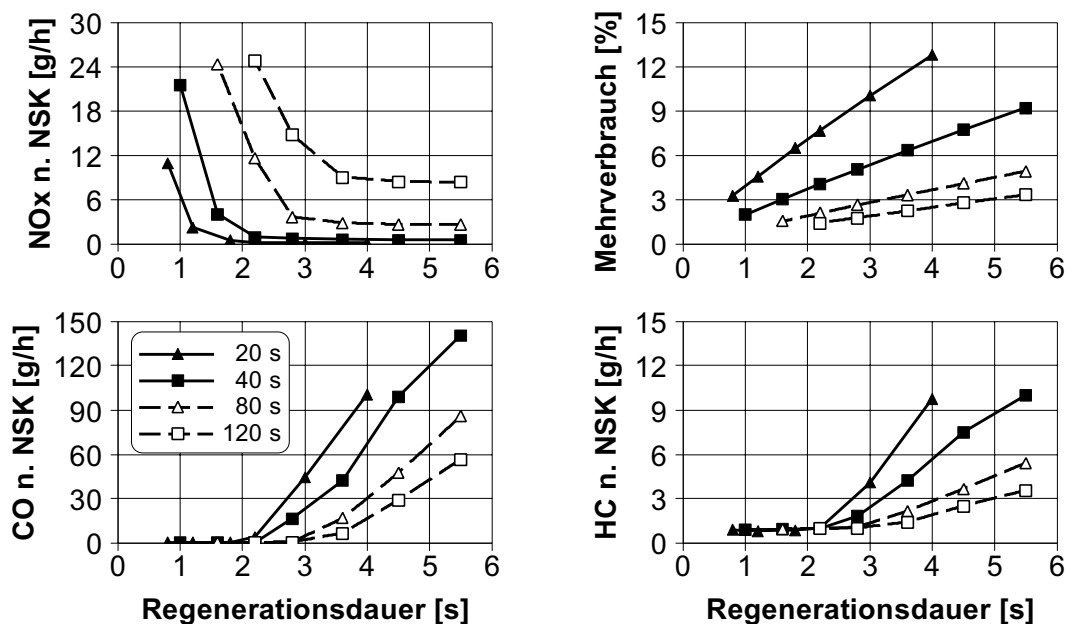


Abb. 6-2: Variation der Adsorptionsdauer im Mager/Fett-Betrieb
($n = 2000 \text{ l/min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$, $\lambda_{Reg} = 0.65$, NSK Typ A frisch)

Aus den gemessenen Konzentrationsverläufen von NO_x, CO und HC nach NO_x-Speicher-Katalysator wurden Massenströme berechnet. In Abb. 6-2 sind die Ergebnisse bei einem Regenerations-Luftverhältnis von $\lambda_{Reg} = 0.65$ dargestellt. Hierbei wird je nach Wahl der Adsorptions- und Regenerationsdauer eine NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator zwischen 0.1 g/h und 25 g/h erzielt. Dies entspricht einer NO_x-Minderung zwischen 99.9 % und 64 % gegenüber der NO_x-Rohemission im Magerbetrieb. Die höchste NO_x-Minderung wird dabei mit einer kurzen Adsorptionsdauer und einer relativ langen Regenerationsdauer erreicht. Für jede Adsorptionsdauer ist ab einer bestimmten Regenerationsdauer keine weitere Absenkung der NO_x-Emission auf noch niedrigere Werte möglich.

Mit längerer Adsorptionsdauer ist auch durch eine lange Regenerationsdauer keine Absenkung der NO_x-Emission auf die Werte kürzerer Adsorptionsdauern möglich. Dies liegt vor allem in dem verstärkten NO_x-Schlupf in der Adsorptionsphase, aber auch der NO_x-Durchbruch zu Beginn der Regenerationsphase nimmt mit größerer Adsorptionsdauer und damit größerer gespeicherter NO_x-Masse zu.

Während bei kurzer Adsorptionsdauer und langer Regenerationsdauer die NO_x-Emission minimal ist, sind in diesem Fall die HC- und CO-Emissionen am höchsten. Ursache ist der bereits erwähnte Reduktionsmittel-Durchbruch, der bei einer zu langen Regeneration auftritt. Hierbei beträgt die CO-Emission ungefähr das zehnfache der HC-Emission, bedingt durch die wesentlich höhere Rohemission von CO im Vergleich zur HC-Rohemission (vgl. Abb. 6-5).

Bei kurzer Adsorptionsdauer und langer Regenerationsdauer werden auch für den Kraftstoffverbrauch die höchsten Werte erreicht, da der Kraftstoffverbrauch bei Betrieb mit homogener Gemischbildung und kleinem Luftverhältnis gegenüber dem Betrieb mit Ladungsschichtung deutlich höher ist. Zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs sind also ähnliche Bedingungen anzustreben wie zur Minimierung der HC- und CO-Emissionen.

Nach Abb. 6-2 gibt es für jede untersuchte Adsorptionsdauer einen schmalen Bereich für die Regenerationsdauer, in dem sowohl die NO_x-Emission als auch die Emissionen von CO und HC niedrige Werte erreichen. Dies gilt unabhängig vom Luftverhältnis in der Regenerationsphase und wurde auch in [40] bereits festgestellt. Wenn die Regenerationsdauer in diesem Bereich liegt, kann von einer optimalen Regenerationsdauer gesprochen werden, die einen guten Kompromiß bei der Optimierung von NO_x-Emission, HC- und CO-Emissionen sowie Kraftstoffverbrauch darstellt.

Das linke Diagramm in Abb. 6-3 zeigt die optimale Regenerationsdauer in Abhängigkeit der Adsorptionsdauer unter anderem für den hier betrachteten frischen NO_x-Speicher-Katalysator des Typs A. Es ergibt sich ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen der Adsorptionsdauer und der erforderlichen Regenerationsdauer. Bei einer Adsorptionsdauer von 20 s ist eine etwas verkürzte Regenerationsdauer festzustellen. Dies ist darauf zurückzuführen, daß infolge der häufigen Regeneration eine höhere Temperatur des NO_x-Speicher-Katalysators erreicht wird als bei längerer Adsorptionsdauer. Hierdurch wird die NO_x-Speicherfähigkeit und damit die während der Adsorptionsphase gespeicherte NO_x-Masse wegen des begrenzten Temperaturfensters reduziert. Die zeitlich gemittelte Temperatur in der Mitte des NO_x-Speicher-Katalysators beträgt bei einer Adsorptionsdauer von 80 s 427 °C, bei einer Verkürzung der Adsorptionsdauer auf 20 s steigt sie auf 457 °C.

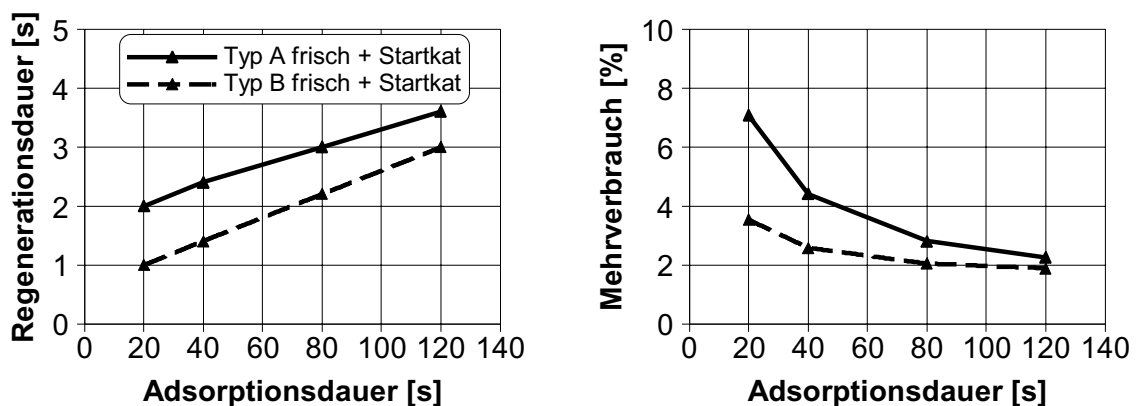


Abb. 6-3: Optimale Regenerationsdauer und zugehöriger Kraftstoff-Mehrverbrauch für verschiedene Katalysatortypen ($n = 2000 \text{ l/min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$, $\lambda_{Reg} = 0.65$)

Der fiktive Schnittpunkt der Kurve mit der Abszisse repräsentiert eine theoretische Regenerationsdauer, die ohne die Umsetzung von gespeicherten Stickoxiden erforderlich wäre. Dieser Wert entspricht der Dauer, die für die Umsetzung des im Startkatalysator und im NO_x-Speicher-Katalysator gespeicherten Sauerstoffs benötigt wird [68] und beträgt hier etwa 1.7 s. Dieser Zeitbedarf ist näherungsweise unabhängig von der Dauer der Adsorptionsphase [63]. Man erkennt somit, daß bei Katalysatortyp A gemäß Abb. 6-3 selbst bei hoher NO_x-Beladung etwa die Hälfte der Regenerationsdauer für den Umsatz des gespeicherten Sauerstoffs benötigt wird.

In Abb. 6-3 ist im linken Diagramm auch die optimale Regenerationsdauer für einen zweiten, ebenfalls untersuchten Katalysator des Typs B dargestellt. Wie die veränderte Lage des Schnittpunktes mit der Abszisse bei Verlängerung der Kurve zeigt, weist dieser Katalysator eine deutlich niedrigere O₂-Speicherfähigkeit auf. Die Ursache hierfür liegt im deutlich geringeren Cer-Gehalt der Beschichtung von Typ B (vgl. Kap. 5.3.2). Die optimale Dauer für die Regeneration ist dadurch gegenüber Typ A verkürzt. Wie man am etwas steileren Verlauf der Kurve für Typ B erkennt, ist außerdem die Zunahme der erforderlichen Regenerationsdauer mit zunehmender gespeicherter NO_x-Masse bei Typ B größer als bei Typ A, d.h. die gespeicherten Stickoxide werden offensichtlich etwas langsamer freigesetzt.

Wie das rechte Diagramm in Abb. 6-3 zeigt, ergibt sich wegen der höheren O₂-Speicherfähigkeit von Katalysatortyp A bei gleicher Adsorptionsdauer ein deutlich höherer Kraftstoff-Mehrverbrauch als bei Typ B. Umgekehrt wären bei gleichem Kraftstoff-Mehrverbrauch mit Typ B kürzere Adsorptionsdauern möglich, was zu einer Verringerung der NO_x-Emission führen würde.

Somit ist prinzipiell eine möglichst geringe O₂-Speicherfähigkeit des NO_x-Speicher-Katalysators wünschenswert. Es ist jedoch zu beachten, daß die O₂-Speicherfähigkeit von der Washcoat-Zusammensetzung und dem Edelmetallgehalt des Katalysators abhängt [70] und somit nicht isoliert von anderen wesentlichen Eigenschaften des Katalysators verändert werden kann. An dieser Stelle ist seitens des Katalysator-Herstellers ein Kompromiß zwischen den verschiedenen Anforderungen an die Katalysator-Eigenschaften erforderlich.

Im Gegensatz zur Regenerationsdauer gibt es bei der Wahl der Adsorptionsdauer keinen optimalen Wert. Dieser Sachverhalt ist im linken Diagramm von Abb. 6-4 veranschaulicht. Hierbei stellt jede Kurve eine Variation der Regenerationsdauer bei jeweils konstanter Adsorptionsdauer dar. Man erkennt, daß in keinem der untersuchten Punkte eine geringe NO_x-Emission bei ebenfalls geringem Kraftstoffverbrauch erreicht wird. Im rechten Diagramm von Abb. 6-4 ist die NO_x-Minderung dargestellt, die mit optimaler Regenerationsdauer für die jeweilige Adsorptionsdauer erreicht wird. Dem Diagramm ist zu entnehmen, daß im betrachteten Betriebspunkt beispielsweise eine Adsorptionsdauer von 80 s gewählt werden muß, um eine NO_x-Minderung von 95 % zu erreichen. Hierbei ist ein Mehrverbrauch von etwa 2.8 % in Kauf zu nehmen. Als Kompromiß hinsichtlich des Zielkonflikts zwischen minimaler NO_x-Emission und minimalem Kraftstoffverbrauch ist somit die Adsorptionsdauer möglichst hoch zu wählen, die maximal zulässige NO_x-Emission muß aber noch unterschritten werden.

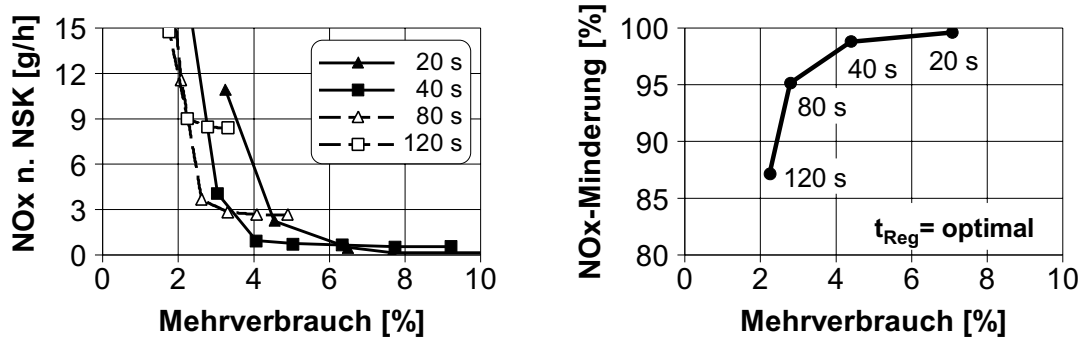


Abb. 6-4: NO_x-Emission bzw. NO_x-Minderung über dem Kraftstoff-Mehrverbrauch bei Variation der Adsorptionsdauer
 ($n = 2000 \text{ l/min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$, $\lambda_{Reg} = 0.65$, NSK Typ A frisch)

6.1.3 Einfluß des Luftverhältnisses bei der Nitrat-Regeneration

Das Regenerations-Luftverhältnis bestimmt die HC- und CO-Rohemission und somit den zur Umsetzung der Stickoxide zugeführten Reduktionsmittel-Massenstrom. Nach [17] ist für einen hohen NO_x-Umsatz bei geringem Kraftstoffverbrauch ein Regenerations-Luftverhältnis von etwa $\lambda_{Reg} = 0.8$ optimal. Eine Anfechtung auf noch kleinere Werte steigert den NO_x-Umsatz nicht derart, daß sie den überproportional erhöhten Kraftstoffverbrauch rechtfertigen würde. Im Gegensatz hierzu wurde in [68] festgestellt, daß der Verbrauchsnachteil durch die Regenerationsphasen minimal wird, wenn ein möglichst kleines Luftverhältnis zur Regeneration gewählt wird. Bei weniger fettem Luftverhältnis ist die Regeneration allerdings wegen der längeren Dauer gründlicher [134].

Um diese Aussagen zu überprüfen, wurde eine Variation des Regenerations-Luftverhältnisses durchgeführt. Hierbei wurde als kleinster Wert $\lambda_{Reg} = 0.65$ betrachtet, da bei noch kleinerem Luftverhältnis beim Versuchsmotor ein starker Anstieg der Rußbildung infolge der schlechten Gemischaufbereitung auftrat. Zur Bewertung der Rußbildung wurde die Filter Smoke Number herangezogen (vgl. Kap. 5.4.1). Abb. 6-5 zeigt den Kraftstoffverbrauch sowie die HC- und CO-Rohemission für verschiedene Luftverhältnisse. Der Kraftstoffverbrauch nimmt mit kleinerem Luftverhältnis zu, da ein zunehmender Anteil des eingespritzten Kraftstoffs wegen des Luftmangels nicht vollständig verbrannt wird. Durch die unvollständige Verbrennung steigt die CO-Emission stark an. Auch die HC-Emission nimmt mit kleinerem Luftverhältnis zu, ist aber wesentlich niedriger als die CO-Emission.

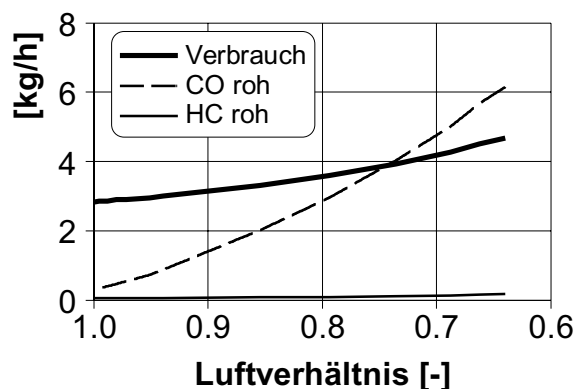


Abb. 6-5:
 Kraftstoffverbrauch und
 Reduktionsmittellangebot bei
 Variation des Luftverhältnisses
 ($n = 2000 \text{ l/min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$)

In Abb. 6-6 ist eine Variation des Regenerations-Luftverhältnisses bei einer Adsorptionsdauer von 80 s dargestellt. Man erkennt, daß bei ausreichender Regenerationsdauer mit dem kleinsten betrachteten Luftverhältnis $\lambda_{\text{Reg}} = 0.65$ die geringste NO_x-Emission nach Katalysator erreicht wird. Die höhere NO_x-Emission bei größeren Luftverhältnissen wird durch einen stärkeren NO_x-Durchbruch in der Regenerationsphase verursacht. Dies ist dadurch bedingt, daß für die Umsetzung der freigesetzten Stickoxide zu Beginn der Regeneration wegen der geringeren HC- und CO-Rohemissionen nicht ausreichend Reduktionsmittel zur Verfügung steht (vgl. Kap. 6.1.1). Zu Beginn der Regeneration ist also ein möglichst kleines Luftverhältnis erforderlich, um eine niedrige NO_x-Emission zu erzielen.

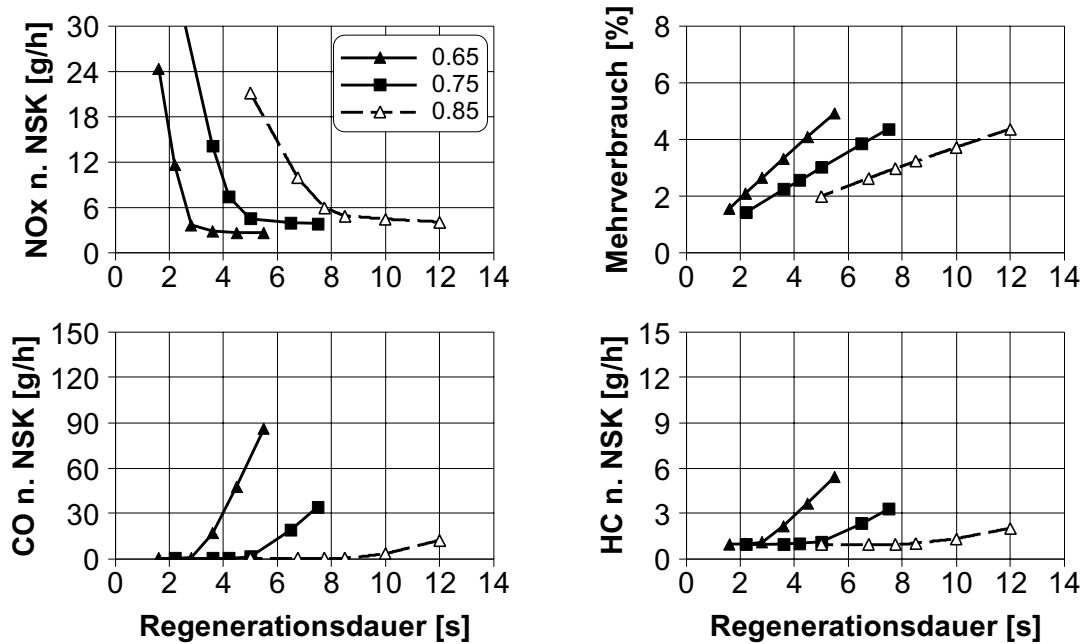


Abb. 6-6: Variation des Regenerations-Luftverhältnisses im Mager/Fett-Betrieb ($n = 2000 \text{ l/min}$, $p_{\text{me}} = 2 \text{ bar}$, $t_{\text{Ads}} = 80 \text{ s}$, NSK Typ A frisch)

Mit kleinerem Luftverhältnis reicht wegen des wesentlich höheren Reduktionsmittel-Massenstroms eine deutlich kürzere Regenerationsdauer aus, um eine vollständige Regeneration durchzuführen. Bei $\lambda_{\text{Reg}} = 0.65$ beträgt die optimale Regenerationsdauer im betrachteten Betriebspunkt 3.0 s, bei $\lambda_{\text{Reg}} = 0.85$ dagegen 9.5 s. Wegen der geringeren HC- und CO-Rohemissionen wird der Reduktionsmittel-Durchbruch bei zu langer Regeneration mit zunehmendem Luftverhältnis kleiner. Am Ende der Regeneration bietet also ein größeres Luftverhältnis Vorteile hinsichtlich der HC- und CO-Emissionen.

Abb. 6-7 zeigt das Ergebnis der oben bereits beschriebenen Untersuchungen in anderer Darstellung. Die einzelnen Kurven sind jeweils durch Variation der Regenerationsdauer entstanden. Im rechten Diagramm ist für die Punkte mit optimaler Regenerationsdauer die NO_x-Minderung gegenüber der NO_x-Rohemission im Magerbetrieb dargestellt. Man erkennt, daß mit einem Luftverhältnis von $\lambda_{\text{Reg}} = 0.65$ die niedrigsten Werte sowohl für die NO_x-Emission als auch für den Kraftstoff-Mehrverbrauch erreicht werden. Bei der Wahl des Regenerations-Luftverhältnisses liegt also kein Zielkonflikt zwischen geringer NO_x-Emission und geringem Kraftstoffverbrauch vor.

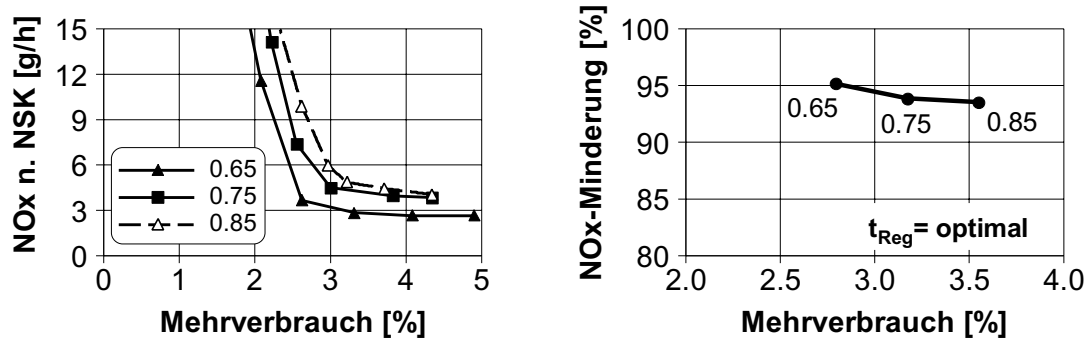


Abb. 6-7: NO_x-Emission bzw. NO_x-Minderung über dem Kraftstoff-Mehrverbrauch bei Variation des Regenerations-Luftverhältnisses
 ($n = 2000 \text{ l/min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$, $t_{Ads} = 80 \text{ s}$, NSK Typ A frisch)

Der Zusammenhang zwischen Luftverhältnis und Kraftstoffverbrauch wird in Abb. 6-8 genauer betrachtet. Bei stationärem Betrieb steigt der Kraftstoffverbrauch mit kleinerem Luftverhältnis. Wegen des höheren Reduktionsmittel-Massenstroms verkürzt sich die erforderliche Regenerationsdauer. Da die Zunahme des Reduktionsmittel-Massenstroms bei kleiner werdendem Luftverhältnis höher ist als die Zunahme des Kraftstoffverbrauchs (vgl. Abb. 6-5 sowie [68]), ist die relative Verkürzung der erforderlichen Regenerationsdauer mit kleinerem Luftverhältnis größer als die relative Zunahme des Kraftstoffverbrauchs. Hierdurch ist die für einen einzelnen Mager/Fett-Zyklus zusätzlich erforderliche Kraftstoffmasse bei kleinem Luftverhältnis geringer, mit $\lambda_{Reg} = 0.65$ ergibt sich ein Vorteil von 8 % gegenüber $\lambda_{Reg} = 0.85$. Dieser Vorteil wird jedoch zu einem großen Teil wieder dadurch kompensiert, daß dieser Zyklus mit kleinem Luftverhältnis wegen der kürzeren Regenerationsdauer im gleichen Zeitraum häufiger stattfindet. Somit ist der auf die Zeit bezogene Kraftstoffverbrauch im Mager/Fett-Betrieb mit $\lambda_{Reg} = 0.65$ nur noch um etwa 1 % niedriger als mit $\lambda_{Reg} = 0.85$.

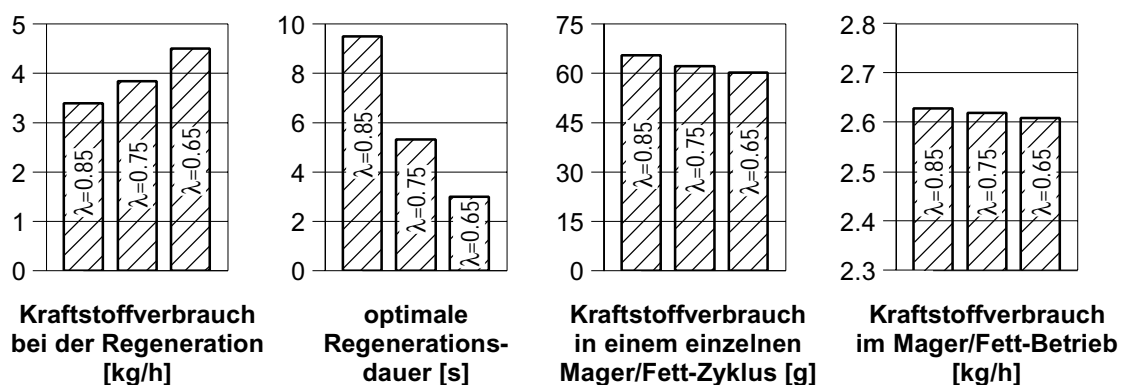


Abb. 6-8: Kraftstoffverbrauch und optimale Regenerationsdauer bei Variation des Regenerations-Luftverhältnisses
 ($n = 2000 \text{ l/min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$, $t_{Ads} = 80 \text{ s}$, NSK Typ A frisch)

6.1.4 Optimierungsbedarf bei der Nitrat-Regeneration

Aus den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Untersuchungen können Aussagen darüber abgeleitet werden, wie die Nitrat-Regeneration hinsichtlich minimaler Emissionen und minimalem Kraftstoffverbrauch optimiert werden kann. Folgende Erkenntnisse aus Stationärversuchen sind hierbei von Bedeutung:

1. Es gibt stets eine optimale Regenerationsdauer, bei der eine niedrige NO_x-Emission erreicht wird und zugleich noch kein starker Durchbruch von CO und HC auftritt. Bei einer zu langen Regeneration tritt eine unnötige Zunahme des Kraftstoffverbrauchs auf. Daher ist eine Regenerationsdauer nahe der optimalen Dauer anzustreben.
2. Bei der Optimierung der Adsorptionsdauer ergibt sich ein Zielkonflikt zwischen minimaler NO_x-Emission und minimalem Kraftstoff-Mehrverbrauch. Als Kompromiß sollte die Adsorptionsdauer so hoch gewählt werden, daß die erforderliche NO_x-Minderung bei optimaler Regenerationsdauer gerade noch erreicht werden kann.
3. Für minimale NO_x-Emission und minimalen Kraftstoffverbrauch muß ein möglichst kleines Regenerations-Luftverhältnis gewählt werden. Je kleiner das Luftverhältnis ist, desto höher sind allerdings die HC- und CO-Emissionen im Fall zu langer Regeneration. Somit ist die Realisierung einer optimalen Regenerationsdauer bei einem kleinen Regenerations-Luftverhältnis besonders wichtig.

6.2 Regelung des Mager/Fett-Betriebs zur Nitrat-Regeneration

Im vorangegangenen Kapitel wurde festgestellt, daß die Dauer der Adsorptions- und Regenerationsphasen wichtige Parameter für den Mager/Fett-Betrieb sind. Nachfolgend wird untersucht, wie sich geeignete Werte regelungstechnisch realisieren lassen, so daß auch im realen Fahrbetrieb eine vorteilhafte Nitrat-Regeneration durchgeführt werden kann.

Wie bereits erläutert, wurde wegen des hohen Aufwands auf die Realisierung eines mathematischen Modells des NO_x-Speicher-Katalysators in der Motorsteuerung verzichtet. Die nachfolgend beschriebenen Untersuchungen wurden daher mit einem rein sensorbasierten System durchgeführt, das aus einem NO_x-Sensor mit integrierter Breitband-Lambdasonde sowie einer binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator besteht.

6.2.1 Regelung der Adsorptionsdauer mit Hilfe eines NO_x-Sensors

Die Regelung der Adsorptionsdauer ist gleichbedeutend mit der Wahl der Zeitpunkte für Nitrat-Regenerationen. Wie bereits in Kap. 3.4.3.1 erläutert, kann die Durchführung von Nitrat-Regenerationen aus zwei verschiedenen Gründen notwendig sein:

- wegen hoher NO_x-Beladung des NO_x-Speicher-Katalysators
- vor dem Wechsel von Magerbetrieb zu Betrieb mit $\lambda \leq 1$

Der Zeitpunkt für eine Regeneration vor dem Wechsel zu Betrieb mit $\lambda \leq 1$ wird ausschließlich dadurch vorgegeben, daß der Fahrer ein Motordrehmoment fordert,

das bei Magerbetrieb nicht zur Verfügung gestellt werden kann. Somit wird die Regeneration unabhängig vom Beladungszustand des NO_x-Speicher-Katalysators eingeleitet. Dieser Fall ist hinsichtlich einer Regelung der Adsorptionsdauer nicht von Interesse.

Dagegen ist für die Regeneration wegen hoher NO_x-Beladung des Katalysators eine Strategie für die Wahl eines geeigneten Zeitpunktes zu entwickeln. Da, wie oben bereits erwähnt, in der Motorsteuerung kein Modell des NO_x-Speicher-Katalysators implementiert wurde, steht als Eingangsgröße für eine Regelung der Adsorptionsdauer nur das Signal des NO_x-Sensors nach NO_x-Speicher-Katalysator zur Verfügung. Mit Hilfe dieses Sensors kann die absolute Höhe des momentanen NO_x-Schlupfes als Kriterium für die Einleitung einer Nitrat-Regeneration herangezogen werden [6, 53, 79]. In [53] wird vorgeschlagen, beispielsweise bei Überschreiten einer NO_x-Konzentration von 50 ppm eine Regeneration anzufordern.

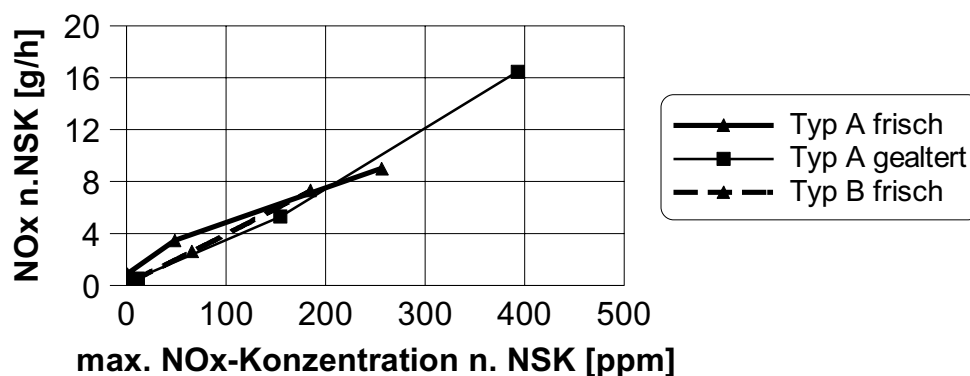


Abb. 6-9: Zusammenhang zwischen NO_x-Konzentration am Ende der Adsorptionsphase und gemittelter NO_x-Emission nach Katalysator im Mager/Fett-Zyklus ($n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, $\lambda_{Reg} = 0.65$, t_{Reg} optimal)

Abb. 6-9 zeigt den Zusammenhang zwischen der NO_x-Konzentration nach NO_x-Speicher-Katalysator am Ende der Adsorptionsphase und der gemittelten NO_x-Emission im gesamten Mager/Fett-Zyklus. Die Werte wurden für zwei verschiedene Katalysatortypen und zwei verschiedene Alterungszustände ermittelt. Die Nitrat-Regeneration wurde jeweils mit optimaler Regenerationsdauer durchgeführt. Es ergibt sich ein näherungsweise linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen. Somit ist die Vorgabe einer maximalen NO_x-Konzentration nach NO_x-Speicher-Katalysator ein geeignetes Verfahren, um durch Regelung der Adsorptionsdauer eine angestrebte gemittelte NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator zu erreichen.

Die Betrachtung der NO_x-Konzentration nach NO_x-Speicher-Katalysator hat jedoch den Nachteil, daß in verschiedenen Betriebspunkten je nach Abgasmassenstrom unterschiedliche Werte für die NO_x-Emission nach Katalysator erzielt werden. Daher wurde in der Motorsteuerung eine Berechnung des aktuellen NO_x-Massenstroms nach Katalysator realisiert. Dieses Vorgehen wird auch in [79] beschrieben. Die Berechnung des NO_x-Massenstroms erfolgt mit der im Anhang dargestellten Gleichung. Der Abgasmassenstrom wird hierbei durch Addition der in der Motorsteuerung verfügbaren aktuellen Werte für angesaugte Luftmasse und eingespritzte Kraftstoffmasse errechnet. Als maximaler NO_x-Massenstrom nach Katalysator, bei dessen Erreichen eine Regeneration durchgeführt werden soll, wurde für die weiteren Untersuchungen ein Wert von 2 mg/s gewählt. Im Betriebspunkt mit $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar entspricht dieser Massenstrom im

Magerbetrieb einer NO_x-Konzentration von ca. 60 ppm. Gemäß Abb. 6-9 ergibt sich mit diesem Wert eine NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator von maximal 4 g/h, die NO_x-Minderung gegenüber reinem Magerbetrieb liegt somit bei mindestens 94 %. Durch Vorgabe eines maximalen NO_x-Massenstroms von 2 mg/s wird also eine hohe NO_x-Minderung sichergestellt.

Im Vergleich zur Vorgabe einer maximalen NO_x-Konzentration nach Katalysator von 60 ppm führt die Vorgabe eines maximalen NO_x-Massenstroms von 2 mg/s dazu, daß Nitrat-Regenerationen überwiegend bei höherer Drehzahl und Last durchgeführt werden. Dies bietet Vorteile hinsichtlich NO_x-Emission und Kraftstoffverbrauch (vgl. Kap. 3.4.3.1). Im Leerlauf wird mit diesem Verfahren nur sehr selten eine Regeneration durchgeführt werden. Hierdurch werden Komfort-Beeinträchtigungen minimiert, die durch Veränderungen in Drehzahl, Laufruhe und Geräusch beim motorischen Betriebsartwechsel entstehen können.

6.2.2 Regelung der Regenerationsdauer mit Hilfe einer Lambdasonde

In Abb. 6-3 sind die für verschiedene Randbedingungen jeweils optimalen Regenerationsdauern dargestellt. Nachfolgend wird die Möglichkeit untersucht, diese Werte mit einer geeigneten Regelung zu realisieren. Hierbei wird das in Kap. 3.4.3.2 beschriebene Verfahren auf Basis der Signale von Lambdasonden nach NO_x-Speicher-Katalysator verwendet.

6.2.2.1 Verhalten von Lambdasonden nach NO_x-Speicher-Katalysator

Der Versuchsaufbau beinhaltet verschiedene Lambdasonden nach NO_x-Speicher-Katalysator. In Abb. 6-10 ist der Signalverlauf dieser Sonden während einer Nitrat-Regeneration dargestellt. Die zugehörigen Emissionen sind bereits in Abb. 6-1 zu sehen. Es wurde schon festgestellt, daß hierbei die Regenerationsdauer etwas zu lang gewählt wurde.

Das oberste Diagramm in Abb. 6-10 zeigt den Signalverlauf der Breitband-Meßsonden. Die vor NO_x-Speicher-Katalysator positionierte Sonde detektiert zu Beginn der Regeneration einen Abfall von $\lambda > 2$ auf die untere Grenze des Meßbereichs bei $\lambda = 0.75$. Dagegen fällt das nach NO_x-Speicher-Katalysator gemessene Luftverhältnis zunächst nur auf $\lambda = 1$ und erst nach ca. 3 s auf den vor Katalysator gemessenen Wert ab. Dieser Abfall des Luftverhältnisses nach NO_x-Speicher-Katalysator auf $\lambda < 1$ ist ein Hinweis auf eine abgeschlossene Nitrat-Regeneration.

Das Spannungssignal der in den NO_x-Sensor integrierten Breitband-Lambdasonde (mittleres Diagramm in Abb. 6-10) zeigt einen ähnlichen Verlauf wie die Meßsonde nach NO_x-Speicher-Katalysator. Hier verharrt das Signal zunächst bei dem einem stöchiometrischen Luftverhältnis entsprechenden Wert von 2.5 V, bevor es etwa zum gleichen Zeitpunkt wie die Meßsonde auf niedrigere Werte abfällt.

Das Verhalten der binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator unterscheidet sich deutlich von dem der Breitband-Lambdasonden (Abb. 6-10, unteres Diagramm). Hier ist zu Beginn der Regeneration ein leichter Anstieg der SONDENSPIGUNG auf 0.1 bis 0.15 V festzustellen. Diese Werte kennzeichnen ein leicht mageres Abgas. Etwa 2.7 s später steigt die SONDENSPIGUNG dann sehr rasch auf Werte über 0.8 V an und signalisiert somit den Wechsel zu einer fetten

Abgaszusammensetzung. Die sehr ausgeprägte Reaktion der binären Lambdasonde tritt etwa 0,3 s früher auf als der Signalabfall der Breitband-Lambdasonde. Auch in [134] wurde bereits festgestellt, daß eine binäre Lambdasonde am Regenerationsende früher anspricht als eine Breitband-Lambdasonde.

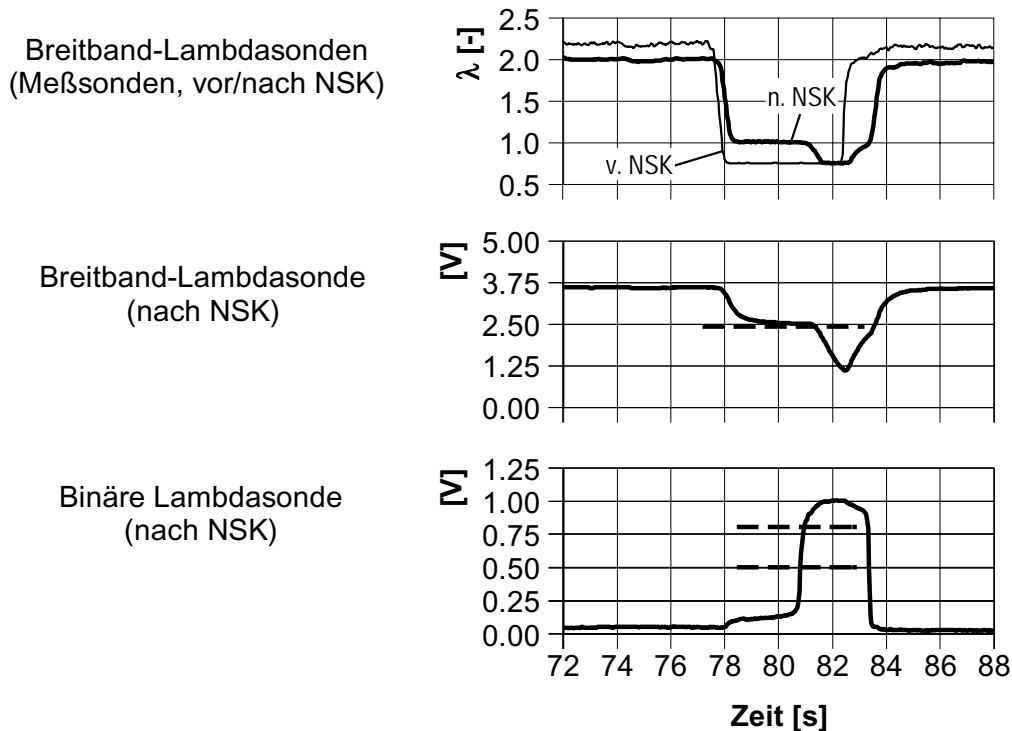


Abb. 6-10: Signale verschiedener Lambdasonden bei einer Nitrat-Regeneration ($n = 2000 \text{ l/min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$, $t_{Ads} = 120 \text{ s}$, $t_{Reg} = 4.5 \text{ s}$, $\lambda_{Reg} = 0.65$, NSK Typ A frisch)

Die in den NO_x-Sensor integrierte Breitband-Lambdasonde und die binäre Lambdasonde wurden in die Motorsteuerung eingebunden. Zur Auswertung der Sensorsignale wurden Schwellenwerte definiert, bei deren Unter- bzw. Überschreitung auf eine vollständige Regeneration geschlossen und somit die Regeneration beendet wird. Diese Schwellenwerte sind in Abb. 6-10 als gestrichelte Linien eingezeichnet. Bei der Breitband-Lambdasonde wurden die Untersuchungen mit einem Schwellenwert von 2,45 V durchgeführt, bei der binären Lambdasonde wurden mit 0,5 V und 0,8 V gleich zwei Schwellenwerte betrachtet.

6.2.2.2 Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei Regelung der Regenerationsdauer

Um die Eignung der verschiedenen Sondersignale und Schwellenwerte zu untersuchen, wurden bei den in Kap. 6.1 beschriebenen Untersuchungen die Sondersignale erfaßt und ausgewertet. In Abb. 6-11 sind der Kraftstoff-Mehrverbrauch und die Emissionen dargestellt, die sich bei einer Adsorptionsdauer von 80 s bei Verwendung des jeweiligen Sensorsignals ergeben hätten. Hierzu wurde, falls notwendig, zwischen zwei Punkten der Meßreihe interpoliert. Diese Werte werden mit den Werten für die jeweils optimale Regenerationsdauer verglichen. Bei einem Regenerations-Luftverhältnis von $\lambda_{Reg} = 0.65$ ist die

Regenerationsdauer bei Verwendung der Breitband-Lambdasonde um 18 % zu lang. Die NO_x-Emission ist infolge der längeren Regeneration noch etwas niedriger als bei optimaler Regenerationsdauer, die HC- und CO-Emissionen sowie der Kraftstoffverbrauch sind dagegen höher. Bei Regelung der Regenerationsdauer mit einer binären Lambdasonde und einem Schwellenwert von 0.5 V würde sich eine Dauer ergeben, die nur 1.5 % länger als die optimale Dauer ist.

Bei einem Regenerations-Luftverhältnis von $\lambda_{\text{Reg}} = 0.85$ sind die Unterschiede zwischen den Varianten hinsichtlich Emissionen und Kraftstoffverbrauch geringer als bei einer Regeneration mit $\lambda_{\text{Reg}} = 0.65$. Dieses Verhalten wurde auch in [135] bereits festgestellt. Mit der binären Lambdasonde wird hier sogar eine Regenerationsdauer erzielt, die kürzer als die optimale Regenerationsdauer ist.

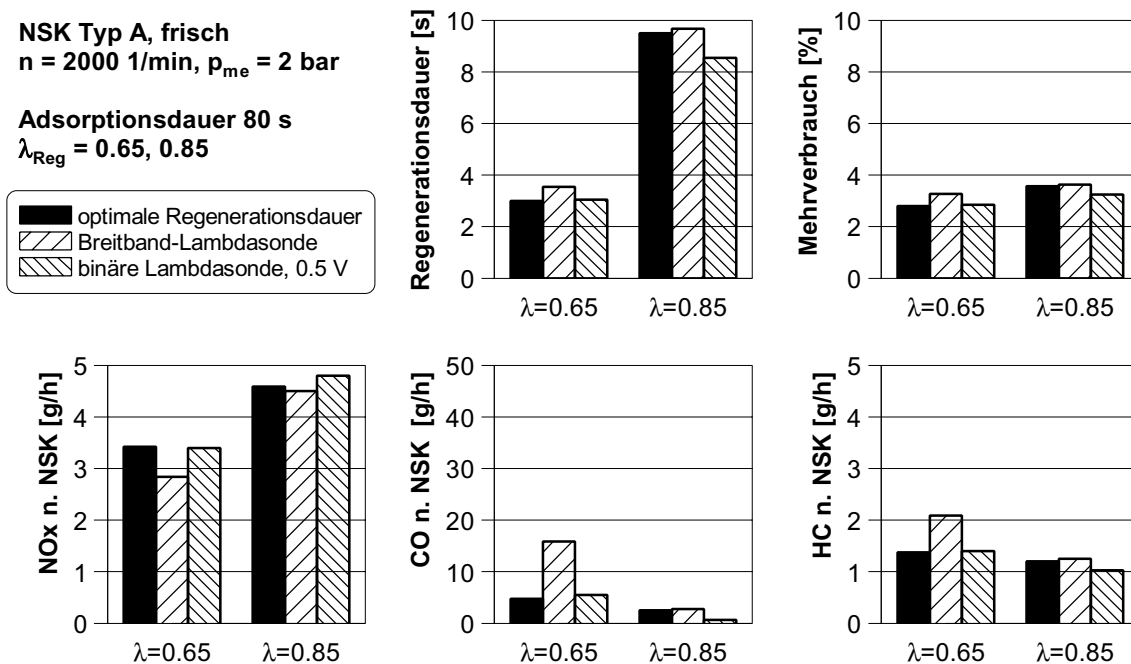


Abb. 6-11: Kraftstoffverbrauch und Emissionen bei Regelung der Regenerationsdauer mit verschiedenen Lambdasonden ($t_{\text{Ads}} = 80 \text{ s}$)

Abb. 6-12 zeigt die relativen Abweichungen gegenüber der optimalen Regenerationsdauer, die sich für alle betrachteten Bedingungen bei einem frischen NO_x-Speicher-Katalysator des Typs A im Betriebspunkt mit $n = 2000 \text{ 1/min}$ und $p_{\text{me}} = 2 \text{ bar}$ ergeben.

Im Zusammenhang mit der binären Lambdasonde werden Schwellenwerte von 0.5 V und 0.8 V betrachtet. Hierbei ist die Regenerationsdauer mit dem höheren Schwellenwert geringfügig länger.

Insgesamt ist festzustellen, daß mit allen betrachteten Signalen bei kurzer Adsorptionsdauer und kleinem Luftverhältnis eine deutlich zu lange Regenerationsdauer gewählt wird. In diesem Fall ist es offensichtlich nicht möglich, mit Hilfe von Lambdasonden eine Regelung der Regenerationsdauer nahe der optimalen Dauer zu realisieren.

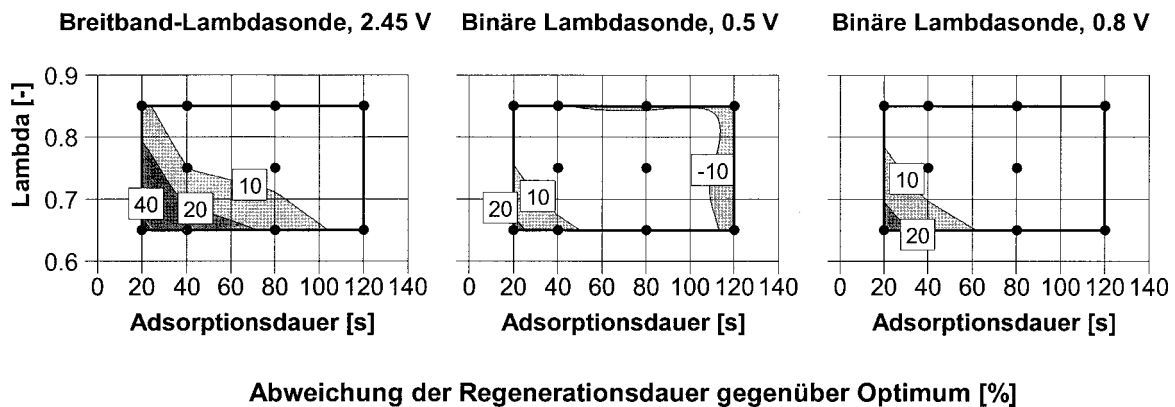


Abb. 6-12: Regenerationsdauer bei Regelung mit Hilfe verschiedener Lambdasonden ($n = 2000 \text{ 1/min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$, NSK Typ A frisch)

Um den Einfluß des Motor-Betriebspunktes zu untersuchen, wurden zusätzlich Untersuchungen mit $n = 1000 \text{ 1/min}$ und $n = 2500 \text{ 1/min}$ durchgeführt. Der effektive Mitteldruck wurde dabei mit $p_{me} = 2 \text{ bar}$ konstant gehalten. Durch die Variation des Betriebspunktes ändern sich zahlreiche Parameter wie Raumgeschwindigkeit, NO_x-Rohemission und Katalysator-Temperatur. Gegenüber dem bei $n = 2000 \text{ 1/min}$ und $p_{me} = 2 \text{ bar}$ festgestellten Verhalten treten folgende Unterschiede auf:

1. Der in Abb. 6-12 erkennbare günstige Einfluß eines höheren Luftverhältnisses auf das Verhalten der Sonden, insbesondere der Breitband-Lambdasonde, kann in den anderen Betriebspunkten nicht festgestellt werden.
2. Bei langer Adsorptionsdauer und niedriger Motordrehzahl ($n = 1000 \text{ 1/min}$) wird mit der binären Lambdasonde und einem Schwellenwert von 0.5 V eine um bis 40% zu kurze Regeneration durchgeführt. Mit einem Schwellenwert von 0.8 V wird dagegen eine ausreichende Regenerationsdauer erzielt. Wie in Kap. 6.2.1 festgestellt, ist eine Regeneration bei derart niedriger Drehzahl bei Betrachtung des NO_x-Massenstroms nach Katalysator als Kriterium für die Regelung der Adsorptionsdauer allerdings nur selten erforderlich. Bei $n = 2000 \text{ 1/min}$ und $n = 2500 \text{ 1/min}$ unterscheiden sich dagegen die Ergebnisse mit den beiden betrachteten Schwellenwerten nur sehr geringfügig.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß das Ansprechverhalten der beiden betrachteten Sondentypen wesentlich durch die Dauer der vorangegangenen Adsorptionsphase und damit durch die gespeicherte NO_x-Masse beeinflusst wird. Mit einer binären Lambdasonde werden bessere Ergebnisse erzielt als mit einer Breitband-Lambdasonde. Hierbei kann bei einem Regenerations-Luftverhältnis von $\lambda_{Reg} = 0.65$ ab einer gespeicherten NO_x-Masse von etwa 1 g , entsprechend einer Adsorptionsdauer von 50 s , eine Regelung nahe der optimalen Regenerationsdauer erfolgen. Bei einer NO_x-Beladung von etwa 0.4 g wird dagegen eine um etwa 20% zu lange Regeneration durchgeführt. Ein weiterer Vorteil einer binären Lambdasonde gegenüber einer Breitband-Lambdasonde ist, daß sie auch für eine Korrektur des mit der motornahen Breitband-Lambdasonde geregelten Luftverhältnisses genutzt werden kann (vgl. Kap. 3.4.3.2).

Es sei noch angemerkt, daß die mit der Breitband-Lambdasonde erzielten Ergebnisse auch auf den als Meßsonde eingesetzten Sondentyp übertragbar sind, da das Ansprechverhalten beider Sonden ähnlich ist (vgl. Abb. 6-10).

6.2.2.3 Einfluß des Katalysatortyps und -zustands auf das Verhalten der Lambdasonden

Die oben getroffenen Aussagen gelten zunächst nur für die Regelung der Regenerationsdauer bei einem frischen NO_x-Speicher-Katalysator des Typs A. Um die Übertragbarkeit des festgestellten Verhaltens auf andere Katalysatortypen und andere Alterungszustände zu untersuchen, werden nachfolgend der Katalysatortyp B sowie ein gealterter Katalysator des Typs A betrachtet.

Untersuchungen im Betriebspunkt mit $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar haben gezeigt, daß sich das Verhalten der Breitband-Lambdasonde bei einem Katalysator des Typs B nicht grundlegend gegenüber den Untersuchungen mit Typ A ändert. Somit ergeben sich ähnliche Abweichungen von der optimalen Regenerationsdauer wie bei Typ A. Allerdings ist der Einfluß des Luftverhältnisses auf die Abweichung gegenüber der optimalen Regenerationsdauer geringer als bei Typ A. Im Verhalten der binären Lambdasonde ergeben sich dagegen Veränderungen: Bei einem Schwellenwert von 0.5 V würde nach einer langen Adsorptionsphase eine deutlich zu kurze Regeneration erzielt. Mit einer Spannung von 0.8 V als Schwellenwert ist die Abweichung gegenüber der optimalen Dauer nach langer Adsorptionsdauer geringer. Bei Typ B wird also auch in diesem Betriebspunkt ein nennenswerter Einfluß des gewählten Schwellenwertes festgestellt. Beim frischen Katalysator des Typs A ist der Einfluß des Schwellenwertes dagegen gering (vgl. Abb. 6-12).

Die gleichen Untersuchungen wurden auch mit einem etwa 300 h gealterten NO_x-Speicher-Katalysator vom Typ A untersucht. Die Untersuchungen ergeben im betrachteten Betriebspunkt ein sehr ähnliches Ergebnis wie beim frischen Typ B.

Aus den hier beschriebenen Untersuchungen geht hervor, daß sich bei Verwendung eines anderen Katalysatortyps oder bei Alterung des NO_x-Speicher-Katalysators das Ansprechverhalten der betrachteten Lambdasonden in Bezug auf das optimale Regenerationsende nur in geringem Umfang ändert. Damit erscheint es möglich, das Konzept einer Regelung der Regenerationsdauer mit Hilfe einer Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator unabhängig von verwendeten Katalysatortyp und vom Alterungszustand des Katalysators einzusetzen.

6.3 Optimierung des Reduktionsmittelangebots

In Kap. 6.1.3 wurde dargestellt, daß mit einem möglichst kleinen Luftverhältnis bei der Regeneration der geringste Kraftstoff-Mehrverbrauch und die geringste NO_x-Emission in der Regenerationsphase erzielt werden kann. Hierbei ist $\lambda_{Reg} = 0.65$ als kleinstmögliches Luftverhältnis anzusehen.

Nachteile eines sehr kleinen Regenerations-Luftverhältnisses sind die erhöhten HC- und CO-Emissionen bei Überschreitung der optimalen Regenerationsdauer, die auch bei Regelung der Regenerationsdauer mit einer Lambdasonde nicht vollständig vermeidbar sind (vgl. Abb. 6-11). Daher wäre ein größeres Regenerations-Luftverhältnis wünschenswert. Darüber hinaus haben die in Kap. 6.2.2.2 beschriebenen Untersuchungen gezeigt, daß bei Regelung der Regenerationsdauer mit Hilfe von Lambdasonden bessere Ergebnisse erzielt werden, wenn das Regenerations-Luftverhältnis größer als $\lambda_{Reg} = 0.65$ gewählt wird.

In diesem Kapitel wird nun die Möglichkeit untersucht, durch Variation des Luftverhältnisses während der Regeneration die genannten Vorteile eines kleinen Luftverhältnisses zu erhalten und zugleich die damit verbundenen Nachteile zu vermindern. Während der hohe Reduktionsmittelbedarf zu Beginn der Regeneration durch ein sehr kleines Luftverhältnis abgedeckt werden soll, wird mit fortschreitender Regeneration zu größeren Luftverhältnissen übergegangen.

6.3.1 Optimierung des Luftverhältnisses bei der Regeneration

In [42, 79, 134] wurde bereits festgestellt, daß eine Vergrößerung des Luftverhältnisses mit fortschreitender Regeneration Vorteile hinsichtlich der HC- und CO-Durchbrüche bietet. Hierzu wird zunächst untersucht, inwieweit sich durch eine mehrstufige Vorgabe des Luftverhältnisses bei der Regeneration die Vorteile verschiedener Luftverhältnisse vereinen lassen. Die Untersuchungen wurden bei $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar durchgeführt. Hierbei wurde die Adsorptionsdauer mittels NO_x-Sensor geregelt, wodurch Werte zwischen 70 und 78 s erreicht wurden. Abb. 6-13 zeigt sechs verschiedene Varianten für den Verlauf des Luftverhältnisses während der Regeneration, wobei die Emissionen während der Regenerationsphase verglichen werden.

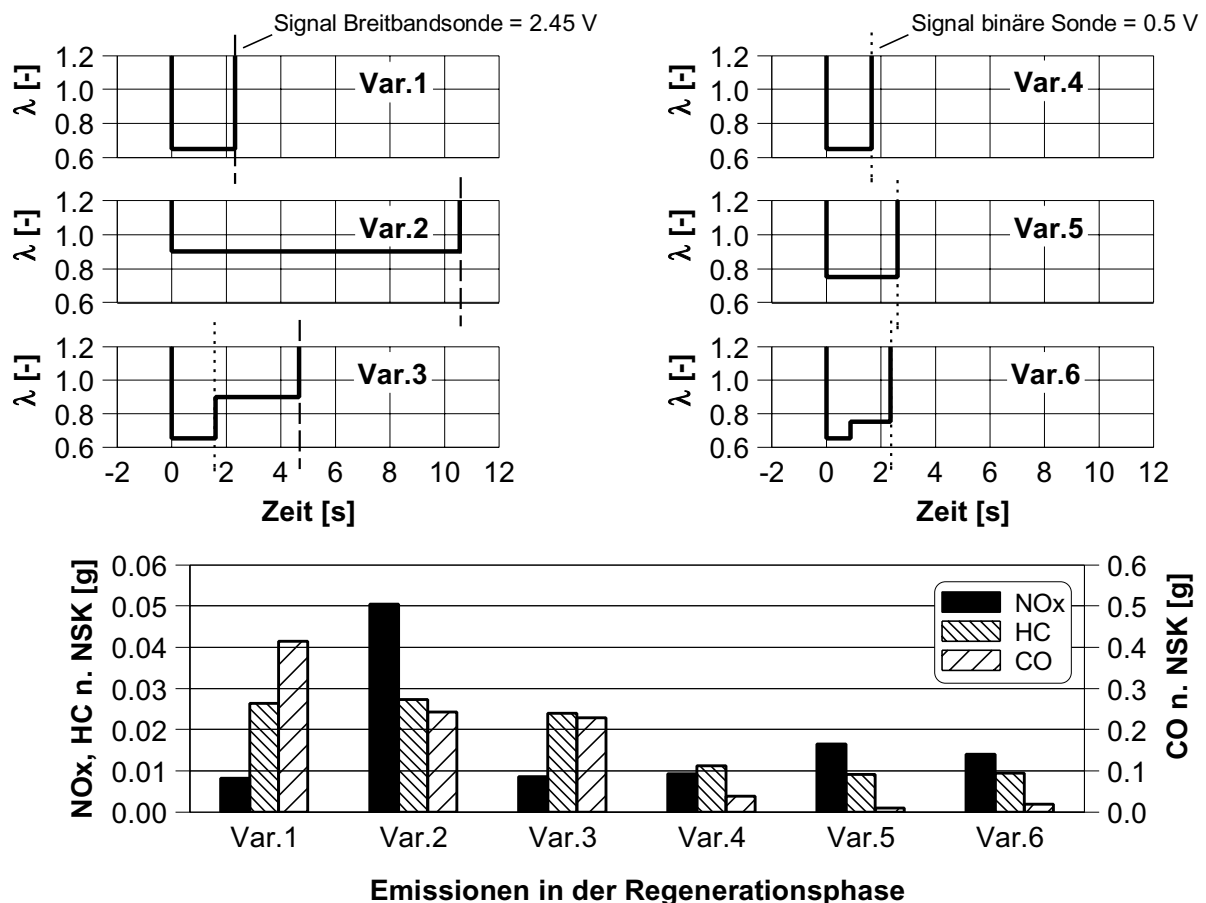


Abb. 6-13: Vergleich verschiedener Varianten zur Regeneration mit gestufter Vorgabe des Luftverhältnisses ($n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, t_{Ads} geregelt mit NO_x max. 2 mg/s, t_{Reg} geregelt, NSK Typ A gealtert)

Variante 1 stellt die Regeneration mit $\lambda_{\text{Reg}} = 0.65$ dar. Die Regenerationsdauer wurde mit Hilfe der Breitband-Lambdasonde nach Katalysator geregelt. Unter diesen Bedingungen ist die NO_x-Emission während der Regeneration gering, die CO-Emission dagegen hoch. Bei einer Regeneration mit $\lambda_{\text{Reg}} = 0.9$ (Variante 2) tritt dagegen ein hoher NO_x-Durchbruch bei der Regeneration auf. Während die HC-Emission bei beiden Varianten ähnlich ist, ist die CO-Emission bei der Regeneration mit $\lambda_{\text{Reg}} = 0.9$ deutlich geringer. Bei Variante 3 wurden die Varianten 1 und 2 miteinander kombiniert, indem für eine Dauer von 1.6 s $\lambda_{\text{Reg}} = 0.65$ und danach $\lambda_{\text{Reg}} = 0.9$ vorgegeben wurde. Der Wechsel zu einem größerem Luftverhältnis wurde hierbei zu dem Zeitpunkt durchgeführt, als das Signal der binären Lambdasonde nach Katalysator einen Wert von 0.5 V erreicht hat. Man erkennt, daß durch diesen zweistufigen Verlauf des Luftverhältnisses sowohl die niedrige NO_x-Emission der Variante 1 als auch die günstige CO-Emission der Variante 2 erzielt werden können. Die Vorteile eines kleinen Luftverhältnisses zu Beginn der Regeneration und eines größeren Luftverhältnisses am Ende der Regeneration lassen sich hier durch die gestufte Vorgabe des Luftverhältnisses also vereinen.

Bei den Varianten 4 bis 6 wurde das Signal der binären Lambdasonde nach Katalysator zur Regelung der Regenerationsdauer verwendet. Varianten 4 und 5 stellen mit $\lambda_{\text{Reg}} = 0.65$ bzw. $\lambda_{\text{Reg}} = 0.75$ Regenerationen mit jeweils konstantem Luftverhältnis dar. Eine Regeneration mit größerem Luftverhältnis führt auch hier zu einer höheren NO_x-Emission und niedrigeren HC- und CO-Emissionen. Bei Variante 6 wurden die Varianten 4 und 5 miteinander kombiniert. Hierbei wurde für 60 Arbeitsspiele des Motors $\lambda_{\text{Reg}} = 0.65$ eingestellt, bevor zu $\lambda_{\text{Reg}} = 0.75$ übergegangen wurde. 60 Arbeitsspiele entsprechen bei $n = 2000$ 1/min einer Dauer von 0.9 s. Die Werte der NO_x-, HC- und CO-Emissionen während der Regeneration liegen bei dieser Variante zwischen denen der Varianten 4 und 5. Gegenüber Variante 4 wird eine Verringerung der HC- und CO-Emissionen um 16 % beziehungsweise 51 % erreicht, die NO_x-Emission ist um 52 % höher.

In dem Fall einer insgesamt kurzen Regeneration lassen sich die Vorteile der verschiedenen Luftverhältnisse also nicht vollständig vereinen, es ist jedoch auch hier eine deutliche Einflußnahme auf die Emissionen möglich.

Zur Bewertung der verschiedenen Varianten zur Regeneration ist es erforderlich, eine Zielsetzung bei der Optimierung zu definieren. Wie aus Tab. 2-1 hervorgeht, liegen die EU4-Grenzwerte für NO_x und HC auf einem ähnlichen Niveau, während die CO-Emission im Abgastest gegenüber der HC-Emission einen zehnfachen Wert erreichen darf. Um dies zu veranschaulichen, wurde in allen Abbildungen in Kap. 6 für die Darstellung der CO-Emission ein Wertebereich gewählt, der jeweils ein zehnfaches des Wertebereichs für die HC-Emission beträgt.

Im Hinblick auf die im gesamten Abgastest auftretenden Emissionen ist zu beachten, daß neben den hier betrachteten Emissionen bei der Nitrat-Regeneration die Kaltstart-Emissionen eine entscheidende Rolle spielen. In der ersten Phase des Abgastests vor Erreichen einer ausreichenden Katalysator-Temperatur tritt vor allem eine hohe HC-Emission auf. In [12] wird beschrieben, daß der HC-Ausstoß in den ersten 150 s des in den USA geltenden FTP-75-Abgastests (Dauer 1887 s) etwa 75 % der gesamten HC-Emission darstellt. Dagegen beträgt der Anteil der NO_x- und CO-Emissionen in diesem Zeitraum nur etwa 50 % der Emissionen im gesamten Test. Hieraus kann umgekehrt der Schluß folgen, daß bei warmem Katalysator vor allem die HC-Emissionen als kritisch anzusehen sind, während NO_x- oder CO-Emissionen in gleicher Höhe zu weniger Problemen hinsichtlich der Einhaltung des

Grenzwertes führen. Daher muß als wichtigstes Ziel die bei der Nitrat-Regeneration emittierte HC-Masse möglichst niedrig sein. Die NO_x-Emission darf die HC-Emission zumindest leicht übersteigen. Die CO-Emission ist im Hinblick auf den höheren Abgasgrenzwert als weniger kritisch zu bewerten, zumal eine optimierte Strategie mit minimaler HC-Emission auch eine niedrige CO-Emission mit sich bringt. Bei Betrachtung der in Abb. 6-13 dargestellten Varianten werden die genannten Forderungen von Variante 6 am besten erfüllt.

In einer weiteren Versuchsreihe wurde untersucht, ob durch eine Verlängerung der als Variante 6 bezeichneten Regenerationsstrategie um eine dritte Stufe mit noch größerem Luftverhältnis weitere Verbesserungen erzielt werden können, insbesondere hinsichtlich der NO_x-Emission. Bei Variante 6a wurde nach den beiden Phasen mit $\lambda_{\text{Reg}} = 0.65$ und $\lambda_{\text{Reg}} = 0.75$ eine Phase mit $\lambda_{\text{Reg}} = 0.9$ hinzugefügt. Die Gesamtdauer der Regeneration wurde mit der Breitband-Lambdasonde nach Katalysator geregelt. Bei Variante 6b wurde die Dauer der Phase mit $\lambda_{\text{Reg}} = 0.9$ mit 2 s fest vorgegeben und damit gegenüber Variante 6a etwa halbiert. Schließlich wurde bei Variante 6c eine 2 s lange Phase mit $\lambda_{\text{Reg}} = 0.93$ statt $\lambda_{\text{Reg}} = 0.9$ hinzugefügt, um den Reduktionsmittel-Durchbruch zu verringern.

Gegenüber der Ausgangsbasis (Variante 6) kann nur mit Variante 6a eine nennenswerte Verringerung der NO_x-Emission (- 18 %) erzielt werden. Allerdings ist hierbei die CO-Emission gegenüber Variante 6 um den Faktor sechs höher, und auch die HC-Emission nimmt um 17 % zu. Die mit den Varianten 6b und 6c erzielten Emissionen unterscheiden sich dagegen nicht signifikant von den Werten der Ausgangsbasis. Jedoch ist bei allen Varianten mit gegenüber Variante 6 verlängerter Regenerationsdauer ein Anstieg des Kraftstoff-Mehrverbrauchs in Kauf zu nehmen. Somit kann Variante 6 als guter Kompromiß zwischen geringer NO_x-Emission, geringer CO- und HC-Emission und geringem Kraftstoff-Mehrverbrauch betrachtet werden. Daher kommt diese Variante bei den weiteren Untersuchungen vorzugsweise zum Einsatz.

Bemerkenswert ist, daß bei den hier durchgeführten Untersuchungen etwa die Hälfte der HC-Emission während der Adsorptionsphase auftritt und somit unabhängig von der Regenerationsstrategie ist. Dies wird auch später bei den Fahrzeuguntersuchungen festgestellt und in diesem Zusammenhang diskutiert (Kap. 6.5.1.2).

6.3.2 Regeneration vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb

Aus der Literatur ist bekannt, daß vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb eine Nitrat-Regeneration erforderlich ist (vgl. Kap. 3.4.3.1). Dies wird durch Abb. 6-14 verdeutlicht. Die Untersuchungen wurden in stationärem Betrieb durchgeführt ($n = 2000$ 1/min, $p_{\text{me}} = 2$ bar). Der Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb wurde hierbei durch einen Eingriff in die Motorsteuerung realisiert und war nicht durch eine Erhöhung der Drehmomentforderung bedingt. Bei einem Wechsel von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb ohne vorherige Regeneration kommt es aus den in Kap. 3.4.3.1 genannten Gründen zu einer erheblichen NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator. Eine vergleichsweise kurze Regeneration, wie in den mittleren Diagrammen in Abb. 6-14 dargestellt, bringt hier keine Verbesserung. Nur durch eine ausreichende Regenerationsdauer kann ein NO_x-Durchbruch vermieden werden (Abb. 6-14

rechts). In diesem Fall wurde die Regenerationsdauer mit Hilfe der binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator geregelt.

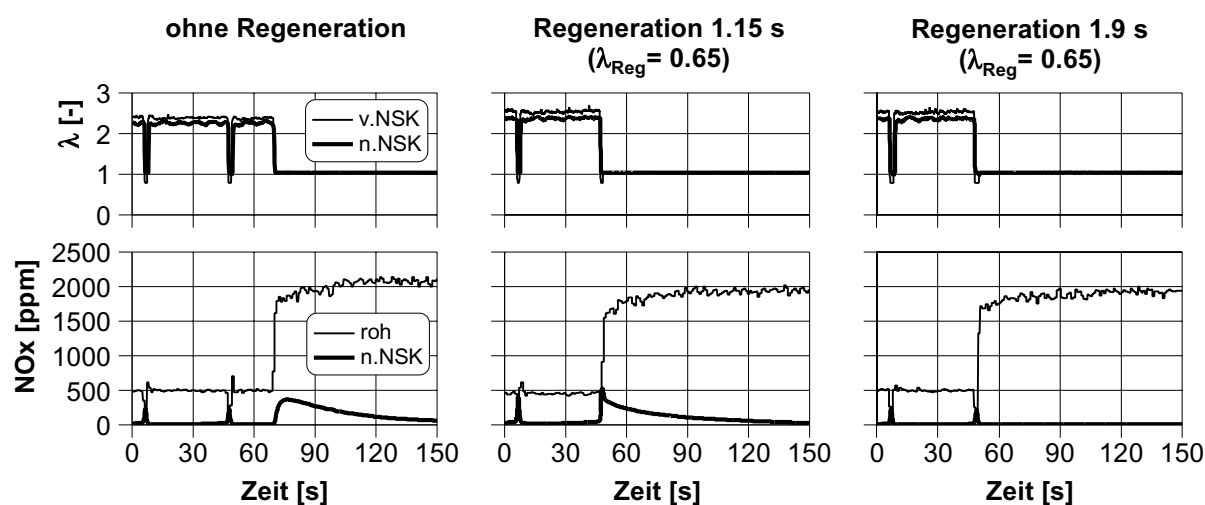


Abb. 6-14: *Einfluß einer Regeneration vor dem Wechsel von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb ($n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, $t_{Ads} = 40$ s, NSK Typ A gealtert)*

Aus den beschriebenen Untersuchungen wird deutlich, daß an die Regeneration vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb die gleichen Anforderungen hinsichtlich der Dauer gestellt werden muß wie an die bisher betrachtete Regeneration bei anschließender Fortsetzung des Magerbetriebs. Somit erscheint es naheliegend, auch in diesem Fall die im vorangegangenen Kapitel betrachteten Regenerationsstrategien einzusetzen. Dies soll im Folgenden näher untersucht werden.

Die Untersuchungen wurden mit den gleichen Varianten 1 bis 6 durchgeführt wie in Abb. 6-13 dargestellt. Allerdings wurde hier die Adsorptionsdauer nicht geregelt, sondern mit einem Wert von 30 s fest vorgegeben. Dies entspricht in grober Näherung den Bedingungen der Regeneration vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb, da in diesem Fall die Dauer der Adsorptionsphase unabhängig von einer Regelung der Adsorptionsdauer ist und nur durch den Fahrerwunsch vorgegeben wird. Wegen der kurzen Adsorptionsphase ist die NO_x-Emission hier bei allen Varianten sehr niedrig. Mit den Varianten 5 und 6 werden insgesamt die geringsten Emissionen erreicht. Daher sind diese in Abb. 6-15 dargestellt.

Ein Luftverhältnis $\lambda_{\text{Reg}} > 0.65$ führt, wie die bisherigen Untersuchungen gezeigt haben, zu einem stärkeren NO_x-Durchbruch zu Beginn der Regeneration. Dies verliert jedoch an Bedeutung, wenn die bis zu dem entsprechenden Zeitpunkt gespeicherte NO_x-Masse gering ist. Daher wird auch mit Variante 5 bei einem Regenerations-Luftverhältnis von $\lambda_{\text{Reg}} = 0.75$ eine relativ geringe NO_x-Emission erreicht. Bei noch kürzerer Adsorptionsphase wird, wie aus hier nicht dargestellten Untersuchungen hervorgeht, der Unterschied hinsichtlich der NO_x-Emission zwischen Variante 5 und 6 weiter verringert. Bei den HC- und CO-Emissionen bietet Variante 5 geringfügige Vorteile gegenüber Variante 6. Somit können die Varianten 5 und 6 bei einer Adsorptionsdauer von 30 s als gleichwertig betrachtet werden.

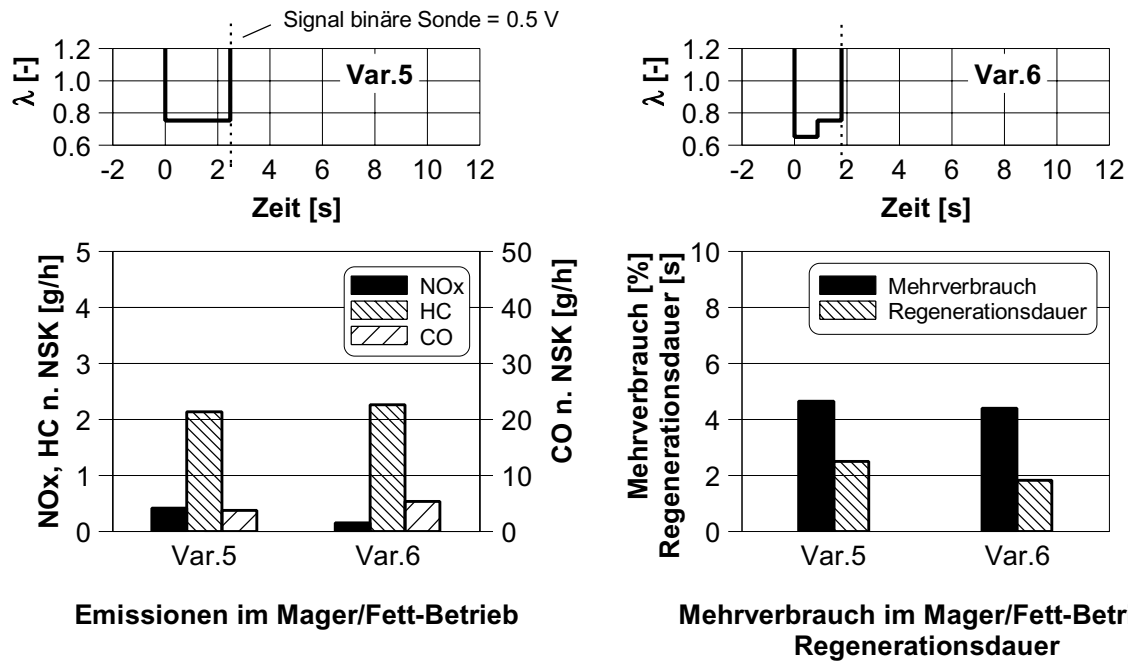


Abb. 6-15: Vergleich verschiedener Varianten zur Regeneration bei verkürzter Adsorptionsdauer ($n = 2000 \text{ l/min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$, $t_{Ads} = 30 \text{ s}$, t_{Reg} geregelt, NSK Typ A gealtert)

Bei den später folgenden Fahrzeuguntersuchungen werden Regenerationen vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb nach weniger als 30 s Adsorptionsdauer gemäß Variante 5 durchgeführt (vgl. Kap. 6.5.1). Eine weitergehende Anpassung an die während der vorangegangenen Adsorptionsphase gespeicherte NO_x-Masse wäre beispielsweise mit Hilfe eines rechnerischen Katalysatormodells in der Motorsteuerung denkbar, wurde hier jedoch nicht realisiert.

Der angegebene Kraftstoff-Mehrverbrauch bezieht sich wie bei allen bisherigen Darstellungen auf den Vergleich mit reinem Magerbetrieb im stationären Betriebspunkt. Bei der Regeneration vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb wäre jedoch korrekterweise lediglich der geringere Mehrverbrauch gegenüber dem Betrieb mit $\lambda = 1$ zu betrachten. Eine exakte Angabe dieses Mehrverbrauchs ist nicht ohne weiteres möglich, da hierbei der jeweils zum Zeitpunkt der Regeneration aktuelle Betriebspunkt berücksichtigt werden müsste.

Hinsichtlich der Stufung des Luftverhältnisses bei der Regeneration ist zu berücksichtigen, daß im Fahrbetrieb ein Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb auch mit einer Änderung des Betriebspunktes verbunden ist. Bei den hier beschriebenen Stationäruntersuchungen war dies nicht der Fall. Wie aus Abb. 6-16 hervorgeht, nimmt der Reduktionsmittel-Massenstrom mit zunehmendem Mitteldruck zu. Bei $p_{me} = 4 \text{ bar}$ erhöht sich die CO-Emission beispielsweise gegenüber $p_{me} = 2 \text{ bar}$ um 58 %. Daher tritt eine entsprechende Verkürzung der Regenerationsdauer auf.

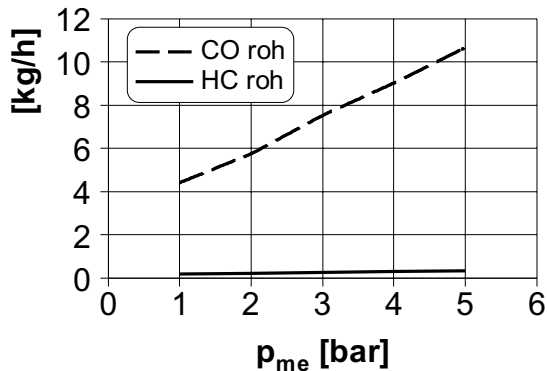


Abb. 6-16:
Einfluß der Motorlast auf das
Reduktionsmittelangebot
($n = 2000$ 1/min, $\lambda = 0.65$)

Bei den noch folgenden Fahrzeuguntersuchungen wird dieser Einfluß berücksichtigt, indem bei Regenerationen vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb gemäß Variante 6 die erste Phase der Regeneration von 60 auf 40 Arbeitsspiele verkürzt wird. Außerdem wird bei Varianten mit zusätzlicher dritter Regenerationsphase deren Dauer bei den Regenerationen vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb von 2 s auf 1 s reduziert. Hierdurch soll auf einfache Weise eine Anpassung an die jeweiligen Randbedingungen im Fahrbetrieb erfolgen.

Wird ausgehend von Magerbetrieb eine Vollast-Beschleunigung mit Anfettung durchgeführt, wäre eine Verkürzung der zunächst durchgeführten Regeneration denkbar, da der Betrieb mit Vollast-Anfettung gleichbedeutend mit einer Fortsetzung der Regeneration ist. Der Sonderfall einer Regeneration vor einer Vollast-Beschleunigung wurde jedoch nicht näher untersucht, da dieser Fall für den Abgastest nicht relevant ist.

6.4 Einfluß der Motorabstimmung

Nachfolgend wird untersucht, welche Einflüsse durch die gewählte Motorabstimmung auf das Katalysatorverhalten bei den Prüfstands- und Fahrzeuguntersuchungen gegeben sind. Hierdurch soll auch eine bessere Bewertung der Ergebnisse ermöglicht werden.

6.4.1 NO_x-Rohemission

Das Speicherverhalten eines NO_x-Speicher-Katalysators ist stark von der NO_x-Konzentration im Abgas während des Magerbetriebs abhängig (vgl. Abb. 3-1). Diese wird vor allem durch das Brennverfahren und die Abgasrückführrate bestimmt.

Um den Einfluß der NO_x-Rohemission näher zu untersuchen, wurden Untersuchungen im Betriebspunkt mit $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar mit einem gealterten Katalysator des Typs A durchgeführt. Durch Erhöhung der Abgasrückführrate von 12.5 % auf 20 % wurde die NO_x-Rohemission im Magerbetrieb von 70 g/h um 47 % auf 37 g/h reduziert. Wie Abb. 6-17 zeigt, führt eine Verringerung der NO_x-Rohemission zu einer längeren Adsorptionsdauer, wenn die Überschreitung einer NO_x-Emission von 2 mg/s nach NO_x-Speicher-Katalysator wie bei den bisherigen Untersuchungen als Kriterium für die Einleitung der Regeneration dient. Im hier betrachteten Fall wird bei um 47 % niedrigerer NO_x-

Rohemission eine um 80 % längere Adsorptionsdauer erreicht. Der Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Regenerationen wird hierdurch um 45 % verringert.

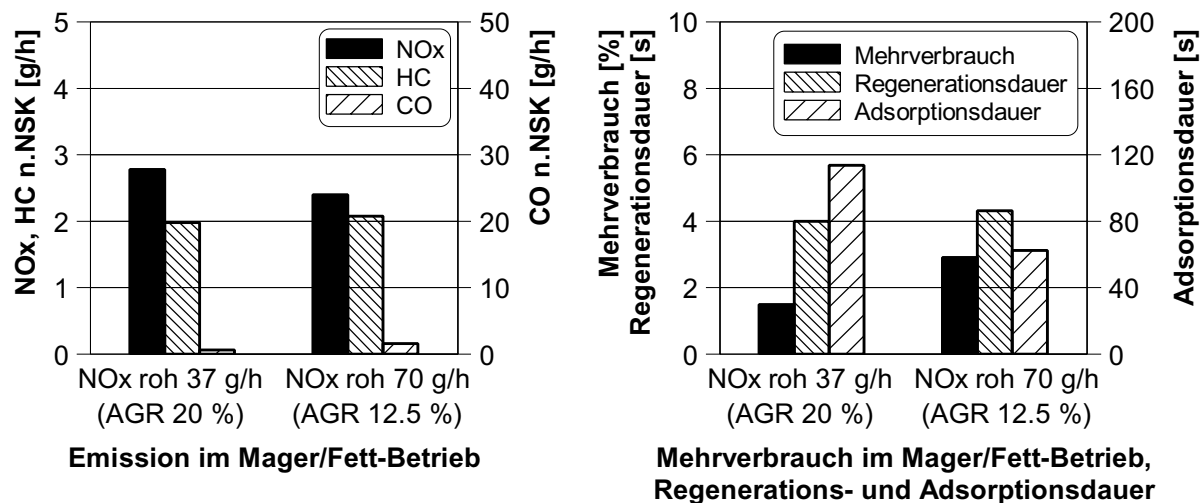


Abb. 6-17: Variation der NO_x-Rohemission im Magerbetrieb ($n = 2000 \text{ 1/min}$, $p_{me} = 2 \text{ bar}$, t_{Ads} geregelt mit NO_x max. 2 mg/s , t_{Reg} geregelt, λ gestuft gemäß Var.3, NSK Typ A gealtert)

Bemerkenswert ist, daß die über den Mager/Fett-Zyklus gemittelte NO_x-Emission nach Katalysator bei niedrigerer NO_x-Rohemission um 15 % höher ist als bei hoher NO_x-Rohemission. Ursache hierfür ist die langsamere Zunahme des NO_x-Schlupfes bis zum Erreichen des Kriteriums zur Beendigung der Adsorptionsphase. Hierdurch steigt der zeitliche Anteil des Betriebs mit nennenswertem NO_x-Schlupf während der Adsorptionsphase. Dieser Effekt könnte vermieden werden, wenn der NO_x-Schwellenwert als Kriterium zur Beendigung der Adsorptionsphase verringert würde.

Falls die Adsorptionsdauer für beide Varianten gleich gewählt wird, kehren sich die gerade beschriebenen Verhältnisse um. Bei einer Adsorptionsdauer von beispielsweise 40 s für beide Varianten ist die NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator bei niedrigerer NO_x-Rohemission wesentlich geringer, sie beträgt in diesem Fall nur 13 % der Emission nach Katalysator bei höherer NO_x-Rohemission. Je nach Strategie kann eine Absenkung der NO_x-Rohemission also primär zu einer Verringerung des Kraftstoffverbrauchs oder zu einer Verringerung der NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator führen. Der NO_x-Schwellenwert für die Beendigung der Adsorptionsphase ist hier entscheidend, ebenso die Häufigkeit des Wechsels zu $\lambda=1$ -Betrieb im instationären Fahrbetrieb.

Aus den Vorteilen einer niedrigen NO_x-Rohemission folgt der Wunsch nach einer Abstimmung des Versuchsmotors mit möglichst niedriger NO_x-Rohemission. Dies kann, wie geschildert, durch Realisierung einer möglichst hohen Abgasrückführrate erfolgen. Allerdings sind hierbei Grenzen gesetzt, da es bei zu hohen Rückführraten zu einer Verschlechterung der Verbrennung bis hin zu Entflammungsaussetzern kommen kann. Während im Stationärbetrieb eine Abgasrückführrate von 20 % durchaus möglich ist, treten beim Versuchsfahrzeug im instationären Fahrbetrieb teilweise Entflammungsaussetzer auf, wenn die Abgasrückführrate nicht schnell genug oder nicht ausreichend genau an den jeweiligen Betriebspunkt angepaßt wird.

Dies ist auch auf den nicht serienreifen Entwicklungs- und Applikationsstand von Motor und Motorsteuerung zurückzuführen. Ziel bei der Motorabstimmung war es, Entflammungsaussetzer zu vermeiden und somit möglichst reproduzierbare Ergebnisse im Abgastest zu erreichen. Daher wurde eine Motorabstimmung mit moderaten Abgasrückführaten realisiert.

Diese Motorabstimmung wurde auch bei den in Kap. 6.1 bis 6.3 dargestellten Stationäruntersuchungen verwendet. Wie aus den gerade beschriebenen Untersuchungen hervorgeht, hätte eine Motorabstimmung mit einer geringeren NO_x-Rohemission zu niedrigeren Werten für die NO_x-Emission beziehungsweise den Kraftstoff-Mehrverbrauch geführt. Ebenso sind die Voraussetzungen für die in Kap. 6.5 beschriebenen Fahrzeuguntersuchungen im Abgastest im Hinblick auf die NO_x-Emission und den Kraftstoffverbrauch als nicht optimal zu betrachten.

6.4.2 Betriebsbereich mit Magerbetrieb

Magerbetrieb wird beim Versuchsmotor ausschließlich durch Ladungsschichtung realisiert. Wie bereits in Kap 2.2.1 erläutert, ist der Betrieb mit Ladungsschichtung auf den Teillastbereich beschränkt. Ab Erreichen einer bestimmten Motorlast ist ein Wechsel zu homogenem $\lambda=1$ -Betrieb erforderlich. Diese gemischte Betriebsweise wird nachfolgend als Mager-Mix-Betrieb bezeichnet. Die Höhe der Motorlast, bei der mit Ladungsschichtung keine zufriedenstellende Verbrennung oder kein Verbrauchsvorteil gegenüber $\lambda=1$ -Betrieb mehr erzielt wird, ist vom Brennverfahren abhängig. Beim eingesetzten Versuchsmotor tritt mit Ladungsschichtung etwa ab einem Mitteldruck von $p_{me} = 4$ bar eine zunehmende Rußbildung auf. Ein Verbrauchsvorteil durch Ladungsschichtung ist bei $n = 2000$ 1/min auch bei einem Mitteldruck von $p_{me} = 5$ bar noch gegeben, während bei $n = 3000$ 1/min bereits etwa ab $p_{me} = 4$ bar kein Verbrauchsvorteil mehr erzielt wird (vgl. Abb. 5-1).

In der Motorsteuerung wird eine Schwelle für das von Motor geforderte Drehmoment vorgegeben, mit der die jeweils aktuelle Drehmomentforderung verglichen wird. Bei Überschreitung dieser Drehmoment-Schwelle wird von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb gewechselt. Bei den Fahrzeuguntersuchungen werden hierbei zwei verschiedene Schwellenwerte verwendet (Tab. 6-2). Um unerwünschtes Hin- und Herwechseln zwischen den beiden Betriebsarten zu vermeiden, ist die Umschaltschwelle in der Motorsteuerung mit einer Hysterese versehen. Diese entspricht in beiden Fällen etwa einer Mitteldruckänderung von $\Delta p_{me} = 1$ bar.

	Schwellenwert 1	Schwellenwert 2
Mitteldruck p_{me} [bar] bei Wechsel von $\lambda > 1$ zu $\lambda = 1$	ca. 4	ca. 5
Mitteldruck p_{me} [bar] bei Wechsel von $\lambda = 1$ zu $\lambda > 1$	ca. 3	ca. 4

Tab. 6-2: Drehmoment-Schwellenwerte für den Wechsel zwischen Magerbetrieb und $\lambda=1$ -Betrieb

In Abb. 6-18 ist der Einfluß des Drehmoment-Schwellenwertes auf den Fahrbetrieb im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) dargestellt. Hierbei werden Warmtests betrachtet, Kaltstart und Warmlaufphase sind also nicht berücksichtigt. Die schraffierten Flächen kennzeichnen die Phasen, in denen wegen zu hoher Drehmomentforderung Betrieb mit $\lambda = 1$ erforderlich ist. Man erkennt, daß bei Verwendung von Schwellenwert 1 insgesamt elf mal zu $\lambda=1$ -Betrieb gewechselt wird. Da bei Wechsel von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb stets eine Nitrat-Regeneration erforderlich ist, sind somit die Zeitpunkte von elf Regenerationen bereits festgelegt. Mit Schwellenwert 2 muß im NEFZ nur vier mal zu $\lambda=1$ -Betrieb gewechselt werden. Somit sind nur die Zeitpunkte von vier Nitrat-Regenerationen von vornherein festgelegt. Der erste Teil des NEFZ (City-Zyklus) wird mit Schwellenwert 2 komplett im Magerbetrieb gefahren. Im zweiten Teil (Extra Urban Driving Cycle, EUDC) sind die Phasen mit $\lambda=1$ -Betrieb kürzer als mit Schwellenwert 1, und die Konstantfahrt mit 100 km/h erfolgt hier im Magerbetrieb. Der zeitliche Anteil von Magerbetrieb beträgt mit Schwellenwert 1 85.0 %, mit Schwellenwert 2 liegt er bei 93.6 %.

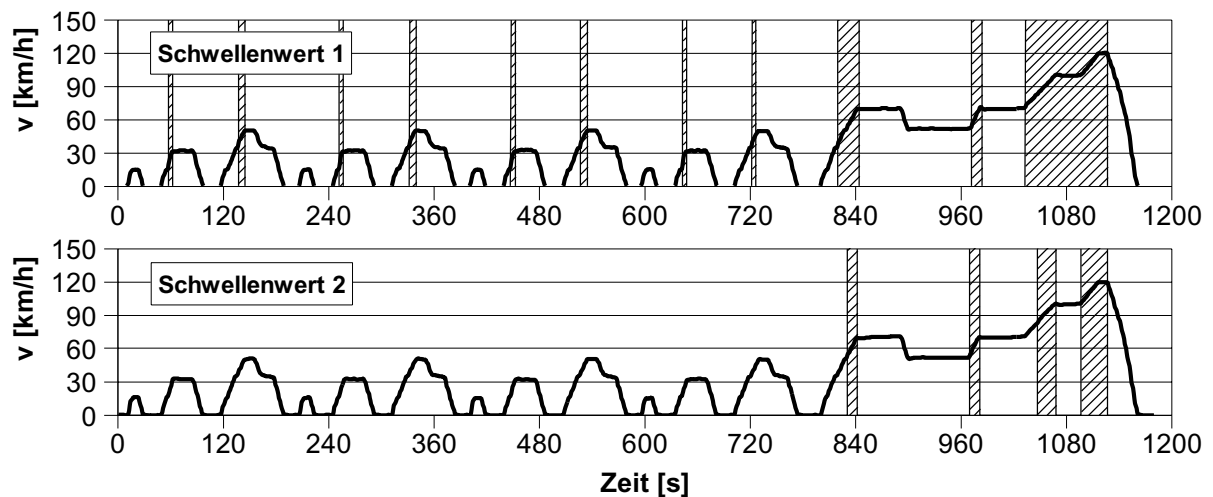


Abb. 6-18: Phasen mit $\lambda=1$ -Betrieb im NEFZ bei verschiedenen Drehmoment-Schwellenwerten für den Wechsel von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb

Der Verbrauchsunterschied zwischen Tests im NEFZ mit den beiden Drehmoment-Schwellenwerten ist nur gering. Dieser konnte meßtechnisch nicht zuverlässig ermittelt werden, da hierfür die statistische Auswertung einer sehr großen Anzahl von Tests erforderlich wäre. Ersatzweise soll nachfolgend eine theoretische Abschätzung des Verbrauchsvorteils erfolgen, der sich im NEFZ-Warmtest bei Verwendung von Schwellenwert 2 statt Schwellenwert 1 ergibt. Bei dieser Abschätzung werden keine Nitrat-Regenerationen berücksichtigt. Unterschiede zwischen den beiden Varianten ergeben sich in den Phasen, in denen der Motorbetrieb mit Schwellenwert 2 noch mager erfolgt, während mit Schwellenwert 1 bereits zu $\lambda=1$ -Betrieb gewechselt wurde. Die Mitteldrücke liegen hierbei unter der Berücksichtigung der Hysterese etwa zwischen $p_{me} = 3$ bar und $p_{me} = 5$ bar. Die Motordrehzahl beträgt in den betrachteten Phasen durchschnittlich etwa $n = 2000$ 1/min, lediglich in der letzten Phase des NEFZ liegt sie etwa bei $n = 2500$ 1/min. Die Abschätzung des Verbrauchsvorteils kann somit auf Basis von Stationäruntersuchungen mit dem Versuchsmotor bei $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 4$ bar erfolgen. In diesem Betriebspunkt wurde ein Verbrauchsvorteil für den Magerbetrieb von 7 % ermittelt (vgl. Abb. 5-1). Die

weiteren Rechenschritte sind Tab. 6-3 zu entnehmen. Gegenüber einem NEFZ-Warmtest mit Schwellenwert 1 ergibt sich mit Schwellenwert 2 ein Verbrauchsvorteil von 1.3 %.

Kraftstoffverbrauch bei $n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 4$ bar, $\lambda = 1$ (aus Stationäruntersuchungen) [g/h]	4440
Verbrauchsvorteil durch Magerbetrieb bei $n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 4$ bar (aus Stationäruntersuchungen) [g/h]	310
Differenz zwischen Dauer der Magerphasen im NEFZ mit Schwellenwert 1 und Schwellenwert 2 [s]	102
Verbrauchsvorteil durch Schwellenwert 2 im NEFZ [g]	8.8
Kraftstoffverbrauch im NEFZ-Warmtest, Mager-Mix, Schwellenwert 1, ohne Regeneration [l/100 km]	8.0
Kraftstoffdichte [g/cm ³]	0.742
Fahrstrecke im NEFZ (lt. Vorschrift) [km]	11.007
Kraftstoffverbrauch im NEFZ-Warmtest, Mager-Mix, Schwellenwert 1, ohne Regeneration [g]	653.4
Kraftstoffverbrauch im NEFZ-Warmtest, Mager-Mix, Schwellenwert 2, ohne Regeneration [g]	644.6
Verbrauchsvorteil im NEFZ-Warmtest mit Schwellenwert 2, ohne Regeneration [%]	1.3

Tab. 6-3: Verbrauchsvorteil im NEFZ-Warmtest bei vergrößertem Betriebsbereich mit Magerbetrieb (Drehmoment-Schwellenwert 2)

Je nach erzieltm Verbrauchsvorteil durch Magerbetrieb bei höherer Motorlast können sich mit anderen Motoren abweichende Werte ergeben. Im Fall eines Verbrauchsvorteils durch Magerbetrieb von bis zu 10 % bei $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 4$ bar, wie in der Literatur genannt (vgl. Kap. 2.2.2), wäre durch den Übergang von Drehmoment-Schwellenwert 1 auf Schwellenwert 2 im NEFZ-Warmtest eine Verringerung des Kraftstoffverbrauchs um bis zu 1.9 % zu erwarten.

6.5 Fahrzeugtests mit optimierter Strategie

Ziel der bisher beschriebenen Stationäruntersuchungen war es, grundlegende Zusammenhänge zu untersuchen und eine Vorauswahl geeigneter Varianten zur Regeneration zu treffen. Auf Basis der hieraus gewonnenen Erkenntnisse wurden mit dem Versuchsfahrzeug Abgastests auf dem Rollenprüfstand durchgeführt. Bei den Vorversuchen hat sich Variante 6 als vorteilhaft herausgestellt und wird daher schwerpunktmäßig betrachtet. Zusätzlich wird Variante 6a untersucht. Mit dieser Regenerationsvariante wurde eine besonders niedrige NO_x-Emission erreicht, wobei die HC- und CO-Emissionen hohe Werte erreicht haben. Durch Gegenüberstellung mit Variante 6 soll der Bereich verdeutlicht werden, in dem sich die Emissionen im NEFZ je nach Wahl der Regenerationsstrategie bewegen können.

Die beiden im NEFZ untersuchten Varianten für die Regeneration sind in den nachfolgenden Tabellen detailliert beschrieben. Die einzelnen Regenerationen werden in bis zu drei Phasen aufgeteilt. In Tab. 6-4 sind die verschiedenen Parameter für die Regeneration wegen zu hoher NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator dargestellt. Der Maximalwert für den NO_x-Massenstrom nach NO_x-Speicher-Katalysator beträgt hierbei für alle Varianten 2 mg/s. Tab. 6-5 und Tab. 6-6 zeigen die Parameter bei der Regeneration vor Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb. Hierbei werden die Parameter in Abhängigkeit der vorangegangenen Adsorptionsdauer gewählt.

Zwischen zwei Regenerationen wegen zu hoher NO_x-Emission nach Katalysator wird eine Mindest-Adsorptionsdauer von 10 s festgelegt.

Bezeichnung	Phase	Luftverhältnis	Dauer der Phase	bisherige Bezeichnung
NEFZ-Variante 1	1	$\lambda=0.65$	60 Arbeitsspiele	Variante 6
	2	$\lambda=0.75$	bis Signal binäre Sonde > 0.5 V	
NEFZ-Variante 2	1	$\lambda=0.65$	60 Arbeitsspiele	Variante 6a
	2	$\lambda=0.75$	bis Signal binäre Sonde > 0.5 V	
	3	$\lambda=0.90$	2 s	

Tab. 6-4: Parameter bei der Regeneration wegen zu hoher NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator (geregelte Adsorptionsdauer)

Bezeichnung	Phase	Luftverhältnis	Dauer der Phase	bisherige Bezeichnung
NEFZ-Variante 1	1	$\lambda=0.65$	40 Arbeitsspiele	Variante 6
	2	$\lambda=0.75$	bis Signal binäre Sonde > 0.5 V	
NEFZ-Variante 2	1	$\lambda=0.65$	40 Arbeitsspiele	Variante 6a
	2	$\lambda=0.75$	bis Signal binäre Sonde > 0.5 V	
	3	$\lambda=0.90$	1 s	

Tab. 6-5: Parameter bei der Regeneration vor $\lambda=1$ -Betrieb, Dauer der vorangegangenen Adsorptionsphase $t_{Ads} \geq 30$ s

Bezeichnung	Phase	Luftverhältnis	Dauer der Phase	bisherige Bezeichnung
NEFZ-Variante 1, NEFZ-Variante 2	1	$\lambda=0.75$	bis Signal binäre Sonde > 0.5 V	Variante 5

Tab. 6-6: Parameter bei der Regeneration vor $\lambda=1$ -Betrieb, Dauer der vorangegangenen Adsorptionsphase $t_{Ads} < 30$ s

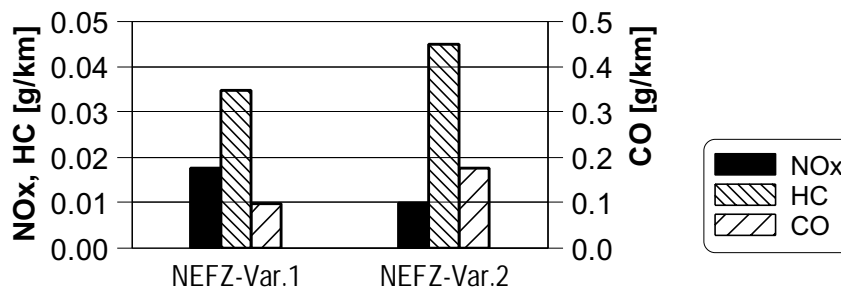
6.5.1 Warmtests im Neuen Europäischen Fahrzyklus

Die oben erläuterten Varianten zur Nitrat-Regeneration wurden mit dem Versuchsfahrzeug im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) untersucht. Hierbei wurden größtenteils Warmtests durchgeführt, bei denen Motor und Katalysator vor Teststart auf Betriebstemperatur gebracht wurden. In Kap. 6.5.2 werden jedoch auch Ergebnisse von Kalttests dargestellt.

6.5.1.1 Vergleich der verschiedenen Regenerationsstrategien

Abb. 6-19 zeigt die Ergebnisse mit den beiden betrachteten Regenerationsstrategien im NEFZ-Warmtest. Die jeweilige Anzahl der Regenerationen ist hierbei vergleichbar. Aus den Ergebnissen mit NEFZ-Variante 2 wird der Einfluß einer relativ langen Regenerationsdauer deutlich. Gegenüber NEFZ-Variante 1 ist die CO-Emission um 80 % und die HC-Emission um 30 % höher. Allerdings ist die NO_x-Emission wegen der gründlicheren Regenerationen um 43 % niedriger als bei NEFZ-Variante 1. In der Tendenz stimmen diese Ergebnisse mit den in Kap. 6.3.1 beschriebenen Ergebnissen der Stationäruntersuchungen überein.

Damit stellt NEFZ-Variante 2 eine hinsichtlich der NO_x-Emission günstige Variante dar. Betrachtet man jedoch auch die HC- und CO-Emissionen, ist NEFZ-Variante 1 deutlich günstiger. Hier nicht dargestellte weitere Untersuchungen im NEFZ-Warmtest haben gezeigt, daß mit NEFZ-Variante 1 von allen bei den Stationäruntersuchungen betrachteten Varianten die niedrigsten HC- und CO-Emissionen bei ebenfalls niedriger NO_x-Emission erreicht werden können. Damit stellt diese Variante den besten Kompromiß zur Emissionsminimierung dar.



Emissionen nach NSK, Mager-Mix, NEFZ-Warmtest

Abb. 6-19: Vergleich von Regenerationsstrategien im NEFZ-Warmtest (Drehmoment-Schwellenwert 1, NSK Typ A frisch)

In Abb. 6-20 ist der Verlauf des Luftverhältnisses im NEFZ-Warmtest mit Regenerationen gemäß NEFZ-Variante 1 dargestellt. Zusätzlich zeigt Abb. 6-20 eine schematische Darstellung des aktuellen Betriebszustands, wobei zwischen Magerbetrieb, $\lambda=1$ -Betrieb und Regenerationen mit $\lambda < 1$ unterschieden wird. Man erkennt insgesamt 16 Regenerationen, die zum Teil zeitlich sehr nahe beieinander liegen. 11 der 16 Regenerationen waren wegen des Wechsels zu $\lambda=1$ -Betrieb erforderlich, die restlichen fünf Regenerationen dagegen wegen zu hoher NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator.

Zum Vergleich sei darauf verwiesen, daß bei den in [4] beschriebenen Untersuchungen im NEFZ insgesamt 12 Regenerationen durchgeführt wurden. Hierbei wurde ebenfalls eine Regelung der Adsorptionsdauer mit Hilfe eines NO_x-Sensors eingesetzt.

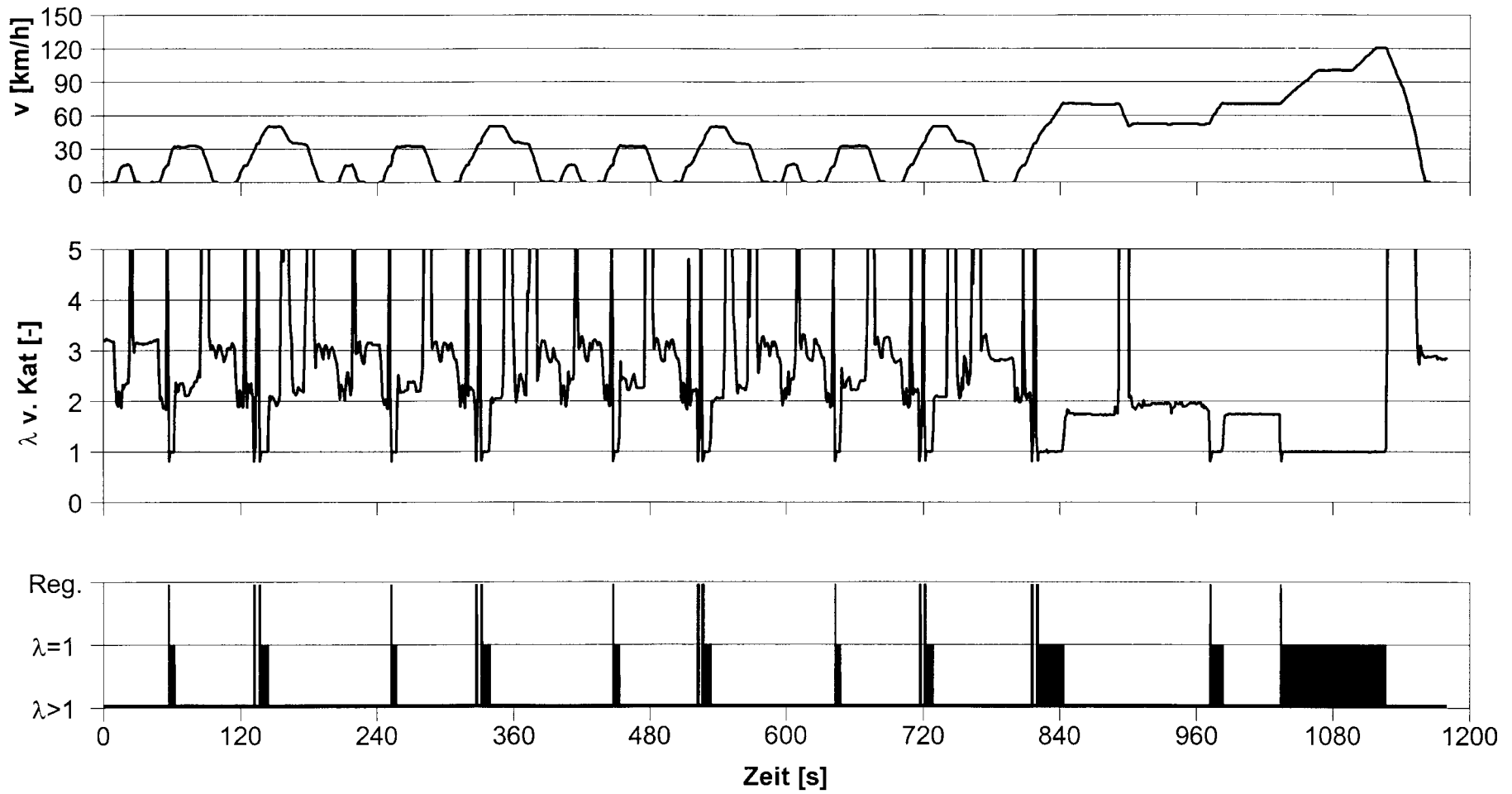


Abb. 6-20: Verlauf des Luftverhältnisses vor Startkatalysator und Betriebszustände im NEFZ-Warmtest (NEFZ-Variante 1, Drehmoment-Schwellenwert 1, NSK Typ A frisch)

6.5.1.2 Vergleich der verschiedenen Betriebsarten

Um die im Mager-Mix-Betrieb mit optimierter Regenerationsstrategie erreichten Emissionen bewerten zu können, soll an dieser Stelle ein Vergleich mit den Emissionen bei $\lambda=1$ -Betrieb und bei Magerbetrieb ohne Nitrat-Regenerationen erfolgen. In Abb. 6-21 sind Ergebnisse von NEFZ-Warmtests dargestellt. Die Rohemission der drei Komponenten NO_x, CO und HC ist bei Mager-Mix-Betrieb niedriger als bei $\lambda=1$ -Betrieb. Dies gilt insbesondere für die CO-Emission, die nur noch die Hälfte gegenüber der Emission bei $\lambda=1$ -Betrieb beträgt.

Nach NO_x-Speicher-Katalysator werden bei $\lambda=1$ -Betrieb im NEFZ-Warmtest sehr niedrige NO_x-, HC- und CO-Emissionen erreicht. Im Mager-Mix-Betrieb ohne Regenerationen tritt dagegen erwartungsgemäß eine hohe NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator auf. Eine noch höhere NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator bei Mager-Mix-Betrieb ohne Regenerationen wird dadurch vermieden, daß mehr als die Hälfte der gesamten NO_x-Rohemission in Phasen mit $\lambda = 1$ entsteht und daher mit der Drei-Wege-Funktion des NO_x-Speicher-Katalysators reduziert werden kann.

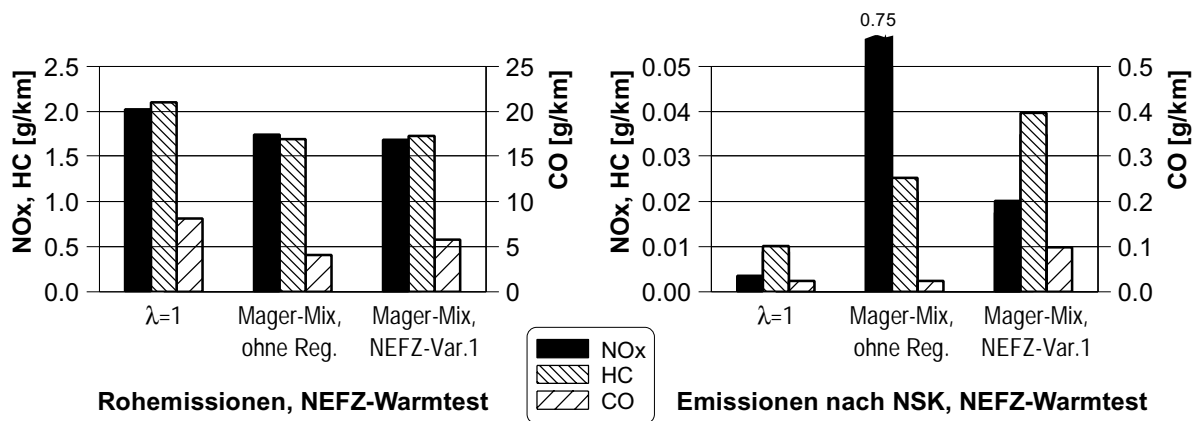


Abb. 6-21: Emissionen im NEFZ-Warmtest mit verschiedenen Betriebsarten (Mager-Mix mit Drehmoment-Schwellenwert 1, NSK Typ A frisch)

Bemerkenswert ist, daß bei Mager-Mix-Betrieb ohne Regenerationen die HC-Emission nach Katalysator höher ist als bei $\lambda=1$ -Betrieb, obwohl die HC-Rohemission niedriger ist und hier noch keine Regenerationen mit entsprechenden HC-Durchbrüchen durchgeführt werden. Bereits bei den in Kap. 6.3.1 beschriebenen Stationäruntersuchungen wurde festgestellt, daß die HC-Emission während der Adsorptionsphase in der gleichen Größenordnung liegt wie die aus Reduktionsmittel-Durchbrüchen resultierende HC-Emission. Über 70 % der gesamten HC-Emission im NEFZ stammen hierbei aus dem City-Zyklus. Vermutlich ist die schlechtere HC-Konversion auf die niedrigeren Katalysator-Temperaturen im City-Zyklus zurückzuführen. Wie Abb. 6-22 zeigt, ist die Temperatur im Startkatalysator im City-Zyklus des NEFZ um durchschnittlich etwa 150 K niedriger als bei $\lambda=1$ -Betrieb. Im NO_x-Speicher-Katalysator ist die Differenz mit etwa 30 K deutlich geringer. Die dargestellten Temperaturen stellen hierbei jeweils die Mittelwerte der Messungen an den verschiedenen Meßstellen in den Katalysatoren dar.

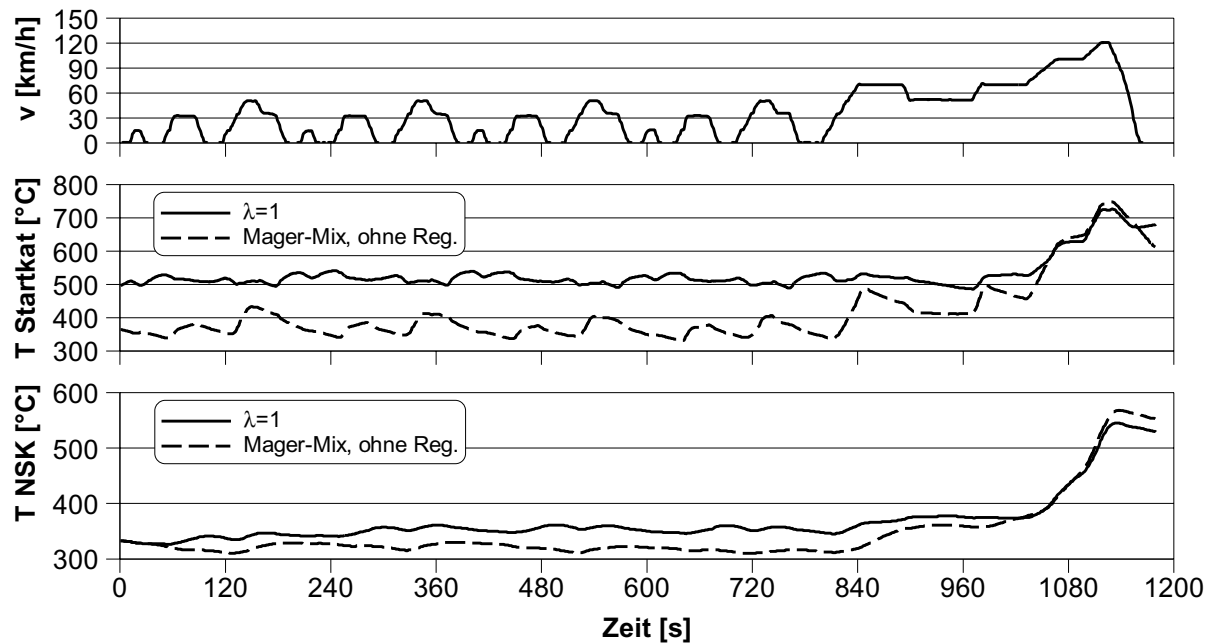


Abb. 6-22: Katalysator-Temperaturen im NEFZ-Warmtest (Mager-Mix mit Drehmoment-Schwellenwert 1, NSK Typ A frisch)

Die HC-Konversion wird außerdem möglicherweise dadurch erschwert, daß bei Betrieb mit Ladungsschichtung im Vergleich zu $\lambda=1$ -Betrieb eine höhere Methan-Rohemission auftritt. Dieses Verhalten wurde in [55] für einen Ottomotor mit Direkteinspritzung und strahlgeführten Brennvorgängen festgestellt. Methan ist ein sehr stabiles Crackprodukt der motorischen Verbrennung von Kohlenwasserstoffen und wird erst bei deutlich höheren Katalysator-Temperaturen oxidiert als längerkettige Kohlenwasserstoffe [46, 67, 116]. Möglicherweise reichen die im Magerbetrieb erreichten Katalysator-Temperaturen für die Oxidation von Methan nicht aus. Eine differenzierte Analyse der emittierten Kohlenwasserstoffe zur Klärung dieses Einflusses wurde allerdings nicht durchgeführt.

Wie in Abb. 6-21 zu erkennen, ist die NO_x-Emission nach Katalysator mit Mager-Mix-Betrieb und Regenerationen gemäß NEFZ-Variante 1 deutlich höher als bei $\lambda=1$ -Betrieb. Hierbei stammen etwa 70 % der NO_x-Emission aus dem EUDC. Die NO_x-Emission nach Katalysator beträgt jedoch auch in diesem Fall insgesamt nur 0.018 g/km. Dies bedeutet eine Minderung gegenüber der NO_x-Rohemission um 99 %.

Weiterhin geht aus Abb. 6-21 hervor, daß die HC-Emission nach Katalysator bei Mager-Mix-Betrieb mit Regenerationen gemäß NEFZ-Variante 1 nochmals zunimmt und damit um 70 % höher ist als bei Mager-Mix-Betrieb ohne Regenerationen. Gleichzeitig erhöht sich die CO-Emission nach Katalysator sogar auf das Vierfache. Diese Zunahme der HC- und CO-Emissionen wird durch die Reduktionsmittel-Durchbrüche bei den Regenerationen hervorgerufen. Auch mit der als optimiert zu betrachtenden Regenerationsstrategie treten also Reduktionsmittel-Durchbrüche auf.

6.5.1.3 Analyse einzelner Nitrat-Regenerationen im NEFZ-Warmtest

Um die Ursache für die erwähnten Reduktionsmittel-Durchbrüche zu klären, wird nachfolgend ein Ausschnitt aus dem NEFZ mit Regenerationen gemäß NEFZ-Variante 1 näher untersucht. Dieser in Abb. 6-23 dargestellte Ausschnitt umfaßt das letzte Viertel des City-Zyklus und etwa die erste Hälfte des EUDC. In diesem Zeitraum erfolgen insgesamt sechs Regenerationen, die in der Abbildung fortlaufend numeriert sind. Die Beschleunigung auf 32 km/h im City-Zyklus erfordert einen Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb und somit zuvor eine Regeneration. Diese Regeneration 1 findet etwa bei $n = 1500$ 1/min statt und verursacht nur minimale Durchbrüche von NO_x, CO und HC. Die Beschleunigung auf 50 km/h erfolgt zunächst noch im Magerbetrieb, wobei der NO_x-Schlupf zunimmt und der maximal zugelassene NO_x-Massenstrom nach NO_x-Speicher-Katalysator erreicht wird. Daher wird Regeneration 2 durchgeführt, die zu deutlichen HC- und CO-Durchbrüchen führt. Hierbei liegt die Motordrehzahl bei etwa 2200 1/min. Ungünstigerweise wird kurz nach Rückkehr zu Magerbetrieb die Schwelle für den Übergang zu $\lambda=1$ -Betrieb erreicht, so daß eine erneute Regeneration erfolgt. Trotz der hier nur 2.7 s langen Adsorptionsdauer und der damit nur sehr geringen gespeicherten NO_x-Masse fällt der Reduktionsmittel-Durchbruch bei dieser Regeneration 3 deutlich geringer aus als bei der vorangegangenen Regeneration. Die Motordrehzahl beträgt zum Zeitpunkt der Regeneration etwa 1700 1/min. Der hier vorliegende Fall von zwei dicht aufeinander folgenden Regenerationen ist hinsichtlich der Emissionen also nicht so nachteilig wie zunächst zu erwarten. Dagegen ist dieser Fall im Hinblick auf den Kraftstoffverbrauch jedoch als ungünstig anzusehen.

Zu Beginn des EUDC verläuft die Fahrkurve zunächst wie bei der Beschleunigung auf 50 km/h im City-Zyklus. Daher werden auch hier in geringem Abstand zwei Regenerationen durchgeführt. Die Reduktionsmittel-Durchbrüche sind hierbei ähnlich wie bei den Regenerationen 2 und 3. Während der Konstantfahrt im Magerbetrieb mit 70 km/h bzw. 50 km/h nimmt der NO_x-Schlupf langsam zu. Bevor jedoch der maximal zulässige Wert für die NO_x-Emission nach Katalysator erreicht wird, erfolgt wieder ein Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb mit vorangehender Regeneration. Bei dieser Regeneration 6, die etwa bei $n = 1800$ 1/min erfolgt, sind die HC- und CO-Durchbrüche niedrig. Wegen der höheren gespeicherten NO_x-Masse tritt hier ein höherer NO_x-Durchbruch auf als bei den vorangegangenen Regenerationen.

Die Untersuchung zeigt, daß die Höhe des Reduktionsmittel-Durchbruchs offensichtlich von der Motordrehzahl zum Zeitpunkt der Regeneration abhängt. Bei niedrigen Drehzahlen zwischen $n = 1500$ 1/min und $n = 1700$ 1/min werden sehr geringe Reduktionsmittel-Durchbrüche erzielt. Die höheren Durchbrüche bei einer Motordrehzahl von $n = 2200$ 1/min weisen darauf hin, daß in diesem Drehzahlbereich etwas zu lange regeneriert wird. Wie aus Kap. 6.2.2 hervorgeht, ist jedoch mit den hier betrachteten Lambdasonden eine Verkürzung der Regenerationsdauer nicht realisierbar. Um eine Verbesserung zu erzielen, wäre der zusätzliche Einsatz eines rechnerischen Katalysatormodells vorteilhaft, mit dessen Hilfe Regenerationen bei höheren Motordrehzahlen bereits vor Ansprechen der Lambdasonden beendet werden könnten. Die Realisierung eines entsprechenden Modells war im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht möglich. In diesem Punkt besteht also noch weiterer Forschungsbedarf.

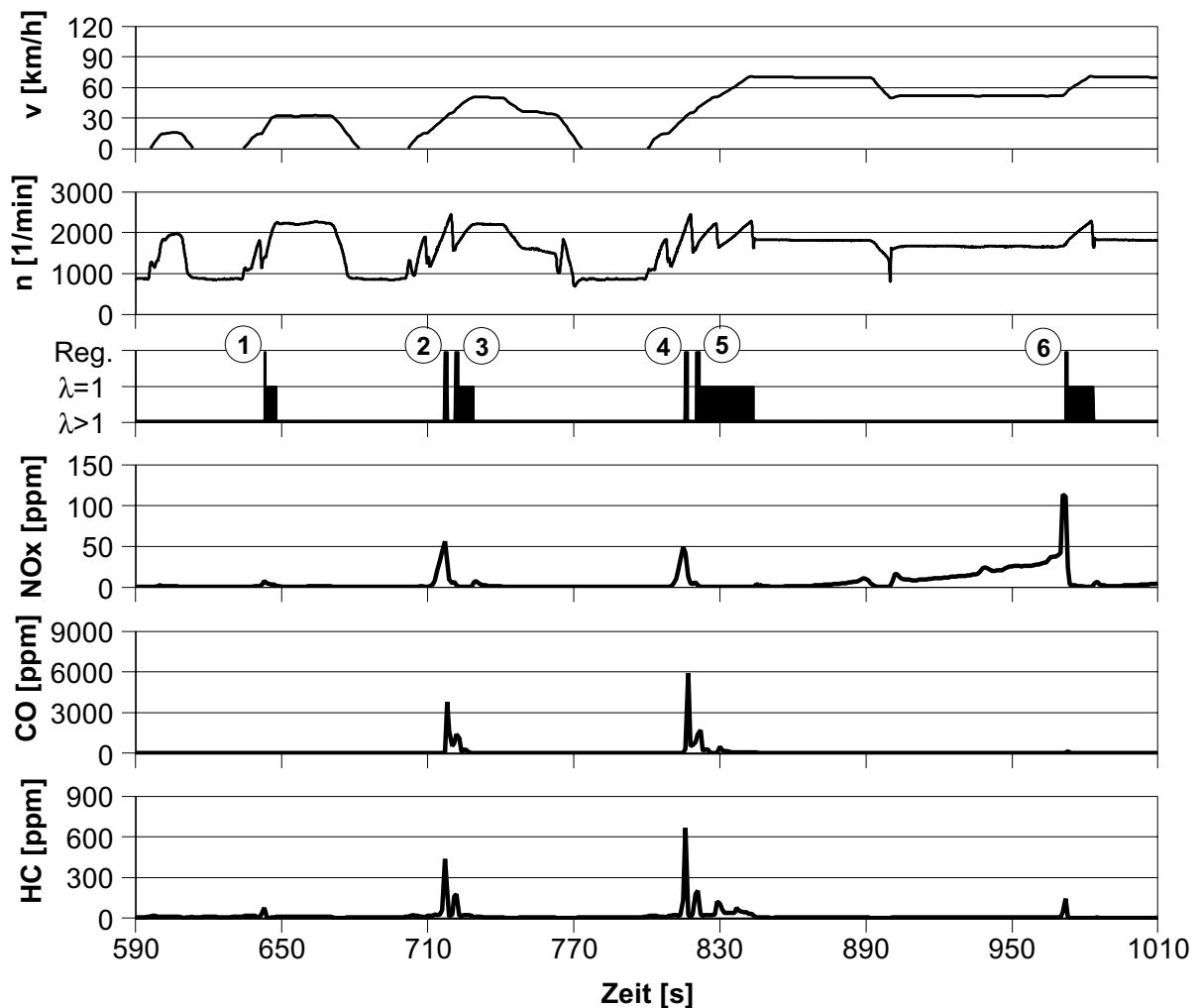


Abb. 6-23: Betriebszustände und Emissionen nach NO_x-Speicher-Katalysator in einem Ausschnitt des NEFZ (NEFZ-Variante 1, Drehmoment-Schwellenwert 1, NSK Typ A frisch)

6.5.1.4 Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Nitrat-Regenerationen im NEFZ-Warmtest

Nachfolgend soll der Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Nitrat-Regenerationen im NEFZ-Warmtest mit Drehmoment-Schwellenwert 1 und der als optimal zu betrachtenden Regenerationsstrategie NEFZ-Variante 1 ermittelt werden. Eine zuverlässige experimentelle Bestimmung des Mehrverbrauchs war nicht möglich, da wegen der relativ geringen Verbrauchszunahme die statistische Auswertung einer großen Anzahl von Tests erforderlich wäre. Daher soll eine Abschätzung des Mehrverbrauchs erfolgen, basierend auf den Ergebnissen von Stationäruntersuchungen, Tests im NEFZ und theoretischen Überlegungen.

Nach [68] kann die zur Regeneration benötigte Kraftstoffmenge abgeschätzt werden, wenn eine optimale Nutzung der angebotenen Reduktionsmittel angenommen werden kann. Aus den vorangegangenen Stationäruntersuchungen (Kap. 6.2.2) ist bekannt, daß bei Regelung der Regenerationsdauer mit einer binären Lambdasonde Werte nahe der optimalen Regenerationsdauer realisiert werden. Somit ist die oben genannte Voraussetzung einer optimalen Nutzung der Reduktionsmittel näherungsweise erfüllt.

In [68] erfolgt eine Abschätzung des Mehrverbrauchs auf Basis der Kraftstoffmasse, die zur Umsetzung des in den Katalysatoren gespeicherten Sauerstoffs und der im NO_x-Speicher-Katalysator gespeicherten Stickoxide benötigt wird. Zusätzlich soll hier berücksichtigt werden, daß auch die Unterbrechung des kraftstoffsparenden Magerbetriebs bei den Regenerationen wegen zu hoher NO_x-Emission nach Katalysator zu einem weiteren Mehrverbrauch führt.

Kraftstoff-Mehrverbrauch für die Umsetzung des in den Katalysatoren gespeicherten Sauerstoffs

Aus Abb. 6-3 geht hervor, daß bei einem frischen NO_x-Speicher-Katalysator des Typs A in Kombination mit einem Startkatalysator bei $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar eine Regenerationsdauer von ca. 1.7 s erforderlich ist, um bei einer Regeneration mit $\lambda_{Reg} = 0.65$ den in den Katalysatoren gespeicherten Sauerstoff umzusetzen. Hieraus ergibt sich gegenüber einem Betrieb mit $\lambda = 1$ ein Kraftstoff-Mehrverbrauch von 0.751 g. Dieser Mehrverbrauch muß im NEFZ-Warmtest 16 mal aufgebracht werden. Die einzelnen Rechenschritte sind in Tab. 6-7 angegeben.

Dauer zur Umsetzung des gespeicherten Sauerstoffs bei $n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, Regeneration mit $\lambda = 0.65$ (aus Stationäruntersuchungen) [s]	1.7
Kraftstoffverbrauch bei $n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, $\lambda = 0.65$ (aus Stationäruntersuchungen) [g/h]	4500
Kraftstoffverbrauch bei $n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, $\lambda = 1$ (aus Stationäruntersuchungen) [g/h]	2910
Kraftstoff-Mehrverbrauch für die Umsetzung des gespeicherten Sauerstoffs bei der Regeneration (aus Stationäruntersuchungen) [g]	0.751
Anzahl Regenerationen im NEFZ-Warmtest [-]	16
Kraftstoff-Mehrverbrauch für die Umsetzung des gespeicherten Sauerstoffs im NEFZ-Warmtest [g/Test]	12.01

Tab. 6-7: Kraftstoff-Mehrverbrauch im NEFZ-Warmtest für die Umsetzung des gespeicherten Sauerstoffs bei den Nitrat-Regenerationen (NSK Typ A frisch, Drehmoment-Schwellenwert 1)

Kraftstoff-Mehrverbrauch für die Umsetzung der gespeicherten Stickoxide

Aus den in Kap. 6.1 beschriebenen Stationäruntersuchungen bei $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar sind die NO_x-Massenströme vor und nach NO_x-Speicher-Katalysator bekannt. Hieraus kann die in der Adsorptionsphase gespeicherte NO_x-Masse errechnet werden. Bei $\lambda_{Reg} = 0.65$ und einer Adsorptionsdauer von 80 s beträgt die optimale Regenerationsdauer 3 s. Durch Subtraktion der für die Umsetzung des gespeicherten Sauerstoffs benötigten Dauer von 1.7 s (vgl. Tab. 6-7) ergibt sich die Dauer für die Umsetzung der gespeicherten Stickoxide. Unter Verwendung von bereits in Tab. 6-7 genannten Werten ergibt sich ein Kraftstoff-Mehrverbrauch bezogen auf die gespeicherte NO_x-Masse von 0.375 g Kraftstoff / g NO_x. Die in den Magerphasen des NEFZ-Warmtests gespeicherte NO_x-Masse wurde durch Auswertung mehrerer NEFZ-Warmtests ermittelt. Für die Umsetzung der im gesamten NEFZ-Warmtest gespeicherten Stickoxide ergibt sich somit ein zusätzlicher Kraftstoffverbrauch von 2.38 g (Tab. 6-8).

gespeicherte Stickoxide während einer Adsorptionsphase von 80 s bei $n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar (aus Stationäruntersuchungen) [g]	1.531
Dauer zur Umsetzung der gespeicherten Stickoxide bei $n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, Regeneration mit $\lambda = 0.65$ (aus Stationäruntersuchungen) [s]	1.3
Kraftstoff-Mehrverbrauch für die Umsetzung der gespeicherten Stickoxide bei der Regeneration (aus Stationäruntersuchungen) [g]	0.574
spezifischer Kraftstoff-Mehrverbrauch für die Umsetzung der gespeicherten Stickoxide [g Kraftstoff / g NO _x]	0.375
gespeicherte Stickoxide in den Magerphasen des NEFZ-Warmtests (aus NEFZ-Warmtests) [g/Test]	6.35
Kraftstoff-Mehrverbrauch für die Umsetzung der gespeicherten Stickoxide im NEFZ-Warmtest [g/Test]	2.38

Tab. 6-8: Kraftstoff-Mehrverbrauch im NEFZ-Warmtest für die Umsetzung der gespeicherten Stickoxide bei den Nitrat-Regenerationen (NSK Typ A frisch, Drehmoment-Schwellenwert 1)

Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Verzicht auf Magerbetrieb

Die bisher ermittelten Werte stellen den Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Regenerationen gegenüber $\lambda=1$ -Betrieb dar. Hier wird nun berücksichtigt, daß teilweise für die Dauer der Regenerationen auf Magerbetrieb verzichtet werden muß, was wiederum zu einem Kraftstoff-Mehrverbrauch führt. Dies ist bei insgesamt fünf Regenerationen wegen zu hoher NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator der Fall. Die restlichen elf der 16 Regenerationen werden vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb durchgeführt. In diesen Fällen tritt kein zusätzlicher Mehrverbrauch auf, da infolge der hohen Drehmomentforderung ohnehin Motorbetrieb mit $\lambda = 1$ erforderlich wäre. Die Regenerationen wegen zu hoher NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator finden, wie in Abb. 6-23 zu erkennen, bei einer Motordrehzahl von etwa $n = 2000$ 1/min statt. Der Mitteldruck p_{me} liegt unter 4 bar, da andernfalls ein Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb erfolgen würde. Aus Abb. 5-1 ist zu entnehmen, daß im Betriebspunkt mit $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 3.5$ bar ein Verbrauchsvorteil durch Magerbetrieb von etwa 10 % erreicht wird. Unter der Annahme, daß die betrachteten Regenerationen näherungsweise in diesem Betriebspunkt stattfinden, kann nun ein Mehrverbrauch durch den Verzicht auf Magerbetrieb angegeben werden. Dieser beträgt für die betrachteten fünf Regenerationen insgesamt 0.93 g (Tab. 6-9).

Verbrauchsvorteil durch Magerbetrieb bei $n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 3.5$ bar (aus Stationäruntersuchungen) [%]	10
Kraftstoffverbrauch in diesem Betriebspunkt bei $\lambda = 1$ (aus Stationäruntersuchungen) [g/h]	4070
Mehrverbrauch in diesem Betriebspunkt bei $\lambda = 1$ gegenüber Magerbetrieb [g/h]	407
gesamte Dauer der Regenerationen wegen zu hoher NO _x -Emission nach NO _x -Speicher-Katalysator im NEFZ-Warmtest [s]	8.2
Kraftstoff-Mehrverbrauch durch den Verzicht auf Magerbetrieb bei den Regenerationen im NEFZ-Warmtest [g/Test]	0.93

Tab. 6-9: Kraftstoff-Mehrverbrauch im NEFZ-Warmtest durch den Verzicht auf Magerbetrieb bei den Nitrat-Regenerationen (NSK Typ A frisch, Drehmoment-Schwellenwert 1)

Gesamter Kraftstoff-Mehrverbrauch im NEFZ-Warmtest

In Tab. 6-10 erfolgt die Addition der oben berechneten Werte für den Kraftstoff-Mehrverbrauch bei den Nitrat-Regenerationen mit dem Kraftstoffverbrauch im NEFZ-Warmtest ohne Regenerationen. Insgesamt ergibt die Abschätzung einen Mehrverbrauch durch die Nitrat-Regenerationen von 2.3 %. Randbedingungen sind hierbei, wie oben bereits genannt, der Einsatz von NEFZ-Variante 1 und die Wahl des Drehmoment-Schwellenwertes 1 für den lastbedingten Wechsel von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb.

Kraftstoffverbrauch im NEFZ-Warmtest, Mager-Mix, ohne Regenerationen [g/Test] (aus Tab. 5-2)	653.4
Kraftstoff-Mehrverbrauch für die Umsetzung des gespeicherten Sauerstoffs im NEFZ-Warmtest [g/Test]	12.01
Kraftstoff-Mehrverbrauch für die Umsetzung der gespeicherten Stickoxide im NEFZ-Warmtest [g/Test]	2.38
Kraftstoff-Mehrverbrauch durch den Verzicht auf Magerbetrieb bei den Regenerationen im NEFZ-Warmtest [g/Test]	0.93
gesamter Kraftstoffverbrauch im NEFZ-Warmtest, Mager-Mix, mit Regenerationen [g/Test]	668.7
Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Regenerationen im NEFZ-Warmtest [%]	2.3

Tab. 6-10: Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Nitrat-Regenerationen im NEFZ-Warmtest (NSK Typ A frisch, Drehmoment-Schwellenwert 1)

Der Mehrverbrauch für die Umsetzung des in den Katalysatoren gespeicherten Sauerstoffs beträgt hierbei 1.8 % und stellt somit den mit Abstand größten Beitrag zum gesamten Kraftstoff-Mehrverbrauch dar. Der Wert ist deshalb so hoch, weil ein NO_x-Speicher-Katalysator mit relativ hoher O₂-Speicherfähigkeit betrachtet wird. Beispielsweise bei einer um 50 % geringeren O₂-Speicherfähigkeit würde der gesamte Mehrverbrauch durch die Nitrat-Regenerationen nur 1.4 % betragen.

6.5.1.5 Untersuchungen bei vergrößertem Betriebsbereich mit Magerbetrieb

In Kap. 6.4.2 wurde der Einfluß der Drehmoment-Schwellenwerte für den Wechsel von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb auf das Verhalten im NEFZ erläutert. Die in den vorangegangenen Kapiteln dargestellten Ergebnisse wurden ausschließlich mit Schwellenwert 1 erzielt. Hier soll nun eine Gegenüberstellung mit Ergebnissen erfolgen, die aus Untersuchungen mit dem höheren Schwellenwert 2 hervorgehen. Durch Einsatz von Schwellenwert 2 verringert sich die Anzahl der Regenerationen, deren Zeitpunkt durch den Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb vorgegeben werden, von elf auf vier.

In Abb. 6-24 sind die Regenerationen und $\lambda=1$ -Phasen dargestellt, die sich im letzten Viertel des City-Zyklus und im EUDC ergeben. Während im City-Zyklus die Anzahl der Regenerationen bei den gegenübergestellten Varianten gleich ist, ist sie im EUDC mit Schwellenwert 2 deutlich höher. Im gesamten NEFZ werden mit Schwellenwert 2 21 Regenerationen durchgeführt. Dies sind fünf Regenerationen mehr als mit Schwellenwert 1, obwohl wesentlich weniger Regenerations-Zeitpunkte durch $\lambda=1$ -Phasen fest vorgegeben sind. Die Ursache hierfür liegt in den zusätzlichen Phasen mit Magerbetrieb und relativ hoher Motorlast, in denen jeweils

eine erhöhte NO_x-Rohemission vorliegt und somit häufiger Regenerationen erforderlich sind.

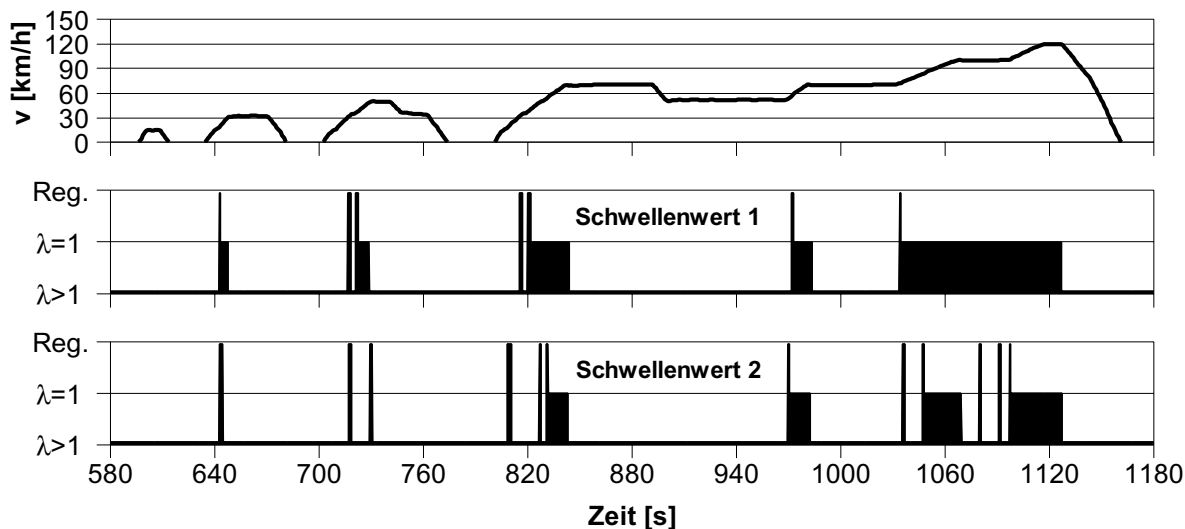


Abb. 6-24: Betriebszustände im NEFZ mit verschiedenen Drehmoment-Schwellenwerten (NEFZ-Variante 1, NSK Typ A frisch)

Wie aus Abb. 6-25 hervorgeht, ist die NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator sowohl im City-Zyklus als auch im EUDC mit Drehmoment-Schwellenwert 2 deutlich höher als mit Schwellenwert 1. Dies ist auf die hohe NO_x-Rohemission in den zusätzlichen Magerphasen zurückzuführen. Auch die HC- und CO-Emissionen sind höher als mit Schwellenwert 1. Wesentliche Ursachen hierfür sind zum einen die höhere Anzahl von Regenerationen im EUDC, zum anderen die zum Teil höhere Motordrehzahl bei den Regenerationen. In Kap. 6.6.2.3 wurde bereits festgestellt, daß bei Regelung der Regenerationsdauer mit einer binären Lambdasonde bei zunehmender Motordrehzahl höhere Reduktionsmittel-Durchbrüche auftreten. Durch Vergrößerung des Betriebsbereich mit Magerbetrieb ergibt sich im NEFZ-Warmtest also eine deutliche Verschlechterung der Emissionen, insbesondere der NO_x-Emission.

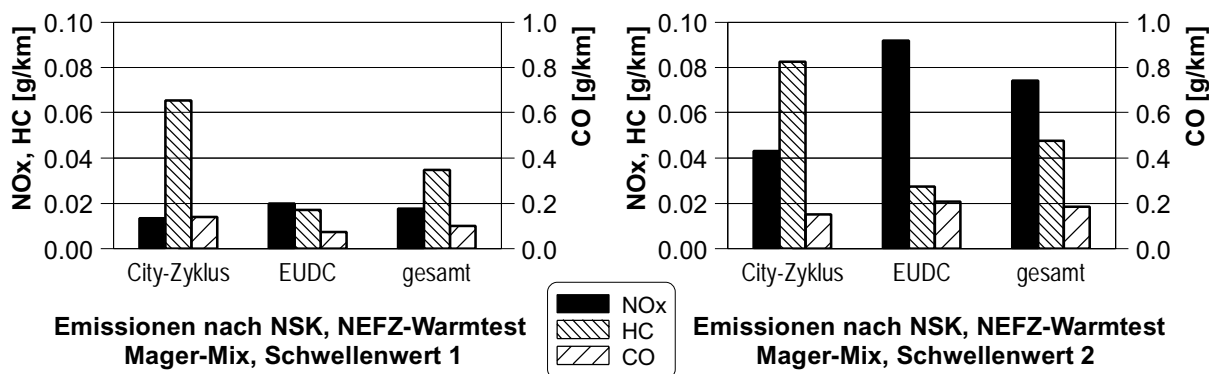


Abb. 6-25: Emissionen im NEFZ-Warmtest mit verschiedenen Drehmoment-Schwellenwerten (NEFZ-Variante 1, NSK Typ A frisch)

Nach Kap. 6.4.2 ergibt sich durch Wahl von Drehmoment-Schwellenwert 2 statt Schwellenwert 1 im NEFZ-Warmtest ohne Regenerationen ein Verbrauchsvorteil von 1.3 %. Um den Mehrverbrauch durch die Regenerationen bei Einsatz von

Schwellenwert 2 zu ermitteln, wurde eine Abschätzung analog zu der in Kap. 6.5.1.4 beschriebenen Vorgehensweise durchgeführt. Aus dieser Abschätzung ergibt sich bei vergrößertem Betriebsbereich für Magerbetrieb ein Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Regenerationen von 3.2 % statt 2.3 % bei Schwellenwert 1. Hierdurch wird der Vorteil, der sich für Schwellenwert 2 gegenüber Schwellenwert 1 ergibt, auf nur noch 0.4 % reduziert. Verglichen mit diesem geringen Verbrauchsvorteil überwiegen die Nachteile hinsichtlich der Emissionen eindeutig, so daß beim betrachteten Versuchsfahrzeug ein kleinerer Betriebsbereich mit Magerbetrieb zu bevorzugen ist.

Die hier getroffenen Feststellungen sind im Zusammenhang mit den gegebenen Randbedingungen zu betrachten. Mit einer Motorabstimmung mit niedriger NO_x-Rohemission auch bei erhöhter Motorlast wäre vermutlich ein besseres Ergebnis im Hinblick auf Emissionen und Kraftstoffverbrauch zu erzielen. Weitere geeignete Maßnahmen zur Verbesserung der Emissionen wären eine Erhöhung der spezifischen Speicherfähigkeit des NO_x-Speicher-Katalysators oder eine Vergrößerung des Katalysatorvolumens. Hierdurch wäre eine Verringerung des NO_x-Schlupfes zu erwarten, möglicherweise wären außerdem weniger Regenerationen erforderlich.

6.5.2 Kalttests im Neuen Europäischen Fahrzyklus

In den vorangegangenen Kapiteln wurde eine Strategie für den Mager-Mix-Betrieb im NEFZ entwickelt, die niedrige Emissionen und zugleich einen geringen Kraftstoffverbrauch ermöglicht. Diese beinhaltet Regenerationen gemäß NEFZ-Variante 1 und die Wahl des niedrigen Drehmoment-Schwellenwertes 1 für den lastbedingten Wechsel von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb. Für eine abschließende Bewertung dieser Strategie hinsichtlich der Einhaltung zukünftiger Abgasgrenzwerte wurden auch NEFZ-Kalttests durchgeführt. Bei diesen Kalttests wird der Motor nach dem Start zunächst homogen mit $\lambda = 1$ betrieben, bis der NO_x-Speicher-Katalysator seine Betriebstemperatur erreicht hat. Während dieser Warmlaufphase wird der Zündzeitpunkt zunächst stark in Richtung spät verschoben, um eine schnelle Aufheizung der Katalysatoren zu realisieren. Etwa 145 s nach Motorstart wird zu Magerbetrieb mit Ladungsschichtung gewechselt. Zu diesem Zeitpunkt beträgt die Temperatur in der Mitte des NO_x-Speicher-Katalysators etwa 300 °C.

Es ist hervorzuheben, daß die Kalttests nicht Schwerpunkt der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind. Daher wurde die Start- und Warmlaufphase nicht weiter optimiert.

In Abb. 6-26 sind Ergebnisse bei Mager-Mix-Betrieb mit NEFZ-Variante 1 dargestellt. Im Kalttest ergibt sich im Vergleich zum Warmtest eine Zunahme der NO_x-Emission um etwa 0.02 g/km, der HC-Emission um etwa 0.1 g/km und der CO-Emission um 0.5 g/km. Die erzielten Emissionswerte sind den Abgasgrenzwerten der Emissionsstufe EU4 gegenübergestellt. Beim Kalttest wird der EU4-Grenzwert für NO_x trotz der eher hohen NO_x-Rohemission von 1.7 g/km um 55 % und damit deutlich unterschritten. Auch der CO-Grenzwert wird deutlich unterschritten. Problematisch ist dagegen die HC-Emission: Der EU4-Grenzwert wird nicht erreicht. In diesem Zusammenhang sei angemerkt, daß unter den gleichen Randbedingungen auch mit $\lambda=1$ -Betrieb der EU4-Grenzwert für HC nicht erreicht werden kann.

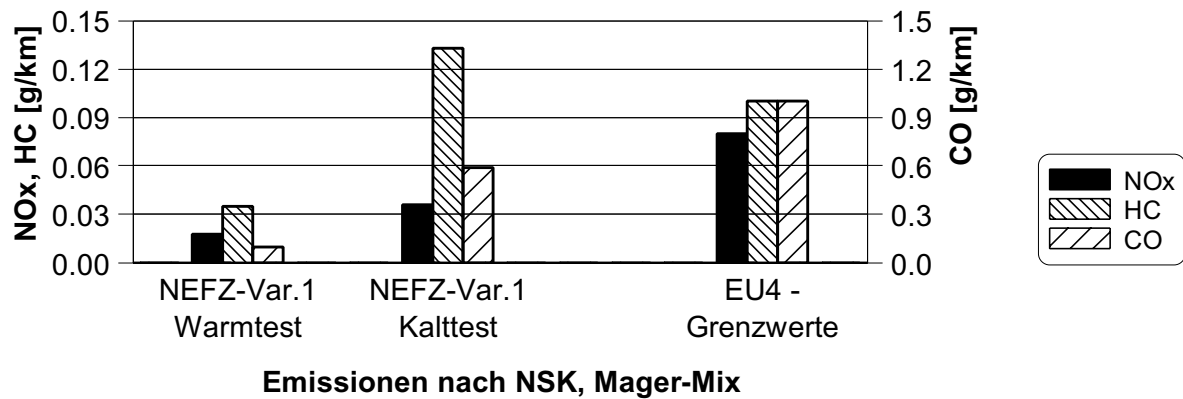


Abb. 6-26: Emissionen im NEFZ-Kalttest im Vergleich zum Warmtest und zu EU4-Grenzwerten (Mager-Mix mit Drehmoment-Schwellenwert 1, NSK Typ A frisch)

Nachfolgend sollen die Ursachen der HC-Emission nach Katalysator bei Mager-Mix-Betrieb näher untersucht werden. Für drei HC-Quellen können Angaben zur Höhe der Beiträge zur Gesamtemission gemacht werden:

1. Durch Vergleich von Kalt- und Warmtests kann die während der Kaltstart- und Warmlaufphase auftretende HC-Emission ermittelt werden.
2. Aus Kap. 6.5.1.2 ist die HC-Emission bei Warmtests mit Mager-Mix-Betrieb ohne Regenerationen bekannt.
3. Die Zunahme der HC-Emission durch die Nitrat-Regenerationen gegenüber Mager-Mix-Betrieb ohne Regenerationen ist ebenfalls aus Kap. 6.5.1.2 bekannt. Dies gilt für die beiden untersuchten Strategien NEFZ-Variante 1 und 2.

Die aus den genannten Quellen stammenden Beiträge zur gesamten HC-Emission sind in Abb. 6-27 als Summe dargestellt. Hierbei wird vernachlässigt, daß die bei Mager-Mix-Betrieb im Warmtest zu Beginn des City-Zyklus gemessenen Emissionen im Kalttest nicht auftreten, da hier zunächst mit $\lambda = 1$ gefahren wird. Die gute Übereinstimmung der sich ergebenden Summe mit dem mit NEFZ-Variante 1 ermittelten Wert im Kalttest (Abb. 6-26) bestätigt, daß diese vereinfachte Vorgehensweise zur Abschätzung zulässig ist.

Man erkennt, daß die aus der Kaltstart- und Warmlaufphase stammende HC-Emission dem EU4-Grenzwert entspricht und den größten Teil der gesamten HC-Emission im NEFZ darstellt. Eine Verminderung der während des Kaltstarts verursachten HC-Emission erscheint jedoch möglich. Es wurde bereits festgestellt, daß hier nur eine begrenzte Optimierung der Kaltstart-Emissionen durchgeführt wurde.

Auch bei betriebswarmem Zustand des Katalysators tritt im Mager-Mix-Betrieb ohne Regenerationen eine erhebliche HC-Emission auf, deren Höhe 22 % des EU4-Grenzwertes entspricht. Als Ursache hierfür können die niedrigen Katalysator-Temperaturen und der möglicherweise höhere Methan-Gehalt des Abgases angesehen werden (vgl. Kap. 6.5.1.2).

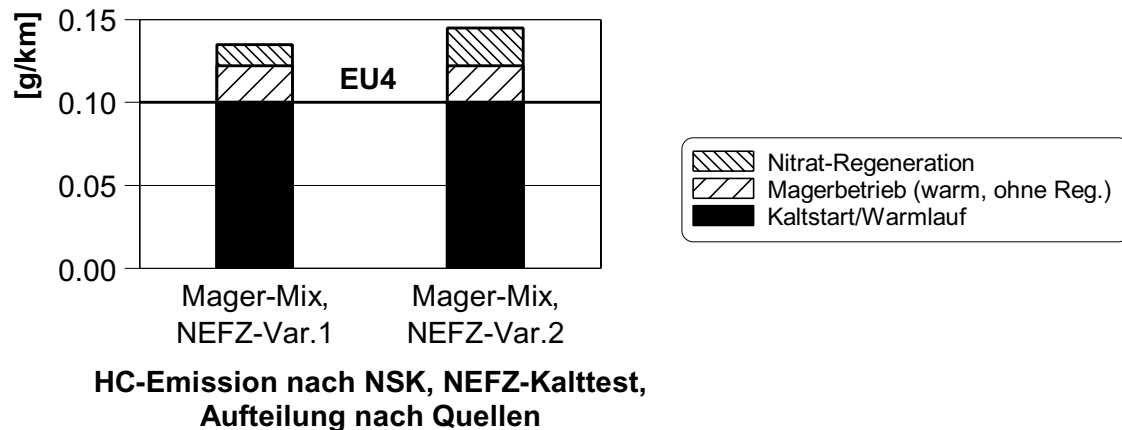


Abb. 6-27: Beiträge zur HC-Emission im NEFZ-Kalttest für verschiedene Regenerationsstrategien (Drehmoment-Schwellenwert 1, NSK Typ A frisch)

Durch die Nitrat-Regenerationen erhöht sich die HC-Emission weiter, wobei die Unterschiede zwischen einer optimierten und einer ungünstigen Regenerationsstrategie deutlich erkennbar sind. Bei der optimierten Strategie (NEFZ-Variante 1) stellen die Nitrat-Regenerationen mit 13 % des EU4-Grenzwertes den kleinsten der drei Beiträge zur gesamten HC-Emission dar.

Mögliche Maßnahmen zur weiteren Verringerung der HC-Emission aus allen drei Entstehungsquellen werden im folgenden Kapitel diskutiert.

Die NO_x-Rohemission bei Mager-Mix-Betrieb im NEFZ-Kalttest beträgt etwa 1.7 g/km. Die erreichte NO_x-Konversion von 98 % ist wie auch die Konversion von 99 % im Warmtest sehr hoch. Hierbei ist jedoch anzumerken, daß die Untersuchungen mit einem NO_x-Speicher-Katalysator durchgeführt wurden, der zuvor erst über eine Fahrstrecke von etwa 2500 km eingesetzt wurde und somit noch relativ frisch war. Über die NO_x-Konversion, die nach einem längeren Einsatz des Katalysators im Fahrbetrieb zu erzielen wäre, kann hier keine Aussage gemacht werden.

Hinsichtlich des Kraftstoff-Mehrverbrauchs durch die Nitrat-Regenerationen ist beim NEFZ-Kalttest eine leichte Verringerung gegenüber dem in Kap. 6.5.1.4 für den Warmtest abgeschätzten Wert zu erwarten, da die Anzahl von Regenerationen wegen der kürzeren Dauer des Magerbetriebs geringer ist. Außerdem ist der Kraftstoffverbrauch im Kalttest aufgrund von Katalysator-Heizmaßnahmen und höheren Reibungsverlusten in der Warmlaufphase höher als im Warmtest, so daß sich selbst bei gleichem absolutem Mehrverbrauch eine geringere relative Zunahme ergibt.

Die Angaben in der Literatur zur Verringerung des Verbrauchsvorteils durch die Regenerationen liegen zwischen 1 und 2.5 Prozentpunkten (vgl. Kap. 3.1). Der Mehrverbrauch, der sich in der vorliegenden Arbeit aus der Abschätzung im Warmtest nach Übertragung auf die Bedingungen bei einem Kalttest ergibt, stimmt etwa mit diesen Angaben überein.

6.5.3 Ansatzpunkte zur weiteren Optimierung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch

Im vorangegangenen Kapitel wurde dargestellt, daß mit dem Versuchsfahrzeug der HC-Grenzwert der Emissionsstufe EU4 nicht erreicht werden kann (Abb. 6-26). Die NO_x-Emission beträgt zwar bei den Untersuchungen mit frischem NO_x-Speicher-Katalysator nur etwa die Hälfte des EU4-Grenzwertes, es ist jedoch nicht sichergestellt, daß dieser Abstand zum Grenzwert ausreicht, um auch bei zunehmender Alterung des Katalysators eine Überschreitung auszuschließen. Somit verbleibt auch nach den beschriebenen Optimierungsschritten noch Bedarf hinsichtlich einer Verringerung der Emissionen im Abgastest. Darüber hinaus ist die Zahl dicht aufeinander folgender Regenerationen im Sinne eines verringerten Kraftstoff-Mehrverbrauchs zu reduzieren. Nachfolgend sollen einige mögliche Ansätze hierzu kurz diskutiert werden.

Zur Reduzierung der HC-Emission beim Kaltstart werden in der Literatur zahlreiche Ansätze zur schnellen Katalysator-Aufheizung genannt, wie beispielsweise Spätzündung, Sekundärlufteinblasung in fettes Abgas, Luftspaltisolierung der Abgasanlage, der Einsatz einer elektrischen Beheizung oder eines Brenners und die Anhebung der Leerlaufdrehzahl [6, 12, 23, 168, 169, 170]. Zusätzlich zu diesen an konventionellen Ottomotoren entwickelten Verfahren sind beim Ottomotor mit Direkteinspritzung noch spezielle Betriebsstrategien möglich, wie beispielsweise eine späte oder zusätzliche Einspritzung. Hinweise zu diesen Verfahren finden sich in [5, 24, 171].

Wie in Kap. 6.5.1.2 festgestellt, ist die HC-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator auch im betriebswarmen Zustand bei Mager-Mix-Betrieb ohne Regenerationen bereits höher als bei $\lambda=1$ -Betrieb. Als Ursache werden unter anderem die niedrigen Katalysator-Temperaturen vermutet. Die Temperatur im Startkatalysator kann durch eine motornähere Anordnung angehoben werden. Im Versuchsfahrzeug mußte der Startkatalysator jedoch aus Platzgründen im Unterbodenbereich positioniert werden. Auch der Einsatz eines einflutigen Abgaskrümmers statt der hier verwendeten zweiflutigen Ausführung (vgl. Abb. 5-8) würde zu einer höheren Temperatur des Startkatalysators führen. Die genannten Maßnahmen führen alle auch zu einer schnelleren Aufheizung des Startkatalysators nach dem Kaltstart. Das gleiche gilt für eine Luftspaltisolierung des Abgaskrümmers.

Eine motornähere Position des NO_x-Speicher-Katalysators könnte dagegen dazu führen, daß infolge höherer Temperaturen das für die NO_x-Speicherung günstige Temperaturfenster im EUDC verlassen wird. Zudem würde dadurch die thermische Alterung im realen Fahrbetrieb verstärkt. Mit Hilfe einer Abgasanlage mit zuschaltbarer Kühlvorrichtung könnten diese Nachteile vermieden werden (vgl. Kap. 3.2.2).

Aus den Untersuchungen in Kap. 6.4.1 ist hervorgegangen, daß mit einer niedrigen NO_x-Rohemission eine Verringerung der NO_x-, HC- und CO-Emissionen nach NO_x-Speicher-Katalysator erreicht werden kann. Daher ist eine möglichst niedrige NO_x-Rohemission vorteilhaft. Die NO_x-Rohemission kann vor allem durch Erhöhung der Abgasrückführrate reduziert werden, wobei Entflammungsaussetzer als Folge einer zu hohen Abgasrückführrate vermieden werden müssen.

Der Wirkungsgrad der NO_x-Speicherung im NO_x-Speicher-Katalysator kann beispielsweise dadurch erhöht werden, daß ein größeres Katalysatorvolumen oder

eine Beschichtung mit noch höherer spezifischer NO_x-Speicherkapazität gewählt wird. Hierdurch kann der NO_x-Schlupf und die Anzahl der Regenerationen verringert werden. Letzteres bietet Vorteile hinsichtlich der HC- und CO-Emissionen sowie des Kraftstoffverbrauchs. Durch Verwendung eines NO_x-Speicher-Katalysators mit geringer O₂-Speicherkapazität kann der Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Nitrat-Regenerationen deutlich verringert werden.

Wie in Kap. 6.5.1.3 festgestellt, wird mit der realisierten Regelung der Regenerationsdauer bei höheren Motordrehzahlen noch etwas zu lange regeneriert, so daß Reduktionsmittel-Durchbrüche auftreten. Mit einer modellbasierten Regelung könnten diese Durchbrüche vermutlich vermieden werden, da der rechtzeitige Abbruch der Regenerationen bereits vor Ansprechen der Lambdasonden möglich wäre. Hierdurch könnte auch der Kraftstoff-Mehrverbrauch weiter verringert werden. Die Reduktionsmittel-Durchbrüche können auch dadurch verringert werden, daß hinter der zur Regelung der Regenerationsdauer genutzten Lambdasonde noch ein zusätzlicher Katalysator eingesetzt wird. Dieser Katalysator kann als NO_x-Speicher-Katalysator oder gewöhnlicher Drei-Wege-Katalysator ausgeführt sein. In [68] wird berichtet, daß mit einem dem NO_x-Speicher-Katalysator nachgeschalteten Drei-Wege-Katalysator mit hoher O₂-Speicherfähigkeit die HC- und CO-Durchbrüche verringert werden können. Nachteile dieser Maßnahme sind der Bauraumbedarf und der Kostenaufwand.

Bei den Untersuchungen im NEFZ wurden teilweise bei Beschleunigungen sehr kurz hintereinander zwei Regenerationen durchgeführt. Hierbei wurde die erste Regeneration wegen zu hoher NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator und die zweite Regeneration vor dem Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb durchgeführt. Dieser ungünstige Fall kann bei Verfügbarkeit eines Katalysatormodells in der Motorsteuerung mit folgenden Ansätzen vermieden werden:

- Wenn der Beladungszustand des NO_x-Speicher-Katalysators einen erhöhten NO_x-Schlupf bei Magerbetrieb erwarten läßt, kann bereits zu Beginn von Beschleunigungsphasen eine Regeneration durchgeführt werden. Durch die „vorsorgliche“ Regeneration zu Beginn der Beschleunigung ist eine Verringerung der NO_x-Emission nach Katalysator zu erwarten. Allerdings wird die gesamte Anzahl der Regenerationen im NEFZ nicht reduziert.
- Der Drehmoment-Schwellenwert für den Wechsel von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb kann bei hoher NO_x-Beladung verringert werden. Auch hierdurch wird erreicht, daß bereits zu Beginn einer Beschleunigungsphase eine Regeneration erfolgt. Im Unterschied zu oben wird bei dieser Variante jedoch nach der Regeneration zu $\lambda=1$ -Betrieb und erst nach Ende der Beschleunigung wieder zu Magerbetrieb gewechselt. Mit dieser Strategie wird die Anzahl der Regenerationen im NEFZ verringert.

7. Strategie zur Desulfatisierung von NO_x-Speicher-Katalysatoren

In diesem Kapitel wird die Desulfatisierung von NO_x-Speicher-Katalysatoren untersucht. Ziel ist hierbei nicht die detaillierte Klärung der Vorgänge im Katalysator bei der Desulfatisierung, sondern die Entwicklung einer Strategie zur Desulfatisierung des NO_x-Speicher-Katalysators im realen Fahrbetrieb. Hierzu werden zunächst Ergebnisse grundlegender Untersuchungen auf dem Stationärprüfstand beschrieben. Danach werden die Ergebnisse erläutert, die die Erprobung dieser Strategie im Fahrzeug ergeben hat.

Ein weiterer Schwerpunkt dieses Kapitels ist die Untersuchung der Widersprüche, die in der Literatur zur Schädigung des NO_x-Speicher-Katalysators durch Schwefel und zur Vorgehensweise für eine Desulfatisierung gefunden wurden (vgl. Kap. 3.3).

In Tab. 7-1 ist eine Übersicht über die in diesem Kapitel beschriebenen Variationen dargestellt. Alle Untersuchungen wurden mit einem Startkatalysator und einem NO_x-Speicher-Katalysator des Typs A durchgeführt.

Variierte Größe		Prüfstand	Fahrzeug
gespeicherte Schwefelmenge	- hoch (ca. 4 - 10 g)	X	X
	- gering (ca. 0.5 g)	X	X
Luftverhältnis bei der Desulfatisierung	- konstante Vorgabe ($\lambda = 0.8 - 1.0$)	X	X
	- periodischer Wechsel zwischen $\lambda < 1$ und $\lambda > 1$	X	
	- konstante Vorgabe ($\lambda = 0.98$), zusätzlich Phasen mit Vollast-Anfettung ($\lambda = 0.85$)		X
Temperatur bei der Desulfatisierung	- relativ hoch (ca. 650 - 750 °C)	X	X
	- relativ niedrig (ca. 600 - 650 °C)	X	X
Verfahren zur Katalysatoraufheizung	- Spätzündung	X	
	- Lufteinblasung	X	
	- Zylindervertrimmung	X	X
Dauer der Desulfatisierung	- Dauer 5 - 15 min, ohne Unterbrechung	X	X
	- kurze Desulfatisierungsphasen, je 30 - 120 s	X	
spezielle Maßnahmen zur H ₂ S-Minimierung	- Strategie mit häufiger Desulfatisierung	X	X
	- Lufteinblasung vor nachgeschaltetem Drei-Wege-Katalysator	X	

Tab. 7-1: Variationen bei den Untersuchungen zur Desulfatisierung

7.1 Grundlegende Untersuchungen

Mit dem betrachteten NO_x-Speicher-Katalysator wurden insgesamt 32 Verschwezelungsprozeduren durchgeführt, nach denen der Katalysator jeweils wieder gründlich desulfatisiert wurde. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden im Folgenden dargestellt.

7.1.1 Schädigung des NO_x-Speicher-Katalysators durch Schwefel

7.1.1.1 Größen zur Beschreibung der NO_x-Speicherfähigkeit

Um nach den Verschwezelungen sowie nach den Desulfatisierungen das Speicherverhalten des NO_x-Speicher-Katalysators zu beschreiben, wurden zwei verschiedene Verfahren eingesetzt. Im Hinblick auf den realen Einsatz des NO_x-Speicher-Katalysators ist es naheliegend, die NO_x-Konversion in einem vorgegeben Mager/Fett-Zyklus zu betrachten. Hierzu wurde bei $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar eine Adsorptionsdauer von 60 s und eine Regenerationsdauer von 3 s gewählt. Die Regeneration wurde mit $\lambda_{Reg} = 0.65$ durchgeführt, die Katalysator-Temperatur lag bei ca. 420 °C. Die NO_x-Konversion in diesem Mager/Fett-Zyklus wird im Folgenden als $K_{NO_x 60/3}$ bezeichnet. Im Gegensatz zu den in Kap. 6.1 bis 6.3 beschriebenen Untersuchungen wurde hier eine Motorabstimmung gewählt, mit der im Magerbetrieb eine NO_x-Rohemission von 320 ppm bzw. 37 g/h erreicht wird.

Die Betrachtung der NO_x-Konversion $K_{NO_x 60/3}$ liefert jedoch nur eine eingeschränkte Information über die Verschlechterung des Speicherverhaltens, wie später noch deutlich wird. Daher wurde ein weiteres Verfahren zur Bewertung der NO_x-Speicherfähigkeit eingesetzt. Hierbei wurde nach einer langen Nitrat-Regeneration bei $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar mit $\lambda_{Reg} = 0.9$ (Dauer 5 min) zu Magerbetrieb gewechselt. Bei Magerbetrieb führt eine zunehmende NO_x-Beladung des NO_x-Speicher-Katalysators zu einer Zunahme der NO_x-Konzentration nach Katalysator. Durch Integration der gemessenen NO_x-Verläufe vor und nach Katalysator kann für jeden Zeitpunkt die gespeicherte NO_x-Masse bestimmt werden. Für die Bewertung der NO_x-Speicherfähigkeit wird die NO_x-Masse betrachtet, die bis zu einem Anstieg der NO_x-Konzentration nach NO_x-Speicher-Katalysator auf 50 % der NO_x-Rohemission gespeichert wird. Diese Vergleichsgröße wird nachfolgend als NO_x-Speicherkapazität $m_{NO_x 50\%}$ bezeichnet.

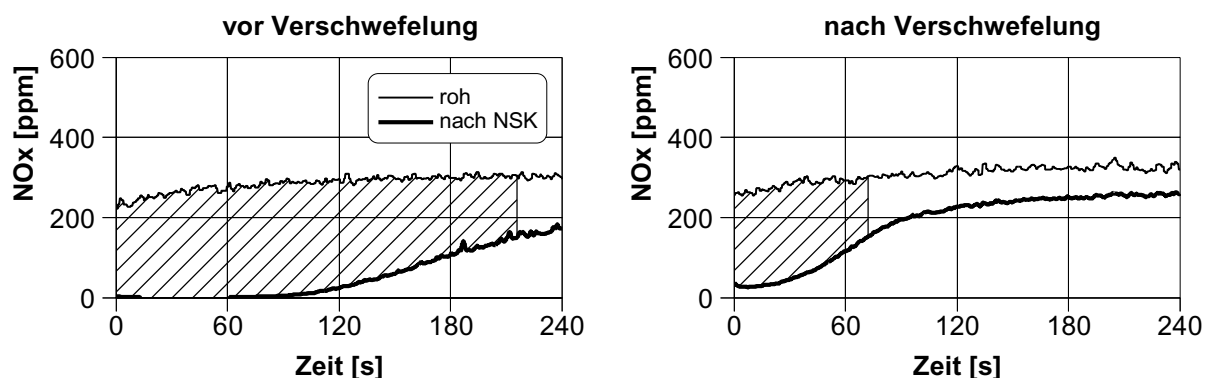


Abb.7-1: Ermittlung der NO_x-Speicherkapazität $m_{NO_x 50\%}$
($n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, Ladungsschichtung)

In Abb. 7-1 ist beispielhaft das NO_x-Speicherverhalten vor und nach der 32. und damit letzten Verschwefelung dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wurde von Betrieb mit $\lambda = 0.9$ zu Magerbetrieb gewechselt. Die NO_x-Speicherkapazität $m_{\text{NO}_x 50\%}$ wird aus dem Inhalt der schraffierten Fläche berechnet.

Im den weiteren Ausführungen werden sowohl die NO_x-Konversion im Mager/Fett-Zyklus $K_{\text{NO}_x 60/3}$ als auch die NO_x-Speicherkapazität $m_{\text{NO}_x 50\%}$ zur Charakterisierung des Katalysatorzustands herangezogen.

7.1.1.2 Vorgehensweise bei der Verschwefelung

Die Schädigung des NO_x-Speicher-Katalysators durch den im Kraftstoff enthaltenen Schwefel ist bei geringem Schwefelgehalt des Kraftstoffs ein relativ langsamer Prozeß. Um den Katalysator im Versuch in einer kürzeren Zeit mit Schwefel zu beladen, wurde zusätzlich während des Motorbetriebs vor dem NO_x-Speicher-Katalysator ein SO₂-haltiges Gas zudosiert (1% SO₂, 99% N₂). Die Dosierung des SO₂-haltigen Gases wurde so eingestellt, daß dem NO_x-Speicher-Katalysator 5.4 g/h Schwefel zugeführt werden. Da nach NO_x-Speicher-Katalysator während der Verschwefelung kein SO₂ festgestellt wurde, ist von einer vollständigen Schwefel-Speicherung sowohl im Magerbetrieb als auch bei $\lambda \leq 1$ auszugehen. Dieses Verhalten wurde auch in [86] beschrieben.

Während der Verschwefelungsprozedur wurde der Motor bei $n = 2000$ 1/min und $p_{\text{me}} = 2$ bar in dem bereits beschriebenen Mager/Fett-Zyklus mit einer Adsorptionsdauer von 60 s und einer Regenerationsdauer von 3 s betrieben. Die Verschwefelung wurde beendet, wenn nach Katalysator im Mager/Fett-Zyklus am Ende der 60 s dauernden Adsorptionsphase eine NO_x-Konzentration von 120 ppm erreicht wurde. Bei Erreichen dieses Abbruchkriteriums für die Verschwefelung betrug die NO_x-Konversionsrate $K_{\text{NO}_x 60/3}$ im gesamten Mager/Fett-Zyklus noch 85 %. Vor der Verschwefelung lag die NO_x-Konversion bei den verschiedenen Untersuchungen jeweils zwischen 95 % und 99 %. Eine Abnahme der NO_x-Konversionsrate auf 85 % stellt im Hinblick auf die im Abgastest einzuhaltenen Abgasgrenzwerte bereits eine erhebliche Schädigung dar (vgl. Kap. 6.5.2).

Die NO_x-Speicherkapazität $m_{\text{NO}_x 50\%}$ des untersuchten NO_x-Speicher-Katalysators betrug im Neuzustand 2.8 g. Nach der ersten Verschwefelung sank sie um 82 % auf nur noch 0.5 g. Die tatsächliche Verringerung der NO_x-Speicherkapazität ist also wesentlich größer, als die Abnahme der NO_x-Konversion $K_{\text{NO}_x 60/3}$ im Mager/Fett-Zyklus auf 85 % vermuten läßt.

7.1.1.3 Zusammenhang zwischen gespeicherter Schwefelmasse und Verschlechterung des NO_x-Speicherverhaltens

Bei der erstmaligen Verschwefelung war bis zum Erreichen des oben genannten Abbruchkriteriums eine Schwefelmasse von 10.4 g erforderlich. Bei der 32. und damit letzten Verschwefelung genügte mit 5.2 g Schwefel im Vergleich zur erstmaligen Verschwefelung die halbe Schwefelmasse, um den gleichen Zustand des NO_x-Speicher-Katalysators zu erreichen. Ein ähnliches Verhalten wurde bereits in [87] festgestellt. Die hohe NO_x-Speicherfähigkeit im Neuzustand wurde nach mehrfacher Verschwefelung trotz gründlicher Desulfatisierung nicht wieder erreicht. Vor der 32. Verschwefelung lag die NO_x-Speicherkapazität $m_{\text{NO}_x 50\%}$ bei nur noch 1.75 g gegenüber 2.8 g im Neuzustand.

Um dieses Verhalten zu verdeutlichen, ist in Abb. 7-2 die zugeführte Schwefelmasse bei den 32 Versuchen dargestellt. Bei allen Versuchen wurde jeweils nach der Desulfatisierung mit unterschiedlichen Parametern eine zusätzliche zweite Desulfatisierung über 20 bis 30 min mit $\lambda = 0.9$ und Katalysator-Temperaturen zwischen 640 und 740 °C durchgeführt. Hierdurch wurde eine gründliche Desulfatisierung vor erneuter Verschwefelung sichergestellt. Wie in Abb. 7-2 zu erkennen, weist die jeweilige Verschwefelungsdauer bei den Versuchen trotz dieser Vorgehensweise eine deutliche Streuung auf. Überlagert von dieser Streuung ist bei den ersten Versuchen ein deutlicher Abfall der zugeführten Schwefelmasse bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums zu erkennen. Etwa nach der halben Anzahl der Versuche ist ein annähernd gleichbleibendes Verhalten zu erkennen. Offensichtlich wird hier ein näherungsweise stabiler Zustand des Katalysators erreicht.

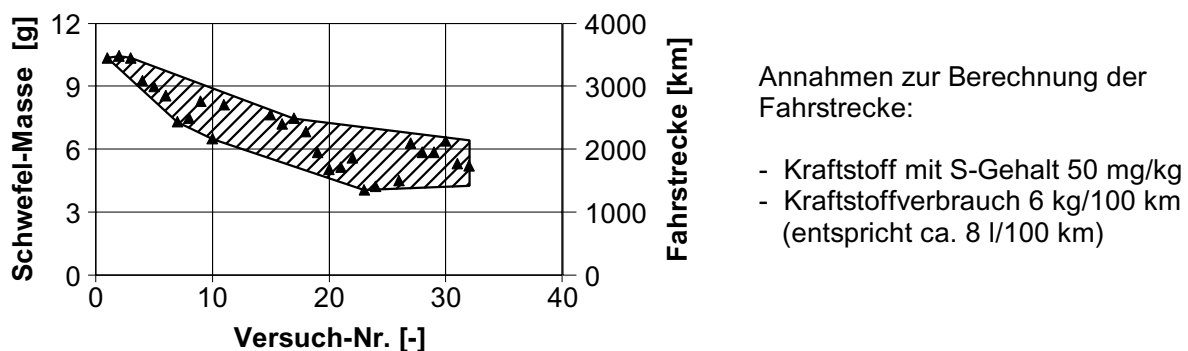


Abb. 7-2: Zugeführte Schwefelmasse und entsprechende Fahrstrecke bis zum Erreichen des Abbruchkriteriums bei der Verschwefelung ($n = 2000$ 1/min, $p_{me} = 2$ bar, Mager/Fett-Betrieb)

Ursache für das beschriebene Verhalten ist das Verbleiben von Schwefel im NO_x-Speicher-Katalysator. Aus Analysen des Katalysators nach Ende der Versuche geht hervor, daß trotz abschließender gründlicher Desulfatisierung noch etwa 4 g Schwefel im Katalysator verblieben sind. In [96, 99] wurde dagegen festgestellt, daß nach 25 Verschwefelungen und Desulfatisierungen nur 1 g Schwefel dauerhaft im NO_x-Speicher-Katalysator gespeichert wird.

Zusätzlich ist in Abb. 7-2 eine der zugeführten Schwefelmenge entsprechende Fahrstrecke angegeben. Diese wurde unter Annahme eines Schwefelgehalts im Kraftstoff von 50 mg/kg berechnet. Die 32 Versuche entsprechen einer Fahrstrecke von insgesamt ca. 70000 km, wobei jeweils nach etwa 1500 bis 3500 km eine Desulfatisierung durchgeführt wurde.

7.1.2 Verschiedene Verfahren zur Desulfatisierung

7.1.2.1 Versuchsdurchführung

Wie aus der Literatur bekannt, sind zur Desulfatisierung Katalysator-Temperaturen von mindestens 600 bis 650 °C und Luftverhältnisse $\lambda \leq 1$ erforderlich. Um für die Untersuchungen Temperaturen von etwa 650 °C zu erreichen, wurde der Motor im Homogenbetrieb bei $n = 2500$ 1/min und $p_{me} = 3$ bar betrieben und der Zündwinkel in Richtung „spät“ verschoben. Durch die Spätzündung wurde eine deutliche Erhöhung

der Abgastemperatur erreicht (vgl. Kap. 3.4.4). Bei kleineren Luftverhältnissen, beispielsweise $\lambda = 0.8$, sind spätere Zündwinkel erforderlich, um die gleiche Abgastemperatur zu erreichen wie bei größeren Luftverhältnissen (z.B. $\lambda = 0.98$). Bei den Untersuchungen mit Temperaturen zur Desulfatisierung von etwa 650 °C wurden Zündwinkel zwischen 4 und 11 °KW nach OT eingestellt.

Die in Kap. 7.1.3.1 beschriebenen Untersuchungen mit Katalysator-Temperaturen bis 750 °C wurden bei $n = 3500$ 1/min und $p_{me} = 4$ bar durchgeführt, wobei auch hier der Zündwinkel in Richtung „spät“ verschoben wurde.

Mit Hilfe eines CIMS wurden während der Desulfatisierungen die Emissionen der Komponenten SO₂, H₂S und COS nach NO_x-Speicher-Katalysator gemessen. Die Dauer der Desulfatisierungsversuche betrug meist 10 min. Nach dieser Dauer wurde zu $\lambda = 1.05$ gewechselt, wodurch die noch nicht ganz vollständig abgeklungene Schwefelfreisetzung abgebrochen wurde. Soweit nicht anders vermerkt, konnte durch die Desulfatisierungsprozeduren das NO_x-Speicherverhalten annähernd wiederhergestellt werden, so daß in diesen Fällen von erfolgreichen Desulfatisierungen gesprochen werden kann. Wie bereits beschrieben, wurde anschließend bei allen Versuchen eine zweite Desulfatisierung über 20 bis 30 min mit $\lambda = 0.9$ und Katalysator-Temperaturen zwischen 640 und 740 °C durchgeführt, um eine gründliche Desulfatisierung zu erreichen.

7.1.2.2 Untersuchungen mit konstantem Luftverhältnis

Aus der Literatur ist bekannt, daß das Luftverhältnis bei der Desulfatisierung einen wesentlichen Einfluß darauf hat, in welcher Form der gespeicherte Schwefel freigesetzt wird (vgl. Kap. 3.3.2). Hierzu wurden Untersuchungen mit zwei unterschiedlichen Prozeduren durchgeführt:

1. Aufheizung fett: Noch im Betriebspunkt für die Verschwefelung wird das jeweilige Luftverhältnis ($\lambda < 1$) für die Desulfatisierung vorgegeben. Nach Erreichen einer stabilen Katalysator-Temperatur (400 - 450 °C) wird zu dem oben angegebenen Betriebspunkt mit Spätzündung gewechselt. Die Schwefelfreisetzung beginnt während des Aufheizvorgangs.
2. Aufheizung mager: Bei diesen Untersuchungen wird der Katalysator zunächst bei $\lambda = 1.05$ im oben genannten Betriebspunkt aufgeheizt. Erst nach Erreichen der angestrebten Katalysator-Temperatur wird auf ein Luftverhältnis $\lambda < 1$ gewechselt und somit die Schwefelfreisetzung gestartet.

In Abb. 7-3 sind exemplarisch Ergebnisse von Untersuchungen zur Desulfatisierung mit fetter Aufheizung bei $\lambda = 0.90$ bzw. $\lambda = 0.98$ dargestellt. Zum Zeitpunkt $t = 0$ wurde die Aufheizung gestartet, indem zum oben genannten Betriebspunkt mit Spätzündung gewechselt wurde. Die Schwefelfreisetzung beginnt bei beiden Varianten bereits ab einer Temperatur im Katalysator-Eintritt zwischen 450 und 500 °C. Bei der Desulfatisierung mit $\lambda = 0.90$ wird der Schwefel größtenteils als H₂S emittiert. Mit $\lambda = 0.98$ tritt dagegen zunächst ausschließlich SO₂ auf. Erst nach Abfall der SO₂-Emission wird auch hier H₂S freigesetzt. Bei beiden Varianten ist die COS-Emission gering.

Die rechten Diagramme in Abb. 7-3 zeigen eine Desulfatisierung mit magerer Aufheizung. Hierbei wurde zum Zeitpunkt $t = 0$ von $\lambda = 1.05$ zu $\lambda = 0.98$ gewechselt, nachdem der Katalysator zuvor das angestrebte Temperaturniveau erreicht hat. Die Schwefelfreisetzung setzt bei dieser Variante deutlich heftiger ein als bei fetter

Aufheizung, wobei wieder zunächst ausschließlich SO₂ festgestellt wird. Mit etwa 60 s Verzögerung setzt dann die H₂S-Bildung ein. Parallel hierzu tritt auch eine niedrige COS-Emission auf. Das bei dieser Variante festgestellte Verhalten stimmt mit dem in Abb. 3-4 dargestellten Verhalten überein. Bei allen drei Varianten wird auch nach insgesamt 10 min noch Schwefel in Form einer geringen H₂S-Emission freigesetzt.

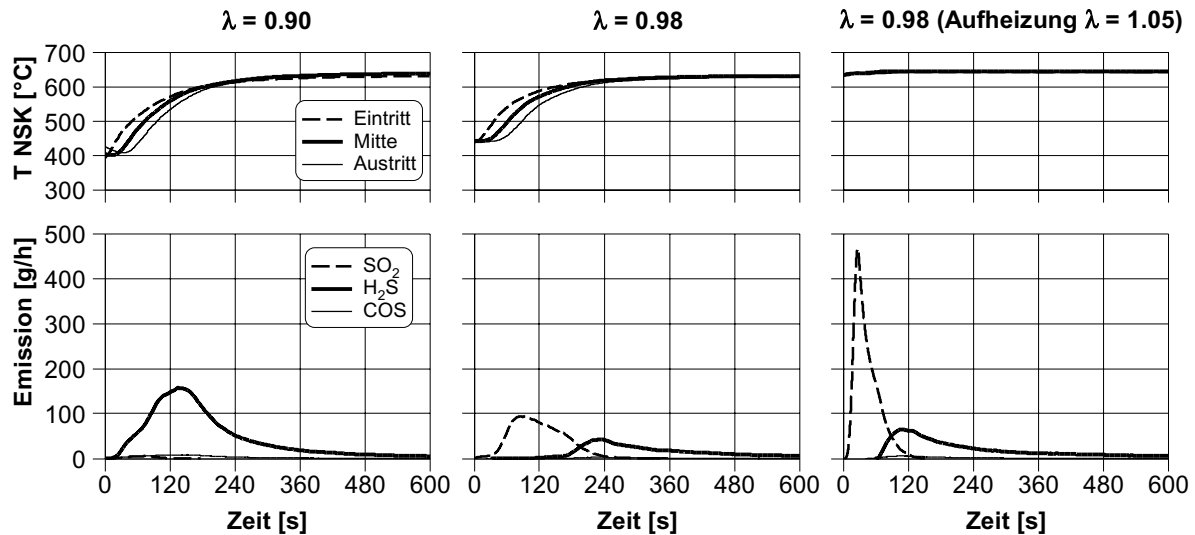


Abb. 7-3: Desulfatisierungen mit unterschiedlichen Luftverhältnissen ($n = 2500 \text{ l/min}$, $p_{me} = 3 \text{ bar}$, NSK verschwefelt mit ca. 8 g)

Das in Abb. 7-3 gezeigte Verhalten tritt in ähnlicher Form auch bei anderen Luftverhältnissen auf. In Abb. 7-4 ist dargestellt, wie sich der freigesetzte Schwefel in Abhängigkeit des Luftverhältnisses bei der Desulfatisierung auf die Komponenten H₂S, SO₂ und COS verteilt. Man erkennt, daß bei kleinen Luftverhältnissen der SO₂-Anteil an der gesamten Schwefel-Freisetzung gering ist, der Schwefel wird überwiegend als H₂S emittiert. Je größer das Luftverhältnis gewählt wird, desto größer wird der SO₂-Anteil. Bei $\lambda = 0.99$ werden über 50 % des Schwefels als SO₂ freigesetzt. Der Anteil des als COS emittierten Schwefels beträgt bei allen betrachteten Luftverhältnissen zwischen 2 und 4 % und ist damit gering.

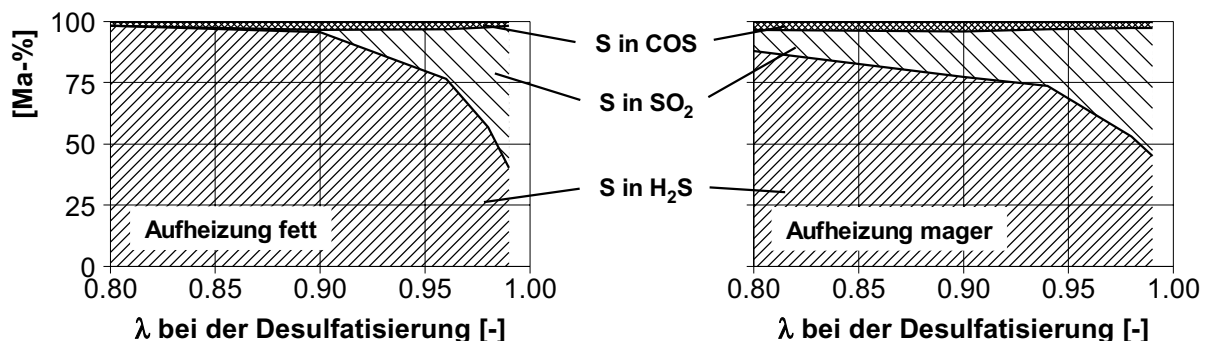


Abb. 7-4: Verteilung des freigesetzten Schwefels auf die Komponenten H₂S, SO₂ und COS bei der Desulfatisierung ($n = 2500 \text{ l/min}$, $p_{me} = 3 \text{ bar}$, T_{NSK} ca. 650 °C, NSK verschwefelt mit ca. 8 g)

Im Hinblick auf die mögliche Geruchsbelästigung bei der Desulfatisierung infolge hoher H₂S-Emission ist die Betrachtung des maximalen H₂S-Massenstroms wichtig. Die Ergebnisse hierzu sind in Abb. 7-5 dargestellt. Erwartungsgemäß nehmen auch die maximalen H₂S-Werte mit kleinerem Luftverhältnis zu. Hierbei tritt ein großer Unterschied zwischen fetter und magerer Aufheizung auf. Die deutlich niedrigeren Werte für die fette Aufheizung sind darauf zurückzuführen, daß die Schwefelfreisetzung wegen der anfangs niedrigeren Katalysator-Temperatur langsamer einsetzt (vgl. Abb. 7-3). Im Hinblick auf die niedrigeren H₂S-Spitzenwerte ist also eine Desulfatisierung mit fetter Aufheizung zu bevorzugen. Hierdurch ist zudem eine Verkürzung der erforderlichen Dauer für den gesamten Desulfatisierungsvorgang einschließlich Aufheizphase zu erzielen.

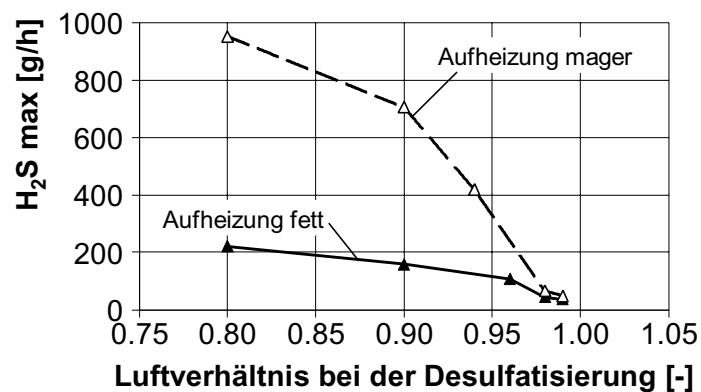


Abb. 7-5: Maximale H₂S-Emission bei der Desulfatisierung in Abhängigkeit des Luftverhältnisses ($n = 2500 \text{ l/min}$, $p_{me} = 3 \text{ bar}$, T_{NSK} ca. 650 °C , NSK verschwefelt mit ca. 8 g)

Bei der Bewertung einer Desulfatisierungsstrategie sind auch die NO_x-, HC- und CO-Emissionen zu betrachten, die während der Desulfatisierung nach NO_x-Speicher-Katalysator auftreten. Hierbei nehmen die HC- und CO-Emissionen nach Katalysator wie bei einem Drei-Wege-Katalysator mit kleinerem Luftverhältnis zu (vgl. Abb. 2-2). Im gleichen Betriebspunkt werden beispielsweise bei $\lambda = 0.9$ etwa um den Faktor sechs höhere HC- und CO-Massenströme gemessen als bei $\lambda = 0.98$.

In der Literatur werden zur Desulfatisierung größtenteils Luftverhältnisse $\lambda < 1$ betrachtet. Im Gegensatz hierzu wird in [87] die Möglichkeit einer Desulfatisierung bei $\lambda = 1$ beschrieben. Aufgrund des in Abb. 7-4 dargestellten Verhaltens wäre bei einer Desulfatisierung mit $\lambda = 1$ ein noch höherer SO₂-Anteil zu erwarten. Daher wurden hierzu entsprechende Untersuchungen durchgeführt.

Abb. 7-6 zeigt eine Desulfatisierung mit nahezu stöchiometrischem Luftverhältnis. Der Desulfatisierungsversuch erstreckt sich über insgesamt 20 min, wobei nach der Hälfte der Zeit aus technischen Gründen die Datenaufzeichnung für etwa 150 s unterbrochen werden mußte. Während dieser Unterbrechung wurde der Motorbetrieb mit $\lambda = 1.05$ fortgesetzt, um eine Schwefelfreisetzung zu vermeiden. Während der Desulfatisierung wird mit der Meßsonde vor NO_x-Speicher-Katalysator ein Luftverhältnis nahe $\lambda = 1.00$ ermittelt. Für eine genauere Betrachtung des tatsächlich herrschenden Luftverhältnisses werden zusätzlich die binäre Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator und die Konversionsraten des hier als Drei-Wege-Katalysator arbeitenden NO_x-Speicher-Katalysators betrachtet.

Hierbei ist zu beachten, daß die optimale Funktion des Drei-Wege-Katalysators nicht bei exakt $\lambda = 1$, sondern bei leicht fettem Luftverhältnis gegeben ist (vgl. Kap. 2.1.2).

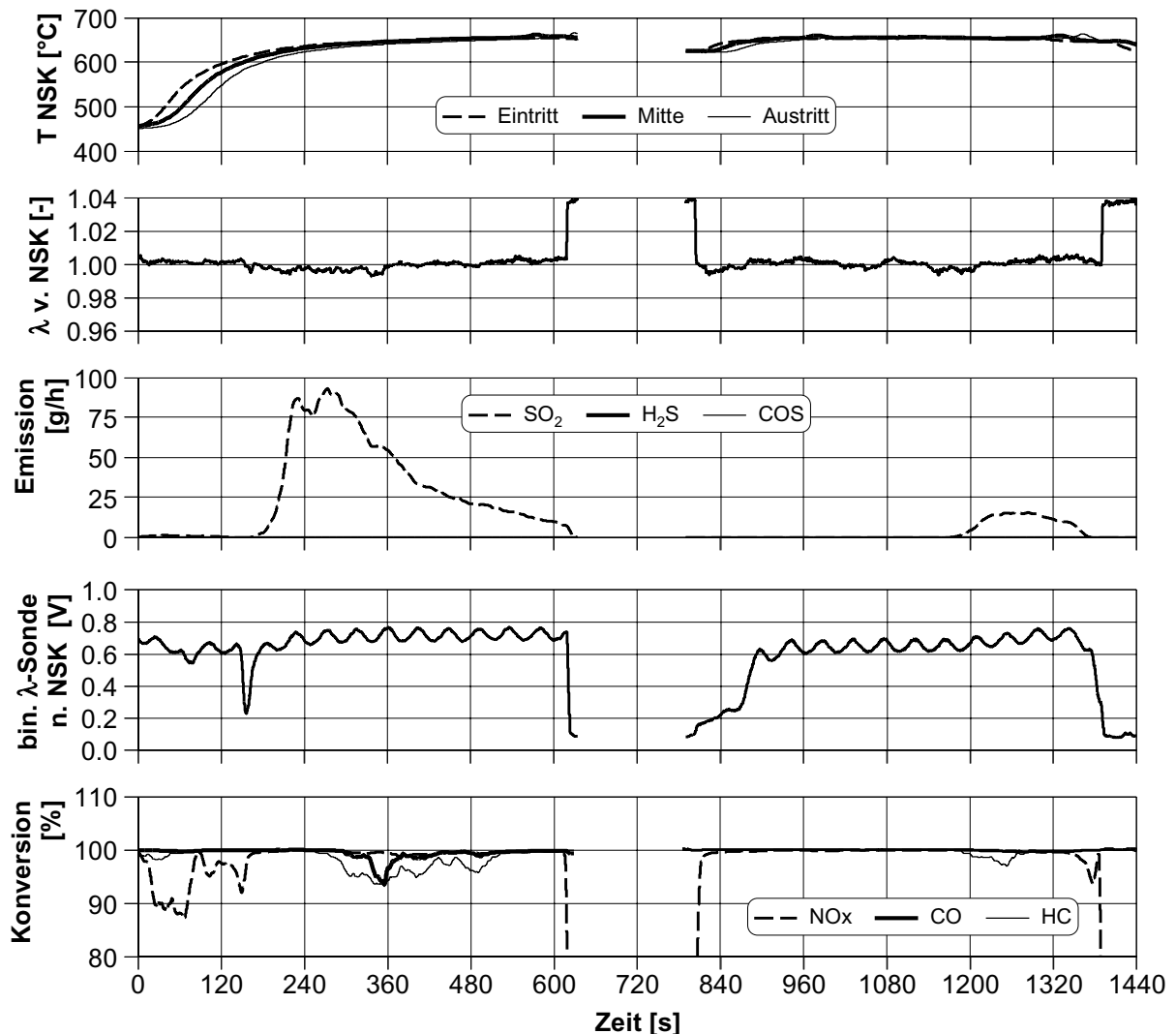


Abb. 7-6: Desulfatisierung mit nahezu stöchiometrischem Luftverhältnis
($n = 2500 \text{ l/min}$, $p_{me} = 3 \text{ bar}$, NSK verschwefelt mit ca. 4 g)

Während der ersten 150 s liegt ein leicht mageres Luftverhältnis vor. Dies ist aus dem Signal der binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator zu erkennen, das am Ende dieser Phase kurzzeitig auf 0.23 V abfällt. Wegen der O₂-Speicherfähigkeit des NO_x-Speicher-Katalysators reagiert das Signal dieser Lambdasonde hierbei erst mit einer gewissen zeitlichen Verzögerung auf Änderungen des motorischen Luftverhältnisses. Nach etwa 150 s wurde manuell eine geringe Verschiebung des λ -Sollwertes in der Motorsteuerung um wenige Promille in Richtung „fett“ vorgenommen. Diese Maßnahme führt zu einem Anstieg des Signals der binären Sonde auf im Mittel etwa 0.7 V, und auch die NO_x-Konversion steigt auf nahezu 100 %. In dieser Phase setzt die Freisetzung von SO₂ ein. Die nachlassende Konversion von CO und HC weist darauf hin, daß in dieser Phase ein leicht fettes Luftverhältnis vorliegt (unterstes Diagramm in Abb. 7-6).

Nach der bereits erwähnten Unterbrechung der Datenaufzeichnung wurde der Betrieb mit einem Luftverhältnis fortgesetzt, das über eine Dauer von etwa 360 s eine optimale Wirkung der Drei-Wege-Funktion des NO_x-Speicher-Katalysators

ermöglicht. Dieses Luftverhältnis entspricht also dem Wert, der im Hinblick auf eine optimale Katalysator-Wirkung bei $\lambda=1$ -Betrieb einzustellen wäre. Allerdings wird in dieser Phase kein Schwefel freigesetzt. Erst nach einer Verschiebung des λ -Sollwertes um wenige Promille weiter in Richtung „fett“ setzt eine relativ schwache SO₂-Emission ein. Das Signal der binären Lambdasonde nimmt dabei im Mittel um etwa 0.05 V zu, und die verschlechterte HC-Konversion weist auf ein leicht fettes Luftverhältnis hin.

Offensichtlich ist ein für die Drei-Wege-Funktion des NO_x-Speicher-Katalysators optimales Luftverhältnis also für eine Desulfatisierung nicht ausreichend fett. Bei etwas kleinerem Luftverhältnis setzt dagegen eine Schwefelfreisetzung ein, wobei ausschließlich SO₂ gebildet wird. Mit der binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator können diese sehr geringen Unterschiede im Luftverhältnis aufgelöst werden.

Nach dem beschriebenen Desulfatisierungsversuch wird anstelle der erwarteten Verbesserung des NO_x-Speicherverhaltens gegenüber dem Zustand nach der Verschwefelung eine Verschlechterung festgestellt. Die NO_x-Konversion im Mager/Fett-Zyklus wird durch den Desulfatisierungsversuch von $K_{\text{NO}_x 60/3} = 85\%$ auf 51 % verringert. Dieser Effekt wurde auch bei Wiederholungsversuchen festgestellt. Vermutlich findet hier eine ungünstige Umverteilung des Schwefels im Katalysator statt, so daß leicht zugängliche Speicherplätze für die NO_x-Speicherung nicht mehr zur Verfügung stehen. Das unbefriedigende Ergebnis dieser Desulfatisierungsversuche steht im Widerspruch zu den erwähnten Ergebnissen in [87].

7.1.2.3 Untersuchungen mit periodisch wechselndem Luftverhältnis

In [4, 96, 99] wird berichtet, daß bei einer Desulfatisierung mit periodisch zwischen $\lambda < 1$ und $\lambda > 1$ wechselndem Luftverhältnis bei geeigneter Wahl der Parameter eine H₂S-Bildung praktisch vollständig vermieden werden kann (vgl. Kap. 3.3.2).

Mit diesem Verfahren wurden verschiedene Versuche durchgeführt, wobei der Betrieb mit periodisch wechselndem Luftverhältnis jeweils erst nach der Aufheizung des Katalysators mit $\lambda = 1.05$ gestartet wurde. Abb. 7-7 zeigt Ergebnisse von Untersuchungen mit einer Periodendauer von 20 s und unterschiedlichen Luftverhältnissen in den Phasen mit $\lambda < 1$. Bei periodischem Wechsel zwischen $\lambda = 0.98$ und $\lambda = 1.05$ wird, wie in den genannten Quellen beschrieben, ausschließlich SO₂ freigesetzt. Allerdings wird nach einer gesamten Desulfatisierungsdauer von 10 min, d.h. einer Dauer von insgesamt 5 min mit $\lambda < 1$, ähnlich wie bei dem gerade zuvor beschriebenen Versuch bei Luftverhältnissen nahe $\lambda = 1$ ein sehr schlechtes NO_x-Speicherverhalten festgestellt. Die NO_x-Konversion $K_{\text{NO}_x 60/3}$ im Mager/Fett-Zyklus liegt bei nur 48 %. Somit muß diese Strategie für den untersuchten Katalysator als ungeeignet angesehen werden.

Bei einem Luftverhältnis von 0.94 statt 0.98 in der Fettphase werden nur 42 % des Schwefels in Form von SO₂ freigesetzt. 54 % des Schwefels werden als H₂S und 4 % als COS emittiert. Nach der Desulfatisierung mit diesen Parametern ist ein deutlich verbessertes NO_x-Speicherverhalten festzustellen. Die Verteilung des Schwefels auf die drei betrachteten Komponenten ist damit ähnlich wie bei einer Desulfatisierung mit konstant $\lambda = 0.98$ (vgl. Abb. 7-4). Die maximale H₂S-Emission ist bei dem hier betrachteten Versuch zwar deutlich höher als bei konstant $\lambda = 0.98$, wegen der periodisch unterbrochenen Schwefelfreisetzung werden aber immer nur kurzzeitig hohe Werte erreicht.

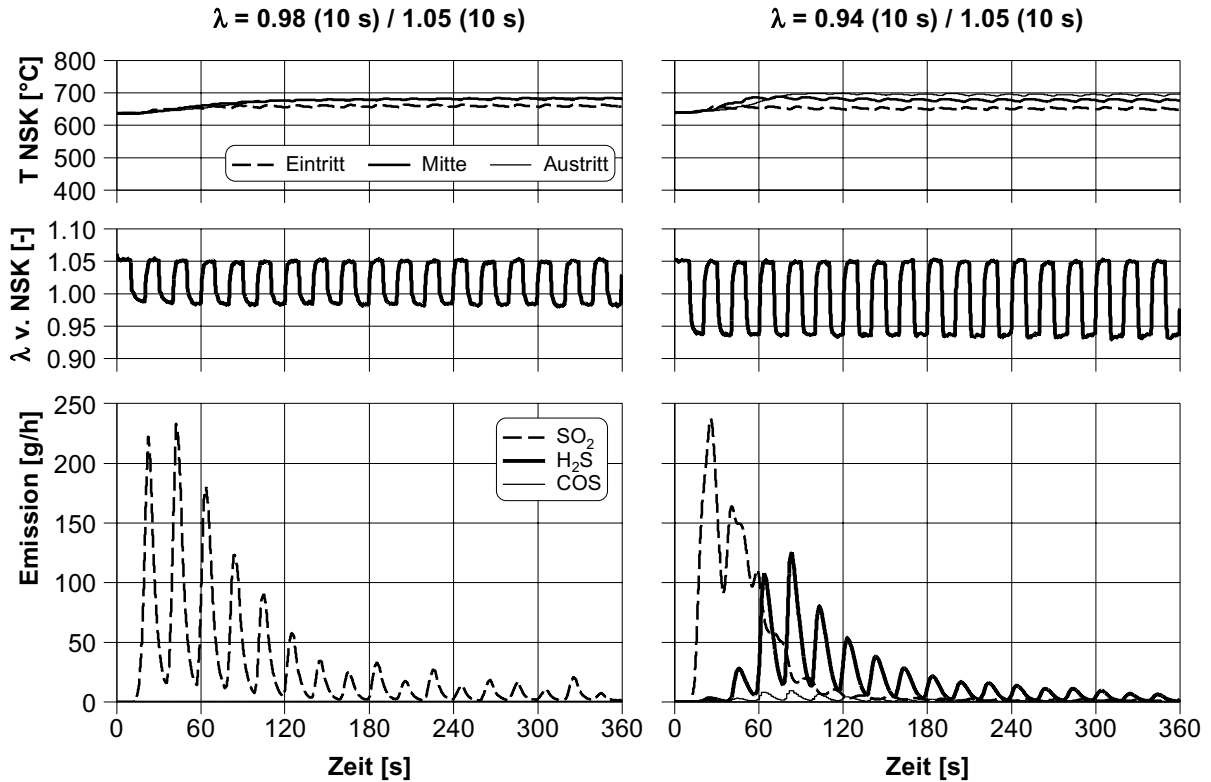


Abb. 7-7: Desulfatisierungen mit periodisch wechselndem Luftverhältnis ($n = 2500 \text{ 1/min}$, $p_{me} = 3 \text{ bar}$, NSK verschwefelt mit ca. 5 g)

Da die Schwefel-Emission, wie gerade festgestellt, bei der hier betrachteten Desulfatisierungsstrategie (10 s $\lambda = 0.94$, 10 s $\lambda = 1.05$) ähnlich dem Verhalten bei der Desulfatisierung mit konstant $\lambda = 0.98$ ist, werden nachfolgend auch die NO_x-, HC- und CO-Emissionen dieser beiden Varianten miteinander verglichen (Abb. 7-8). Bei beiden Varianten sind die mittleren HC- und CO-Emissionen auf ähnlichem Niveau. Hinsichtlich der NO_x-Emission ist die Variante mit periodisch wechselndem Luftverhältnis jedoch wesentlich ungünstiger, da in den Magerphasen NO_x-Durchbrüche auftreten. Wegen der hohen Temperatur des NO_x-Speicher-Katalysators ist in diesen Magerphasen keine NO_x-Speicherung möglich. Somit ist hier ein deutlicher Vorteil für eine Desulfatisierungsstrategie mit konstantem Luftverhältnis zu erkennen.

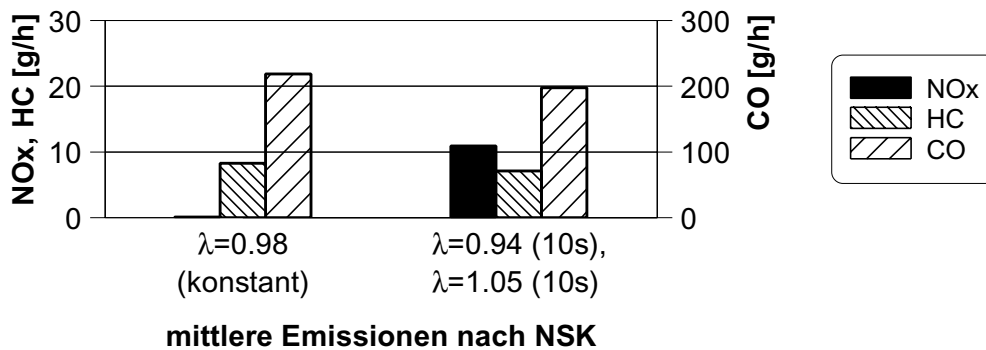


Abb. 7-8: Emissionen nach NO_x-Speicher-Katalysator bei verschiedenen Desulfatisierungsstrategien ($n = 2500 \text{ 1/min}$, $p_{me} = 3 \text{ bar}$)

Im Folgenden wird der Versuch beschrieben, durch Optimierung der Dauer der Fettphase eine wirksame Desulfatisierung bei minimaler H₂S-Emission zu realisieren. Als Luftverhältnis in der Fettphase wurde $\lambda = 0.85$ gewählt. Die Fettphase wurde ausgehend von 1 s schrittweise verlängert bis auf 180 s. Die Dauer der Magerphase mit $\lambda = 1.05$ betrug konstant 15 s. Abb. 7-9 zeigt den Verlauf des Luftverhältnisses und die Schwefel-Emission über die gesamte Versuchsdauer von 26 min. Hierbei kann die H₂S-Emission auf Werte von maximal etwa 7 g/h begrenzt werden. Die geringe Schwefel-Emission bei der sehr langen Phase mit $\lambda = 0.85$ am Ende des Versuchs weist darauf hin, daß die Schwefelfreisetzung praktisch abgeschlossen ist.

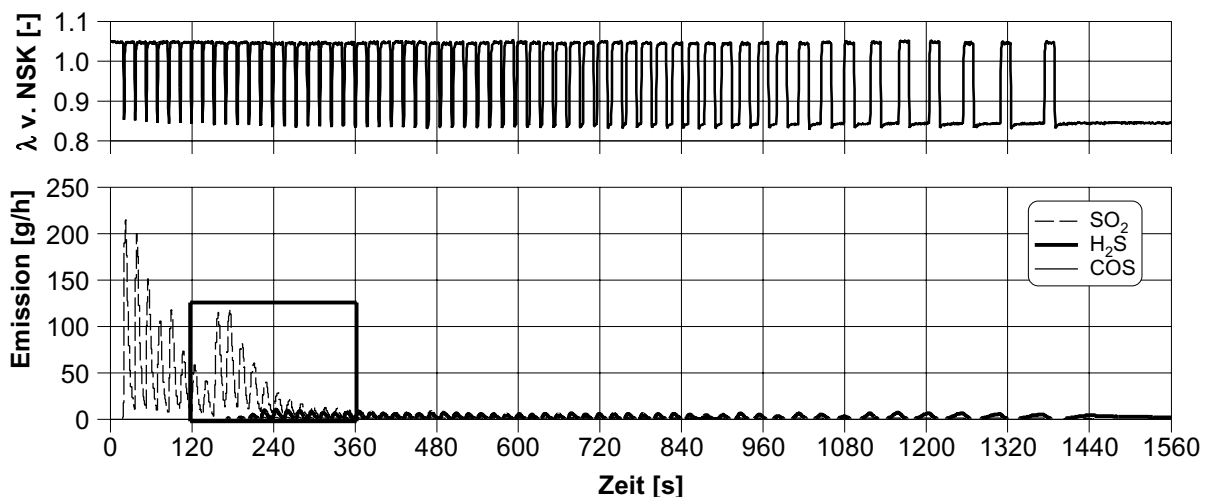


Abb. 7-9: Desulfatisierung mit periodischem Wechsel zwischen $\lambda = 1.05$ (15 s) und $\lambda = 0.85$, schrittweise Verlängerung der Phase mit $\lambda = 0.85$ von 1 s auf 180 s ($n = 2500$ 1/min, $p_{me} = 3$ bar, NSK verschwefelt mit ca. 6 g)

Abb. 7-10 zeigt den in Abb. 7-9 gekennzeichneten Ausschnitt in vergrößerter Darstellung, wobei hier zusätzlich das mit der Meßsonde nach NOx-Speicher-Katalysator gemessene Luftverhältnis und das Signal der binären Lambdasonde nach NOx-Speicher-Katalysator dargestellt sind. In diesem Ausschnitt beträgt die Dauer der Fettphase zunächst 1.7 s, ab $t = 150$ s beträgt sie 2 s, ab $t = 200$ s 2.4 s und ab $t = 340$ s 2.7 s.

Man erkennt, daß bei einer Dauer der Fettphase von 1.7 s nur SO₂ emittiert wird. Es ist davon auszugehen, daß die tatsächlichen SO₂-Spitzen schmaler und höher sind, sie können jedoch mit dem CIMS nicht exakt aufgelöst werden. Das gestrichelt eingezeichnete Fenster kennzeichnet eine Fettphase. In dieser kurzen Phase kann das Luftverhältnis von $\lambda = 0.85$ von den Lambdasonden nach NOx-Speicher-Katalysator nicht detektiert werden. Hier macht sich die O₂-Speicherfähigkeit des NOx-Speicher-Katalysators bemerkbar. Nach Verlängerung der Fettphase auf 2.4 s treten neben der SO₂-Emission auch geringe H₂S- und COS-Emissionen auf. In diesem Stadium wird von der Breitband-Lambdasonde nach NOx-Speicher-Katalysator gerade ein leichter Abfall des Luftverhältnisses auf $\lambda < 1$ erkannt, bevor wieder zu $\lambda = 1.05$ gewechselt wird. Das Signal der binären Lambdasonde erreicht während der 2.4 s langen Fettphase einen Wert von 0.8 V. Da der Verbrauch von gespeichertem Sauerstoff in den Fettphasen gegenüber der erneuten O₂-Speicherung in den Magerphasen überwiegt, gewinnt der Abfall der SONDENSIGNALE auf $\lambda < 1$ trotz zunächst gleichbleibender Dauer der Fettphase mit

jedem Zyklus an Ausprägung. Gleichzeitig nimmt auch die Höhe des H₂S-Peaks zu. Dieses Verhalten wird durch die Verlängerung der Fettphase auf 2.7 s noch verstärkt.

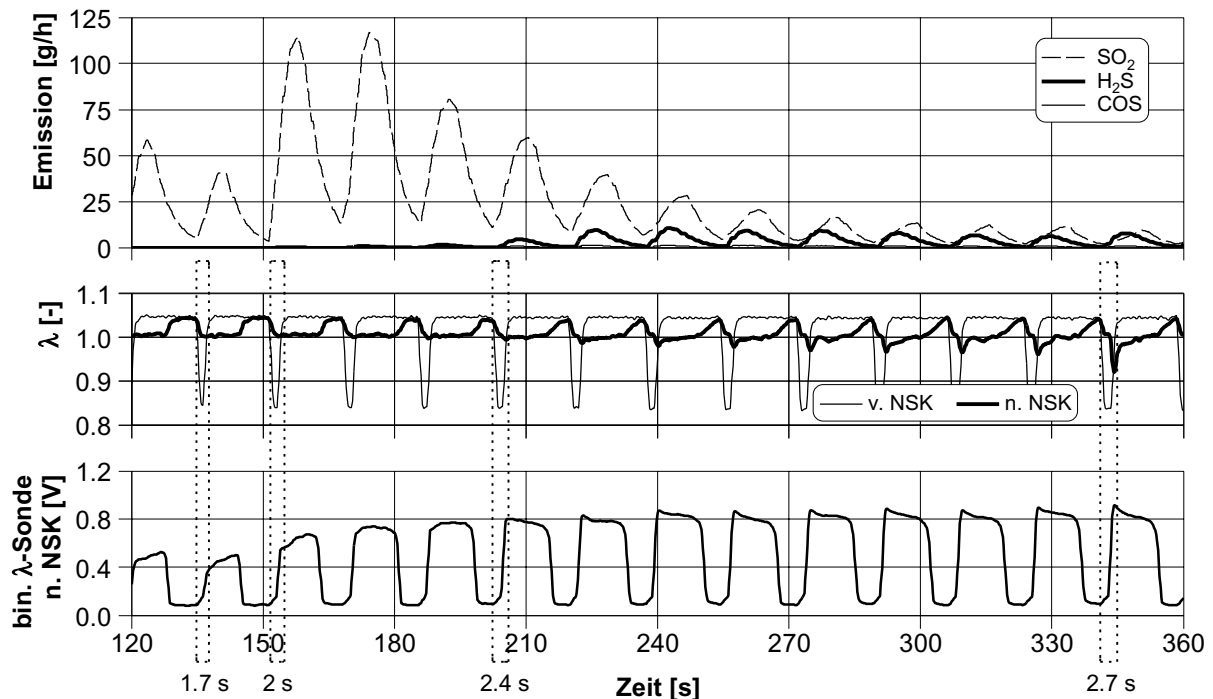


Abb. 7-10: Desulfatisierung mit periodischem Wechsel zwischen $\lambda = 1.05$ (15 s) und $\lambda = 0.85$, schrittweise Verlängerung der Phase mit $\lambda = 0.85$ von 1.7 s auf 2.7 s, Ausschnitt aus Abb. 7-9
($n = 2500$ 1/min, $p_{me} = 3$ bar, NSK verschwefelt mit ca. 6 g)

7.1.2.4 Zusammenhang zwischen dem Luftverhältnis nach NO_x-Speicher-Katalysator und der Wirksamkeit der Desulfatisierung

Die oben beschriebenen Untersuchungen zeigen, daß ein Zusammenhang zwischen dem Einsetzen der H₂S-Bildung und dem nach NO_x-Speicher-Katalysator feststellbaren Luftverhältnis besteht. Hierbei können folgende Aussagen gemacht werden:

1. Die optimale Wirksamkeit der Drei-Wege-Funktion im NO_x-Speicher-Katalysator wird erzielt, wenn das Signal der binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator zwischen 0.55 und 0.65 V liegt. Dies geht aus Abb. 7-6 hervor und wird auch in [10] festgestellt.
2. Bei einer Desulfatisierung mit nahezu stöchiometrischem Luftverhältnis (Abb. 7-6) wird SO₂ emittiert, wenn die SONDENSPIGUNG über 0.65 V beträgt. Dies gilt auch für den Versuch mit periodisch zwischen $\lambda = 0.98$ und $\lambda = 1.05$ wechselndem Luftverhältnis (Kap. 7.1.2.3). Bei beiden Versuchen beträgt die SONDENSPIGUNG stets weniger als 0.8 V. Beiden Versuchen ist gemeinsam, daß zwar SO₂ emittiert, aber keine wirksame Desulfatisierung erzielt wird. Somit besteht offensichtlich ein Zusammenhang zwischen der erreichten SONDENSPIGUNG und dem Erfolg der Desulfatisierung.

3. Nach dem Wechsel von $\lambda > 1$ zu $\lambda < 1$ setzt die Bildung von H₂S und COS ein, sobald die binäre Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator eine SONDENSPIGUNG von 0.8 V erreicht. Dieses Verhalten wird in Kap. 7.1.2.3 bei periodisch wechselndem Luftverhältnis diskutiert, ist aber ebenso bei der Desulfatisierung mit konstantem Luftverhältnis festzustellen. Dies geht aus Abb. 7-11 hervor, die einen Ausschnitt aus der in Abb. 7-3 gezeigten Desulfatisierung mit $\lambda = 0.98$ nach magerer Aufheizung darstellt.

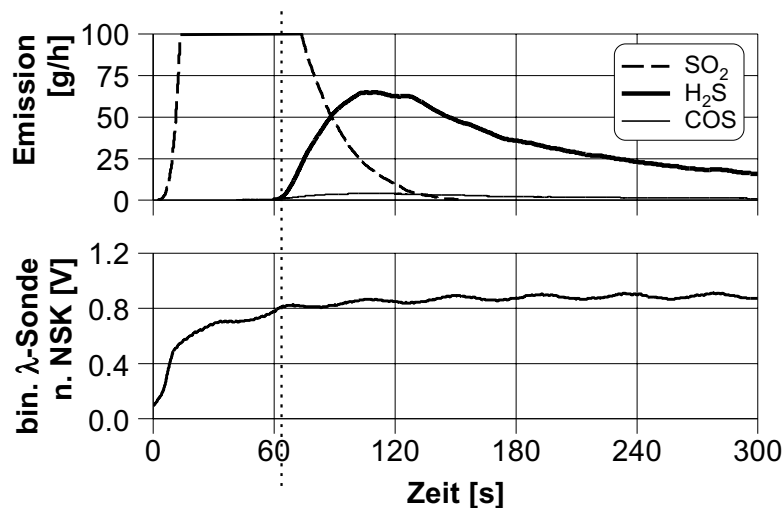


Abb. 7-11: Einsetzen der H₂S-Freisetzung und Signal der binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator bei Desulfatisierung mit $\lambda = 0.98$ ($n = 2500$ l/min, $p_{me} = 3$ bar, magerer Aufheizung)

Alle Desulfatisierungsversuche, bei denen wie hier nach NO_x-Speicher-Katalysator eine SONDENSPIGUNG von mindestens 0.8 V erreicht wird, führen zu einer zufriedenstellenden Wiederherstellung der NO_x-Speicherfähigkeit des NO_x-Speicher-Katalysators.

Die festgestellten Zusammenhänge zwischen dem Signal der binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator und dem Verhalten des NO_x-Speicher-Katalysators werden in Abb. 7-12 veranschaulicht. Hierbei werden die Aussagen in [6] und [105], nach denen eine wirkungsvolle Desulfatisierung nicht ohne H₂S-Bildung möglich zu sein scheint, bestätigt.

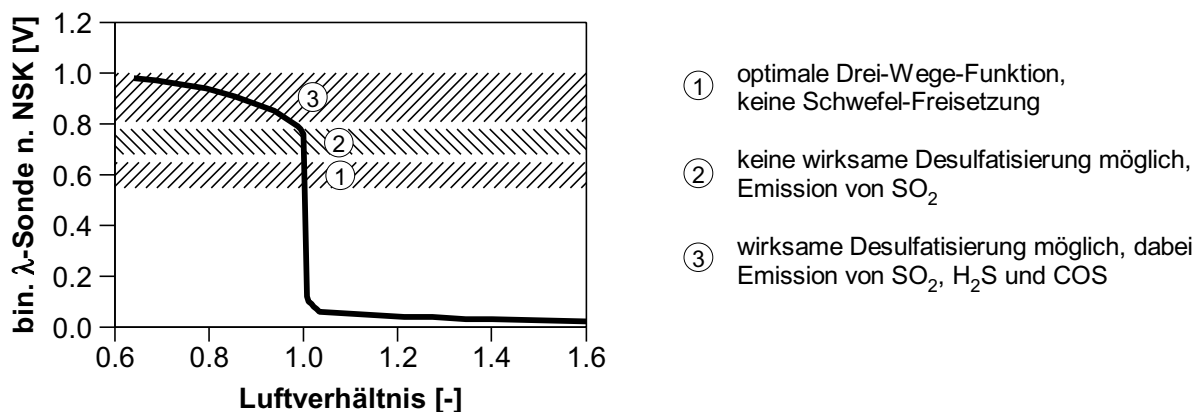


Abb. 7-12: Verhalten des NO_x-Speicher-Katalysators bei der Desulfatisierung in Abhängigkeit des Signals der binären Lambdasonde nach Katalysator

7.1.3 Untersuchungen zur Dauer der Desulfatisierung

Nachfolgend wird der Einfluß der Temperatur und des Luftverhältnisses auf die erforderliche Desulfatisierungsdauer betrachtet. Hierbei wird untersucht, inwieweit bei dem verwendeten NO_x-Speicher-Katalysator Typ A nach 10 min eine vollständige Desulfatisierung erreicht werden kann. Zusätzlich werden Untersuchungen mit sehr kurzer Desulfatisierungsdauer beschrieben.

7.1.3.1 Erforderliche Dauer zur vollständigen Desulfatisierung

In [27, 87, 105] wird festgestellt, daß eine hohe Temperatur und ein kleines Luftverhältnis bei der Desulfatisierung die erforderliche Dauer verringert. Daher wurde eine Versuchsreihe mit verschiedenen Temperaturen (650 °C, 750 °C) und verschiedenen Luftverhältnissen ($\lambda = 0.99, 0.85$) durchgeführt. Zuvor wurden dem Katalysator jeweils etwa 6 g Schwefel zugeführt. Anschließend wurde er bei $\lambda = 1.05$ unter Einsatz von Spätzündung aufgeheizt. Erst nach Erreichen der angestrebten Katalysator-Temperatur wurde zu $\lambda < 1$ gewechselt. Hierdurch ist eine gute Vergleichbarkeit der Katalysator-Temperaturen bei den verschiedenen Versuchen gegeben. Zeitgleich mit dem Wechsel zu $\lambda < 1$ wurden angesaugte Luftmasse und Zündwinkel so angepaßt, daß sowohl die Motorlast als auch die Katalysator-Temperatur konstant gehalten wurden. Nach 10 min wurde wieder zu $\lambda = 1.05$ gewechselt und somit die Schwefel-Freisetzung abgebrochen.

Um den Grad der Vollständigkeit nach einer Desulfatisierung über 10 min beurteilen zu können, wurde nach jedem Versuch eine zweite, sehr gründliche Desulfatisierung über 30 min durchgeführt. Als Parameter wurden bei dieser zweiten Desulfatisierung für alle Varianten einheitlich eine Temperatur von 750 °C und ein Luftverhältnis von $\lambda = 0.85$ gewählt. Wie aus den Untersuchungen hervorgeht, ist die Desulfatisierung mit diesen Parametern im Vergleich zu den anderen betrachteten Varianten am wirkungsvollsten. Es wird davon ausgegangen, daß nach dieser zweiten Desulfatisierung die Schwefel-Freisetzung abgeschlossen ist und keine weitere Verbesserung der NO_x-Speicherfähigkeit mehr möglich ist.

Der bei einer Desulfatisierungsdauer von 10 min erreichte Grad der Vollständigkeit kann durch das Verhältnis der bei der ersten Desulfatisierung freigesetzten Schwefelmasse $m_{S,1}$ zu der insgesamt bei beiden Desulfatisierungen freigesetzten Masse ($m_{S,1} + m_{S,2}$) beschrieben werden. Auch das Verhältnis der NO_x-Speicherkapazität $m_{NOx\ 50\%,1}$ nach der ersten Desulfatisierung zum entsprechenden Wert nach der zweiten Desulfatisierung $m_{NOx\ 50\%,2}$ liefert eine Aussage über die Vollständigkeit der Desulfatisierung.

Abb. 7-13 zeigt diese Größen für die betrachteten Versuche mit verschiedenen Temperaturen und Luftverhältnissen. Man erkennt, daß eine Anhebung der Temperatur und die Wahl eines kleinen Luftverhältnisses bei der Desulfatisierung Vorteile hinsichtlich der Vollständigkeit der Desulfatisierung bei einer vorgegebenen Dauer bieten. Die Angaben in der Literatur werden somit bestätigt. Hierbei hat die Anhebung der Temperatur von 650 °C auf 750 °C einen stärkeren Effekt als die Verringerung des Luftverhältnisses von $\lambda = 0.99$ auf $\lambda = 0.85$. Nach 10 min ist die Desulfatisierung bei 650 °C und $\lambda = 0.99$ noch nicht einmal zur Hälfte abgeschlossen. Bei 750 °C und $\lambda = 0.85$ kann die Desulfatisierung dagegen nach 10 min zu 87 % abgeschlossen werden.

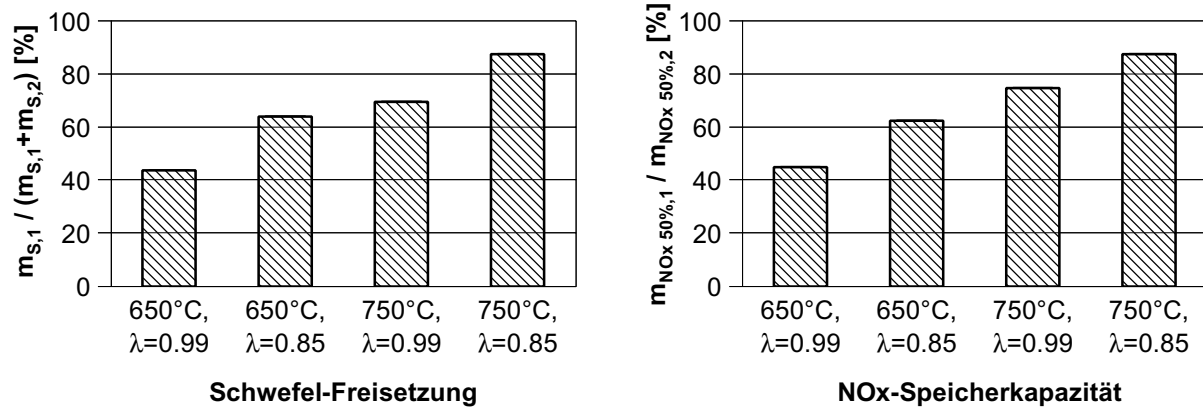


Abb. 7-13: Auswertung von Desulfatisierungen bei verschiedenen Luftverhältnissen und Temperaturen
 1. Desulfatisierung: T_{NSK} und λ wie angegeben, Dauer 10 min
 2. Desulfatisierung: $T_{NSK} = 750$ °C, $\lambda = 0.85$, Dauer 30 min
 (NSK verschwefelt mit ca. 6 g)

Für eine vollständige Desulfatisierung ist eine Dauer von 10 min jedoch selbst bei günstigen Bedingungen ($T_{NSK} = 750$ °C, $\lambda = 0.85$) als zu kurz anzusehen. Es ist davon auszugehen, daß auch unter diesen Bedingungen eine Desulfatisierungsdauer von mindestens 15 min erforderlich ist, um eine annähernd vollständige Desulfatisierung zu realisieren.

Diese Ergebnisse zeigen, daß die erforderliche Dauer zur Desulfatisierung des betrachteten NOx-Speicher-Katalysators (Typ A) größer ist als die Werte, die in [27, 87, 99] genannt werden (vgl. Kap. 3.3.2). Ursache für die Abweichungen der Angaben sind neben dem Einsatz abweichender Katalysatortypen auch Unterschiede in der Definition der erforderlichen Desulfatisierungsdauer. Hingegen stimmt die Angabe in [39], daß nach 10 min die nach langer Desulfatisierung erreichbare NOx-Speicherkapazität erst zu etwa 75 % wiederhergestellt wird, mit dem hier festgestellten Verhalten näherungsweise überein.

7.1.3.2 Verhalten bei sehr kurzer Desulfatisierungsdauer

Im realen Fahrbetrieb ist zu erwarten, daß die angestrebte Desulfatisierungsdauer je nach Fahrzustand nicht immer erreicht werden kann. Somit muß die Desulfatisierung unterbrochen werden. Nachfolgend wird dargestellt, wie sich ein Abbruch der Desulfatisierung auswirkt. Hierzu wurden Untersuchungen mit kurzen aufeinanderfolgenden Desulfatisierungen durchgeführt. Der NOx-Speicher-Katalysator wurde zuvor wie bei den bisherigen Versuchen verschwefelt. Während der Katalysator-Aufheizung zur Desulfatisierung wurde $\lambda = 1.05$ eingestellt, die Desulfatisierung wurde bei $T_{NSK} = 750$ °C und $\lambda = 0.99$ durchgeführt. Nach der angegebenen Dauer zwischen 30 s und 120 s wurde wieder zu $\lambda = 1.05$ gewechselt. Zwischen den einzelnen Desulfatisierungsphasen wurde der NOx-Speicher-Katalysator auf ca. 420 °C abgekühlt, um Messungen der NOx-Speicherkapazität $m_{NOx\ 50\%}$ und der NOx-Konversion $K_{NOx\ 60/3}$ im Mager/Fett-Betrieb durchzuführen.

In Abb. 7-14 ist die Schwefelmasse dargestellt, die in den einzelnen Phasen freigesetzt wird. Wie man erkennt, wird der Schwefel bei den ersten beiden Desulfatisierungen mit einer Dauer von jeweils 30 s ausschließlich als SO₂ freigesetzt. Bei den nachfolgenden Desulfatisierungsphasen ist dagegen eine

zunehmende H₂S-Emission festzustellen. Das Verhältnis der freigesetzten Schwefelmasse zur Dauer der Desulfatisierungsphase ist in der ersten Phase am höchsten.

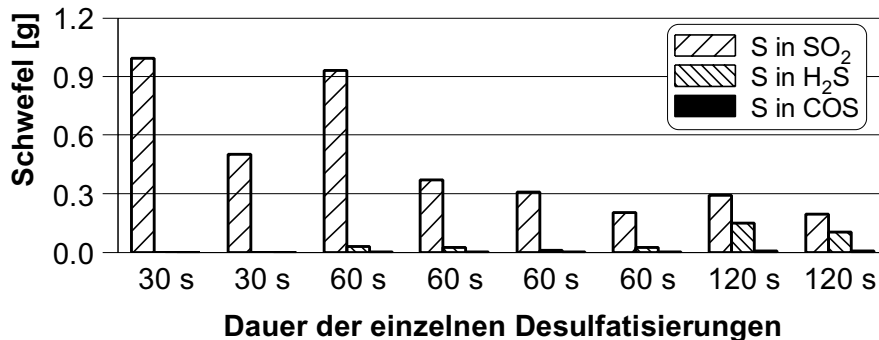


Abb. 7-14: Schwefel-Freisetzung bei mehreren kurzen Desulfatisierungen
($n = 2500 \text{ l/min}$, $p_{me} = 3 \text{ bar}$, $\lambda = 0.99$, NSK verschwefelt mit ca. 5 g)

In Abb. 7-15 ist die NO_x-Speicherkapazität $m_{\text{NO}_x 50\%}$ und die NO_x-Konversion im Mager/Fett-Zyklus $K_{\text{NO}_x 60/3}$ über der summierten Desulfatisierungsdauer dargestellt. Nach den ersten beiden Desulfatisierungsphasen mit jeweils nur 30 s Dauer wird eine Verschlechterung gegenüber dem Zustand direkt nach der Verschwefelung festgestellt. Hierfür ist folgende Erklärung denkbar: Es ist bekannt, daß der Schwefel im Magerbetrieb vor allem im Eintrittsbereich des NO_x-Speicher-Katalysators gespeichert wird (vgl. Kap. 3.3.1). Bei der Desulfatisierung findet dann vermutlich ein relativ langsamer Transportvorgang des freigesetzten Schwefels in Strömungsrichtung durch den Katalysator statt. Bei Wechsel zu mageren Bedingungen nach kurzer Desulfatisierungsdauer wird der noch in großer Menge im Katalysator befindliche Schwefel wieder als Sulfat gespeichert, wobei leicht zugängliche Speicherplätze bevorzugt genutzt werden. Hierdurch wird die NO_x-Speicherfähigkeit gegenüber dem Zustand vor der Desulfatisierung verschlechtert.

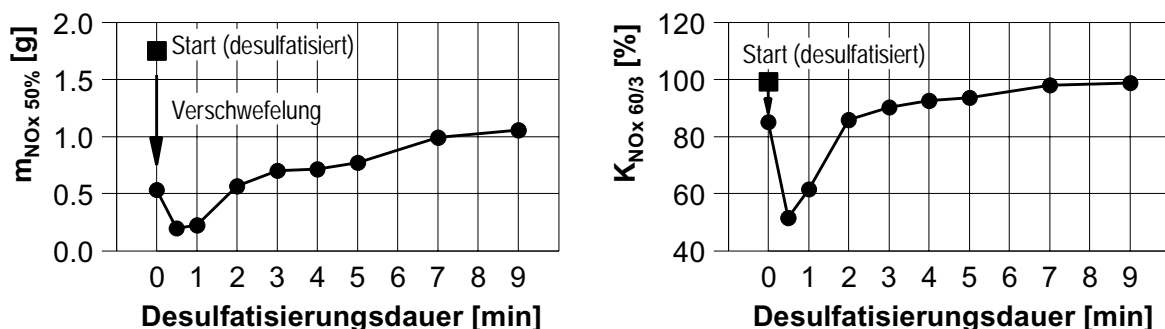


Abb. 7-15: NO_x-Speicherfähigkeit und NO_x-Konversion nach mehreren sehr kurzen Desulfatisierungen, Darstellung über summierter Dauer
($n = 2500 \text{ l/min}$, $p_{me} = 3 \text{ bar}$, $\lambda = 0.99$, NSK verschwefelt mit ca. 5 g)

Es sei angemerkt, daß das Signal der binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator in diesen beiden Phasen maximal 0.65 V beträgt. Somit werden die in Kap. 7.1.2.4 dargestellten Erkenntnisse bestätigt.

Nach einer summierten Desulfatisierungsdauer von 2 min wird das NO_x-Speicherverhalten vor der Desulfatisierung wieder erreicht. Die insgesamt dritte Desulfatisierung mit einer Dauer von 60 s ist hierbei offensichtlich wirksamer als die zwei vorangegangenen Desulfatisierungen über je 30 s. Vermutlich ist hier entscheidend, daß bei der 60 s langen Desulfatisierung auch nach NO_x-Speicher-Katalysator ein Luftverhältnis deutlich kleiner als $\lambda = 1$ festzustellen war. Das Signal der binären Lambdasonde stieg in dieser Phase bis auf 0.83 V.

Die NO_x-Speicherkapazität $m_{\text{NO}_x 50\%}$ ist auch nach insgesamt 9 min noch deutlich niedriger als vor der Verschwefelung. Die NO_x-Konversion $K_{\text{NO}_x 60/3}$ ist dagegen bereits nach 7 min wieder fast so hoch wie vor der Verschwefelung. Hier wird deutlich, daß die erzielte NO_x-Konversion im betrachteten Mager/Fett-Zyklus den Zustand des NO_x-Speicher-Katalysators nur unzureichend beschreibt.

Nach einer sehr kurzen Desulfatisierung tritt also eine Verschlechterung des Speicherverhaltens gegenüber dem Zustand vor der Desulfatisierung auf. Im realen Fahrbetrieb kann es vorkommen, daß eine Desulfatisierung nach kurzer Zeit abgebrochen werden muß, beispielsweise nach dem Wechsel von einer Überlandfahrt zu Stadtverkehr oder auch bei einer Unterbrechung der Fahrt. In diesen Fällen sollte bis zu einer Fortsetzung der Desulfatisierung auf Magerbetrieb verzichtet werden, da andernfalls das ungünstige Speicherverhalten zu einer hohen NO_x-Emission nach NO_x-Speicher-Katalysator führen würde. Darüber hinaus wären häufige Nitrat-Regenerationen erforderlich, was einen Anstieg der HC- und CO-Emissionen mit sich bringen und den Verbrauchsvorteil durch Magerbetrieb deutlich verringern würde.

Aus der hier beschriebenen Versuchsreihe wird deutlich, daß die Durchführung einer Desulfatisierung in mehreren einzelnen Phasen prinzipiell möglich ist, sofern diese Phasen nicht zu kurz sind.

Das dargestellte Ergebnis bezieht sich nur auf die Desulfatisierung mit $\lambda = 0.99$. Bei kleinerem Luftverhältnis würde möglicherweise die Verschlechterung des NO_x-Speicherverhaltens nach den ersten beiden kurzen Desulfatisierungsphasen nicht auftreten. Hierzu wurden jedoch keine Versuche durchgeführt, da ein Luftverhältnis von $\lambda = 0.99$ zur Desulfatisierung im Hinblick auf eine geringe H₂S-Emission zu bevorzugen ist (Kap. 7.1.2.2).

7.1.4 Bewertung der untersuchten Verfahren zur Desulfatisierung

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß die unerwünschte Bildung von H₂S durch Wahl eines Luftverhältnisses nahe $\lambda = 1$ gering gehalten werden kann. Die bei $\lambda = 0.98$ bzw. $\lambda = 0.99$ erzielten Maximalwerte für die H₂S-Emission sind erheblich niedriger als beispielsweise bei $\lambda = 0.9$. Die H₂S-Maximalwerte können auch dadurch verringert werden, daß bereits während der Aufheizung das Luftverhältnis für die Desulfatisierung vorgegeben wird.

Bei einem stöchiometrischen Luftverhältnis ist keine wirksame Desulfatisierung möglich. Der Bereich für das Luftverhältnis, in dem eine wirksame Desulfatisierung bei zugleich niedriger H₂S-Emission möglich ist, ist somit sehr schmal. Mit Hilfe einer binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator kann dieser Bereich jedoch aufgelöst werden.

Auch durch einen periodischen Wechsel des Luftverhältnisses bei der Desulfatisierung kann die H₂S-Bildung nicht vollständig vermieden werden. Durch die

Unterbrechung der Schwefelfreisetzung in den Magerphasen kann die Freisetzung jedoch besser kontrolliert werden. Ein Nachteil dieses Verfahrens ist jedoch das Auftreten von NO_x-Durchbrüchen nach Katalysator in den Magerphasen der Desulfatisierungsprozedur. Bei den folgenden Untersuchungen werden daher nur noch Desulfatisierungen mit konstantem Luftverhältnis durchgeführt.

Der Desulfatisierungsgrad nach einer vorgegebenen Desulfatisierungsdauer ist abhängig von der Katalysator-Temperatur und dem Luftverhältnis. Selbst bei günstigen Bedingungen ($T_{NSK} = 750 \text{ °C}$, $\lambda = 0.85$) wird bei dem untersuchten Katalysatortyp nach 10 min noch keine vollständige Desulfatisierung erreicht.

7.2 Entwicklung einer Strategie zur Desulfatisierung

Hinsichtlich der Durchführung von Desulfatisierungen im realen Fahrbetrieb ergeben sich prinzipiell folgende Fragestellungen:

1. Mit welchen Parametern soll die Desulfatisierung durchgeführt werden?
2. In welchen Fahrzuständen kann eine Desulfatisierung durchgeführt werden?
3. Wie häufig ist eine Desulfatisierung notwendig?

Wie aus dem vorangehenden Kapitel hervorgeht, sind als wesentliche Parameter für die Desulfatisierung folgende Größen zu nennen: das Luftverhältnis, die Katalysator-Temperatur, die Dauer der Desulfatisierung und die Intervalle zwischen den Desulfatisierungen. Nachfolgend werden die Zielkonflikte bei der Optimierung dieser Parameter und Aspekte der Realisierung einer Desulfatisierung im realen Fahrbetrieb diskutiert.

7.2.1 Luftverhältnis bei der Desulfatisierung

7.2.1.1 Optimales Luftverhältnis

Bei der Optimierung der verschiedenen Parameter müssen unterschiedliche Zielsetzungen verfolgt werden. Für das Luftverhältnis bei der Desulfatisierung sind diese in Tab. 7-2 genannt.

Für eine möglichst gründliche Desulfatisierung bei vorgegebener Zeitdauer sind kleine Luftverhältnisse (z.B. $\lambda = 0.85$) vorteilhaft, während für die Erfüllung der restlichen Anforderungen Luftverhältnisse nahe $\lambda = 1$ (z.B. $\lambda = 0.99$) zu bevorzugen sind. Insbesondere führt ein kleineres Luftverhältnis zu einer Absenkung der Abgastemperatur, wodurch die angestrebten Katalysator-Temperaturen nur durch stärkere Heizmaßnahmen mit entsprechendem Kraftstoff-Mehrverbrauch erreicht werden.

Zielsetzung	Luftverhältnis
Wiederherstellung der NO _x -Speicherfähigkeit	klein
geringe H ₂ S-Emission während der Desulfatisierung	nahe $\lambda=1$
geringe NO _x , CO- und HC-Emission nach NO _x -Speicher-Katalysator während der Desulfatisierung	nahe $\lambda=1$
geringer Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Betrieb mit Kraftstoff-Überschuß ($\lambda < 1$)	nahe $\lambda=1$
hohe Abgastemperatur für geringen Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Katalysator-Heizmaßnahmen	nahe $\lambda=1$

Tab. 7-2: Zielsetzungen der Desulfatisierungsstrategie und hieraus folgende Forderungen hinsichtlich des Luftverhältnisses

Eine geringe H₂S-Emission während der Desulfatisierung erscheint als die wichtigste Anforderung an eine Desulfatisierungsstrategie. Daher ist ein Luftverhältnis nahe $\lambda = 1$ anzustreben, obwohl hierdurch die Desulfatisierung in gleicher Zeit weniger wirksam ist als bei kleinerem Luftverhältnis und somit eine längere Desulfatisierungsdauer erforderlich ist.

7.2.1.2 Vollast-Anfettung während einer Desulfatisierung

Wie in Kap. 2.2.1 beschrieben, wird bei Vollast üblicherweise ein Luftverhältnis zwischen $\lambda = 0.85$ und 0.95 eingestellt. Somit besteht bei Vollast-Anfettung während einer Desulfatisierung die Gefahr einer hohen H₂S-Emission. Dies gilt insbesondere zu Beginn der Desulfatisierung, wenn noch eine hohe Schwefelmasse im NO_x-Speicher-Katalysator gespeichert ist. Der Einfluß des Luftverhältnisses auf die maximale H₂S-Emission wurde bereits in Abb. 7-5 dargestellt.

Der einfachste Lösungsansatz ist ein Verzicht auf die Vollast-Anfettung in Phasen mit der Gefahr einer hohen H₂S-Emission. Dies wäre dann notwendig, wenn der Katalysator bei einer relativ hohen Schwefelbeladung die für die Schwefelfreisetzung erforderliche Temperatur erreicht. Nach einer Desulfatisierungsdauer von etwa 5 min kann die Vollast-Anfettung wieder zugelassen werden, da dann auch bei kleinen Luftverhältnissen keine hohe H₂S-Emission mehr auftritt (vgl. Abb. 7-3 u.a.). Bei Verzicht auf eine Vollast-Anfettung ist allerdings eine leichte Drehmomenteinbuße in Kauf zu nehmen (vgl. Kap. 2.2.1). Zudem könnte je nach Fahrzustand eine unzulässig hohe Katalysator-Temperatur erreicht werden.

Die Problematik der H₂S-Bildung in Phasen mit Vollast-Anfettung ist hinsichtlich der Vermeidung einer Geruchsbildung von wesentlicher Bedeutung. In den noch folgenden Kapiteln 7.2.4.2 und 7.2.5 werden weitere Ansätze zur Minimierung der H₂S-Emission in den kritischen Fällen einer Vollast-Anfettung beschrieben.

7.2.2 Katalysator-Temperatur bei der Desulfatisierung

7.2.2.1 Optimale Katalysator-Temperatur

Zur Desulfatisierung sind Katalysator-Temperaturen über 600 °C erforderlich. In Kap. 7.1.3.1 wurde festgestellt, daß durch Erhöhung der Temperatur zur Desulfatisierung auf 750 °C während einer vorgegebenen Dauer eine wirksamere Desulfatisierung möglich ist als bei niedrigeren Temperaturen. Allerdings wird eine Katalysator-Temperatur von 750 °C im Fahrbetrieb meist nur mit gezielten Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung erreicht. Zudem besteht die Gefahr einer thermischen Alterung des NO_x-Speicher-Katalysators bei zu hohen Temperaturen. Dieser Zielkonflikt ist in Tab. 7-3 zusammengefaßt. Als Kompromiß erscheint eine Temperatur von etwa 700 °C zur Desulfatisierung geeignet. Eine bedarfsgerechtere Wahl der Temperatur zur Desulfatisierung wird durch eine Strategie ermöglicht, die zwei verschiedene Desulfatisierungsprozeduren bei unterschiedlichen Temperaturen vorsieht. In Kap. 7.2.4.2 wird eine derartige Strategie untersucht.

Zielsetzung	Temperatur
Wiederherstellung der NO _x -Speicherfähigkeit	hoch
einfache Realisierung der Desulfatisierung im Fahrbetrieb	niedrig
geringer Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung	niedrig
Vermeidung einer thermischen Alterung des NO _x -Speicher-Katalysators während der Desulfatisierung	niedrig

Tab. 7-3: Zielsetzungen der Desulfatisierungsstrategie und hieraus folgende Forderungen hinsichtlich der Katalysator-Temperatur

7.2.2.2 Katalysator-Temperaturen im realen Fahrbetrieb

Eine Diskussion der zur Desulfatisierung im Fahrbetrieb erreichbaren Temperaturen setzt die Kenntnis der unter regulären Bedingungen auftretenden Katalysator-Temperaturen voraus. Hierzu wurden mit dem Versuchsfahrzeug verschiedene Meßfahrten auf repräsentativen Fahrstrecken durchgeführt. Bei allen Fahrten wurde eine zurückhaltende Fahrweise gewählt, um einen eher ungünstigen Fall hinsichtlich der erreichbaren Katalysator-Temperaturen darzustellen. Die Überland- und Autobahnfahrten wurden bei geringer Verkehrsdichte durchgeführt und weisen hohe Anteile mit näherungsweise konstanter Fahrgeschwindigkeit auf. Auch hierdurch wurden bei den Messungen eher geringe Katalysator-Temperaturen erreicht.

Wie man in Abb. 7-16 erkennt, wurden die zur Desulfatisierung erforderlichen Temperaturen $T_{NSK} > 600$ °C im Stadtverkehr überhaupt nicht und bei Fahrt auf Bundesstraßen nur mit einem sehr geringen Zeitanteil erreicht. Bei Autobahnfahrt bis maximal 140 km/h sind die Katalysator-Temperaturen dagegen zeitweise ausreichend für eine Desulfatisierung, wenngleich die angestrebte Temperatur von etwa 700 °C nicht erreicht wird.

Stadtverkehr

Großstadt, mittlere Verkehrsdichte
 $v \leq 60$ km/h, Durchschnitt 27 km/h
 Zeitanteil Leerlauf 34 %
 Steigungen/Gefälle bis ca. 6 %

Überlandfahrt

Bundesstraßen, geringe Verkehrsdichte
 $v \leq 105$ km/h, Durchschnitt 71 km/h
 Steigungen/Gefälle bis ca. 8 %

Autobahnfahrt

geringe Verkehrsdichte
 $v \leq 140$ km/h, Durchschnitt 115 km/h
 Steigungen/Gefälle bis ca. 4 %

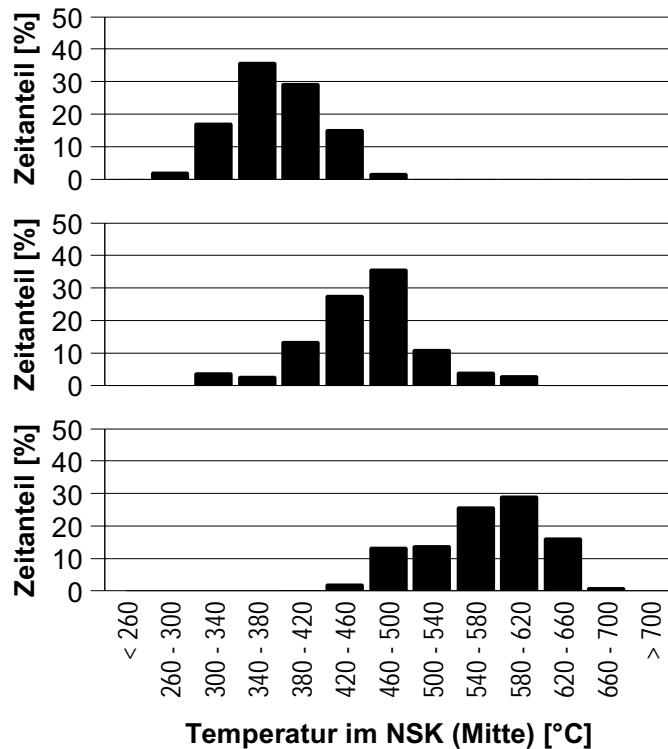


Abb. 7-16: Zeitliche Verteilung der Temperatur im NO_x-Speicher-Katalysator auf verschiedenen Fahrstrecken (zurückhaltende Fahrweise, Umgebungstemperatur 10 – 15 °C, Aufzeichnungsdauer jeweils 80 – 160 min)

7.2.2.3 Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung

Im einfachsten Fall werden im Fahrbetrieb auch ohne gezielte Maßnahmen ausreichend hohe Katalysator-Temperaturen für regelmäßige Desulfatisierungen erreicht, beispielsweise bei einer Autobahnfahrt (vgl. Abb. 7-16) oder einer langen Steigungsstrecke. Diese Phasen können zur Desulfatisierung genutzt werden, indem ein Luftverhältnis $\lambda < 1$ (z.B. $\lambda = 0.99$) vorgegeben wird. Hierdurch wird ein praktisch vernachlässigbarer Mehrverbrauch gegenüber $\lambda=1$ -Betrieb erzielt. Eine Desulfatisierung muß jedoch auch bei Fahrzeugen möglich sein, die ausschließlich im Stadtverkehr und auf Überlandfahrten bewegt werden. Daher müssen gezielte Maßnahmen zur Anhebung der Katalysator-Temperatur vorgesehen werden, die je nach Einsatzbedingungen des Fahrzeugs mehr oder weniger häufig zum Einsatz kommen.

Aus der Literatur sind verschiedene motorische Verfahren für die Anhebung der Temperatur des NO_x-Speicher-Katalysators zur Desulfatisierung bekannt (Kap. 3.4.4). Die Verfahren mit Spätzündung, Lufteinblasung und Zylinder-Vertrimmung wurden am Versuchsmotor näher untersucht. Abb. 7-17 zeigt einen Vergleich des Kraftstoff-Mehrverbrauchs, der für eine Aufheizung des NO_x-Speicher-Katalysators von 420 auf 660 °C aufzuwenden ist. Die Untersuchungen wurden bei $n = 2500$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar mit einem Luftverhältnis von $\lambda = 0.99$ durchgeführt. Der Betriebspunkt entspricht beim Versuchsfahrzeug etwa einer Fahrgeschwindigkeit von 80 km/h im 4. Gang.

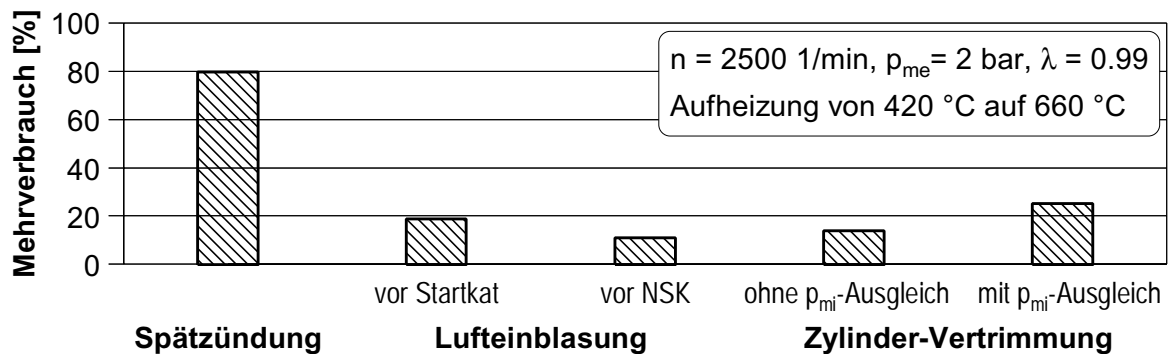


Abb. 7-17: Kraftstoff-Mehrverbrauch bei verschiedenen Maßnahmen zur Aufheizung des NO_x-Speicher-Katalysators um 240 K

Um mit Spätzündung die angestrebte Temperatur des NO_x-Speicher-Katalysators zu erreichen, muß ein Zündwinkel von 15 °KW nach OT eingestellt werden. Hierbei wird der Wirkungsgrad der Verbrennung so stark verschlechtert, daß ein Mehrverbrauch von 80 % gegenüber Betrieb mit optimalem Zündwinkel auftritt.

Für die Lufteinblasung wurden zwei Varianten untersucht: Die Einblasung wurde sowohl motornah vor dem Startkatalysator als auch direkt vor dem NO_x-Speicher-Katalysator durchgeführt. Bei beiden Varianten wurde die zusätzliche Luftmasse so eingestellt, daß insgesamt das angestrebte Luftverhältnis von $\lambda = 0.99$ erreicht wurde. Bei Lufteinblasung vor Startkatalysator wurde der Motor mit $\lambda = 0.85$ betrieben. Der Kraftstoff-Mehrverbrauch lag bei 19 %. Bei der Einblasung vor NO_x-Speicher-Katalysator war ein motorisches Luftverhältnis von $\lambda = 0.89$ ausreichend. Hierbei wurde der im Vergleich niedrigste Mehrverbrauch von 11 % erreicht. Die Einblasung vor NO_x-Speicher-Katalysator ist effektiver, da hier die Wärmefreisetzung gezielt in dem aufzuheizenden Katalysator erfolgt und somit geringere Wärmeverluste auftreten. Allerdings erscheint eine Realisierung im Fahrzeug konstruktiv aufwendiger, während eine motornaher Lufteinblasung als Maßnahme zur schnellen Katalysator-Aufheizung nach dem Kaltstart heute bereits eingesetzt wird. Bei der Angabe des Mehrverbrauchs wurde die Antriebsleistung, die beispielsweise für einen separaten Kompressor erforderlich wäre, nicht berücksichtigt.

Bei dem Verfahren der Zylinder-Vertrimmung wurden die Zylinder 1 und 4 mit $\lambda = 0.76$ und die Zylinder 2 und 3 mit $\lambda = 1.42$ betrieben. Entsprechend der Zündfolge 1-3-4-2 wurde dem Katalysator somit abwechselnd mageres und fettes Abgas zugeführt. Die angesaugte Luftmasse war für alle Zylinder gleich. Insgesamt betrachtet wurde ein Luftverhältnis von $\lambda = 0.99$ erzielt. Für die mager betriebenen Zylinder ergibt sich ein geringerer indizierter Mitteldruck p_{mi} als für die fett betriebenen Zylinder. Dies führt zu einer verstärkten Drehungleichförmigkeit des Motors, die jedoch bei den Untersuchungen im Versuchsfahrzeug kaum spürbar war. Um gleiche indizierte Mitteldrücke aller Zylinder zu erreichen, kann der Zündwinkel der fett betriebenen Zylinder in Richtung „spät“ verschoben werden. Hierdurch wird der Wirkungsgrad der Verbrennung in diesen Zylindern gezielt verschlechtert. Mit dieser Maßnahme ist für die betrachtete Aufheizung des NO_x-Speicher-Katalysators ein Mehrverbrauch von 25 % in Kauf zu nehmen, während ohne den Ausgleich der unterschiedlichen Mitteldrücke nur ein um 14 % höherer Kraftstoffverbrauch gemessen wird.

Wie weitere Untersuchungen gezeigt haben, wird im oben betrachteten Betriebspunkt mit $n = 2500$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar wird sowohl mit Spätzündung als auch mit Zylinder-Vertrimmung eine maximale Temperaturerhöhung um etwa 250 K erreicht. Untersuchungen bei $n = 3000$ 1/min und $p_{me} = 3.5$ bar, entsprechend einer Fahrgeschwindigkeit von ca. 115 km/h im 5. Gang, ergeben eine ähnliche maximale Temperaturerhöhung. Mit Lufteinblasung sind auch noch größere Erhöhungen möglich, wenn kleinere als die oben genannten Luftverhältnisse eingestellt werden. Hierbei wird allerdings die thermische Belastung des Katalysators zunehmend kritisch.

Überträgt man die erreichbare Temperaturerhöhung von 250 K auf die in Abb. 7-16 dargestellten Temperatur-Verteilungen, so zeigt sich, daß auch bei Überlandfahrten und zum Teil auch im Stadtverkehr die Temperaturen zur Desulfatisierung erreicht werden können. Gezielte Fahrversuche haben dies bestätigt. Somit erscheint es nicht erforderlich, aufwendige Maßnahmen wie den Einsatz eines elektrisch beheizten Katalysators, eines Brenners oder einer variablen Abgasanlage vorzusehen. Insgesamt erscheint das Verfahren der Zylinder-Vertrimmung als am besten geeignet, da eine Aufheizung des NO_x-Speicher-Katalysators ohne konstruktiven Aufwand und mit relativ moderatem Kraftstoff-Mehrverbrauch möglich ist. Prinzipiell kann die Wirksamkeit dieses Verfahrens noch gesteigert werden, wenn das magere und fette Abgas erst vor dem NO_x-Speicher-Katalysator zusammengeführt wird. Dies kann, wie in Kap. 3.4.4 erläutert, durch eine zweiflutige Ausführung der Abgasanlage vor dem NO_x-Speicher-Katalysator erreicht werden.

Eine Strategie zur Aufheizung des NO_x-Speicher-Katalysators muß auch die Entscheidung darüber beinhalten, in welchen Fahrzuständen sinnvollerweise Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung eingeleitet werden. In [100, 139] wird vorgeschlagen, die Entscheidung über einen geeigneten Fahrzustand vom aktuellen Motor-Betriebspunkt abhängig zu machen. Diese Vorgehensweise erscheint jedoch ungeeignet, da nur eine kurze Phase des Fahrbetriebs betrachtet wird und somit die Aussage über die Erreichbarkeit der benötigten Temperaturen im weiteren Fahrbetrieb nur eingeschränkt möglich ist.

Die Betrachtung der aktuellen Katalysator-Temperatur, die entweder durch Messung oder als Ausgangsgröße eines Temperaturmodells in der Motorsteuerung vorliegt, erscheint besser geeignet zur Abschätzung der im weiteren Fahrbetrieb mit Hilfe gezielter Maßnahmen erreichbaren Temperaturen. In Fahrversuchen hat sich die in der Mitte des NO_x-Speicher-Katalysators gemessene Temperatur als geeignetes Kriterium erwiesen. Die Temperatur am Katalysator-Eintritt zeigt dagegen starke Schwankungen, insbesondere tritt auch bei kurzen Schubphasen eine deutliche Abkühlung auf, während der größte Teil des Katalysators noch eine wesentlich höhere Temperatur aufweist. Die Temperatur am Katalysator-Austritt reagiert zu träge auf Veränderungen des Fahrzustands und ist daher als Kriterium ebenfalls ungeeignet.

Im Versuchsfahrzeug hat sich als Bedingung für den Start von Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung das Erreichen einer Temperatur von 500 °C in der Mitte des NO_x-Speicher-Katalysators als geeignet herausgestellt. Hierbei wird angenommen, daß die Charakteristik des Fahrbetriebs während der eingeleiteten Desulfatisierung näherungsweise beibehalten wird. Sollte sich der Fahrzustand so ändern, daß die angestrebte Temperatur trotz intensiver Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung nicht erreicht werden kann, ist ein Abbruch des Desulfatisierungsversuchs erforderlich, um einen unnötig hohen Kraftstoffverbrauch zu vermeiden (vgl. [139]).

7.2.3 Dauer der Desulfatisierung

7.2.3.1 Optimale Dauer

Aus den in Kap. 7.1.3 dargestellten Untersuchungen geht hervor, daß die zur Desulfatisierung benötigte Dauer nicht eindeutig angegeben werden kann. Die Freisetzung des gespeicherten Schwefels findet zwar zum größten Teil in den ersten fünf Minuten der Desulfatisierung statt, allerdings ist die Desulfatisierung aber auch nach 10 min noch nicht vollständig abgeschlossen.

Zielsetzung	Dauer
Wiederherstellung der NO _x -Speicherfähigkeit	lang
geringe NO _x , CO- und HC-Emission während der Desulfatisierung	kurz
geringer Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Betrieb mit $\lambda < 1$ und durch Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung	kurz
einfache Realisierbarkeit im realen Fahrbetrieb	kurz

Tab. 7-4: Zielsetzungen der Desulfatisierungsstrategie und hieraus folgende Forderungen hinsichtlich der Dauer der Desulfatisierung

Wie aus Tab. 7-4 hervorgeht, ist eine möglichst lange Desulfatisierungsdauer vorteilhaft für die Wiederherstellung der NO_x-Speicherfähigkeit. Für die Erfüllung der restlichen in der Tabelle genannten Anforderungen ist eine lange Dauer dagegen nachteilig. Im Fall einer deutlich zu kurzen Dauer wäre allerdings wegen der nicht vollständig wiederhergestellten Speicherfähigkeit des NO_x-Speicher-Katalysators entsprechend häufiger eine Desulfatisierung nötig, so daß auch diese Anforderungen nicht zufriedenstellend erfüllt würden. Somit zeichnet sich eine optimale Dauer dadurch aus, daß sie nicht länger ist als für die Wiederherstellung der NO_x-Speicherfähigkeit zwingend erforderlich.

Die anzustrebende Dauer der Desulfatisierung muß durch die Motorsteuerung vorgegeben werden. Zuvor muß die Abhängigkeit der benötigten Dauer von der Katalysator-Temperatur, dem Luftverhältnis und der gespeicherten Schwefelmasse im Versuch ermittelt werden. Auf dieser Grundlage kann der Desulfatisierungsvorgang in der Motorsteuerung modelliert werden. Beim untersuchten NO_x-Speicher-Katalysator kann davon ausgegangen werden, daß beispielsweise mit einem Luftverhältnis $\lambda = 0.99$ etwa nach einer Dauer von 15 min bei Temperaturen von 700 bis 750 °C eine ausreichende Desulfatisierung erreicht wird.

7.2.3.2 Fahrzustandsbedingte Unterbrechung der Desulfatisierung

Im Fahrbetrieb ist es möglich, daß die angestrebte Desulfatisierungsdauer nicht realisiert werden kann, weil die Desulfatisierung durch eine zu niedrige Katalysator-Temperatur oder Abstellen des Motors abgebrochen wird. Gemäß den in Kap. 7.1.3.2 dargestellten Ergebnissen ist es offensichtlich möglich, eine Desulfatisierung in mehreren Teilschritten mit zwischenzeitlichen Unterbrechungen durchzuführen. Daher kann die Desulfatisierung fortgesetzt werden, sobald es der

Fahrzustand zuläßt. Die Entscheidung darüber, ob der Motor zwischenzeitlich auch mager betrieben wird, ist in Abhängigkeit der bis zum Abbruch erreichten Desulfatisierungsdauer zu treffen, da eine sehr kurze Desulfatisierung zu einer verschlechterten NO_x-Speicherfähigkeit führen kann (Kap. 7.1.3.2). Alternativ könnte auch das Signal einer Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator genutzt werden und Magerbetrieb nur dann zugelassen werden, wenn zuvor auch nach Katalysator ein Luftverhältnis $\lambda < 1$ detektiert wurde. Bei Erfüllung dieses Kriteriums ist im Hinblick auf die in Kap. 7.1.2.4 beschriebenen Untersuchungen davon auszugehen, daß keine weitere Verschlechterung des NO_x-Speicherverhaltens gegenüber dem Zustand vor der Desulfatisierung auftritt.

In heutigen Motorsteuerungen ist üblicherweise eine Schubabschaltung realisiert, die im Schubbetrieb die Kraftstoffzufuhr unterbricht. Durch die Schubabschaltung liegt in den Schubphasen ein Luftverhältnis $\lambda = \infty$ vor, so daß die Schwefelfreisetzung unterbrochen wird. Für eine wirksame Desulfatisierung in möglichst kurzer Zeit sollte daher während der Desulfatisierung auf eine Schubabschaltung verzichtet werden. Dies hätte zudem den Vorteil, daß eine starke Abkühlung des Katalysators in den Schubphasen verringert würde. Außerdem würde ein Verzicht auf Schubabschaltung die thermische Alterung des NO_x-Speicher-Katalysators verringern, da der Motorbetrieb mit Luftüberschuß bei hohen Katalysator-Temperaturen zu einer verstärkten thermischen Alterung führt (vgl. Kap. 3.2.1). Nachteilig ist jedoch bei einem Verzicht auf Schubabschaltung der leicht erhöhte Kraftstoffverbrauch und die verringerte Bremswirkung des Motors in Schubphasen.

Es ist zu beachten, daß bei Schubbetrieb ohne Schubabschaltung in jedem Fall eine stabile Verbrennung gewährleistet sein muß. Andernfalls erfolgt die Oxidation von HC und CO zu einem großen Teil erst in den Katalysatoren und führt dort zu einer thermischen Schädigung [172].

Für den Fall, daß die Schubabschaltung während der Desulfatisierung zugelassen wird, sind die hierdurch bedingten Phasen mit unterbrochener Schwefelfreisetzung bei einer Modellierung des Desulfatisierungsvorgangs in der Motorsteuerung zu berücksichtigen.

7.2.4 Intervalle zwischen den Desulfatisierungen

7.2.4.1 Zielkonflikt bei der Optimierung

Für eine optimale Erhaltung bzw. Wiederherstellung der NO_x-Speicherfähigkeit sowie zum Vermeiden einer hohen H₂S-Emission bei der Desulfatisierung und insbesondere bei Vollast-Anfettung ist es vorteilhaft, Desulfatisierungen häufig durchzuführen. Alle weiteren in Tab. 7-5 genannten Anforderungen werden dagegen besser mit möglichst seltenen Desulfatisierungen erfüllt. Somit ergibt sich auch hier wieder ein ausgeprägter Zielkonflikt.

Zielsetzung	Häufigkeit
Wiederherstellung der NO _x -Speicherfähigkeit	hoch
geringe H ₂ S-Emission während der Desulfatisierung	hoch
geringe NO _x , CO- und HC-Emission während der Desulfatisierung	gering
geringer Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Betrieb mit $\lambda < 1$ und durch Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung	gering
einfache Realisierbarkeit im realen Fahrbetrieb	gering

Tab. 7-5: Zielsetzungen der Desulfatisierungsstrategie und hieraus folgende Forderungen hinsichtlich der Häufigkeit von Desulfatisierungen

Als wichtigste Anforderung ist die Erhaltung bzw. Wiederherstellung der NO_x-Speicherfähigkeit zu betrachten, da für die Emissionsstufe EU4 auch nach einer Fahrstrecke von 100000 km noch niedrige Abgasgrenzwerte einzuhalten sind (vgl. Kap. 2.1.3). Daher ist in jedem Fall erforderlich, bei Diagnose einer Verschlechterung der NO_x-Speicherfähigkeit eine Desulfatisierung durchzuführen. Geeignete Verfahren zur Diagnose der NO_x-Speicherfähigkeit wurden bereits in Kap. 3.4.5 beschrieben.

Zur Vermeidung einer hohen H₂S-Emission ist eine häufige Desulfatisierung wünschenswert. Je geringer die im NO_x-Speicher-Katalysator gespeicherte Schwefelmasse ist, desto geringer ist auch die maximale H₂S-Emission bei der Desulfatisierung. Dieser Sachverhalt wird aus den im folgenden Kapitel dargestellten Untersuchungen deutlich und ist insbesondere für Fälle mit Vollast-Anfettung während der Desulfatisierung von Bedeutung. Auch in [27] wurde bereits festgestellt, daß die Intervalle zwischen den Desulfatisierungen möglicherweise begrenzt werden müssen, um eine hohe H₂S-Emission zu vermeiden. Allerdings führen häufige Desulfatisierungen mit entsprechenden Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung zu einem Anstieg des Kraftstoffverbrauchs.

7.2.4.2 Strategie mit zwei verschiedenen Desulfatisierungsprozeduren

Wegen des ausgeprägten Zielkonflikts hinsichtlich der Häufigkeit einer Desulfatisierung wird nachfolgend eine Strategie mit zwei verschiedenen Desulfatisierungsprozeduren untersucht. Diese beiden Prozeduren werden als Haupt- und Teil-Desulfatisierungen bezeichnet. Ziel ist hierbei, die im NO_x-Speicher-Katalysator gespeicherte Schwefelmasse gering zu halten und zugleich einen hohen Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Desulfatisierungen zu vermeiden.

Wie aus der Gegenüberstellung in Tab. 7-6 hervorgeht, haben die beiden Prozeduren unterschiedliche Zielsetzungen und werden daher mit unterschiedlicher Häufigkeit, Dauer und Temperatur durchgeführt. Mit der Haupt-Desulfatisierung wird die bestmögliche Wiederherstellung der NO_x-Speicherfähigkeit durch eine lange Desulfatisierung bei hohen Temperaturen angestrebt. Dagegen ist die Dauer für eine Teil-Desulfatisierung deutlich geringer, und die angestrebte Katalysator-Temperatur ist nur so hoch, daß eine Schwefelfreisetzung gerade möglich ist. Hierdurch wird der Kraftstoff-Mehrverbrauch durch eventuell erforderliche Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung niedrig gehalten.

	Haupt-Desulfatisierung	Teil-Desulfatisierung
Zielsetzung	Wiederherstellung der NO _x -Speicherfähigkeit	Verringerung der Schwefelmasse im NO _x -Speicher-Katalysator
Zeitpunkt der Durchführung, Häufigkeit	erst bei Diagnose eines verschlechterten NO _x -Speicherverhaltens	häufiger als Haupt-Desulfatisierungen, bereits vor deutlicher Verschlechterung des NO _x -Speicherverhaltens
Dauer	15 min	5 min
Temperatur	700 - 750 °C	600 - 650 °C

Tab. 7-6: Strategie mit zwei verschiedenen Desulfatisierungsprozeduren

Die Strategie mit den beiden Desulfatisierungsprozeduren wurde auf dem Prüfstand und im Fahrzeug erprobt. Die Ergebnisse der Prüfstandsuntersuchungen werden nachfolgend erläutert, auf die Fahrzeuguntersuchungen wird später in Kap. 7.3.3 eingegangen.

Bei den Prüfstandsuntersuchungen wurden dem NO_x-Speicher-Katalysator insgesamt 5 g Schwefel zugeführt. Diese Verschwefelung erfolgte analog zu Kap. 7.1.1.2. Jeweils nach Zufuhr von 0.5 g Schwefel wurde die Verschwefelung unterbrochen und eine Teil-Desulfatisierung durchgeführt. Hierzu wurde zum Betriebspunkt mit $n = 2700$ 1/min und $p_{me} = 4$ bar gewechselt.

Die Desulfatisierungen bei dieser Versuchsreihe wurden mit einem Luftverhältnis von $\lambda = 0.98$ durchgeführt, obwohl prinzipiell ein geringfügig größeres Luftverhältnis vorteilhafter ist. Dies ist darin begründet, daß auch bei den instationären Fahrzeuguntersuchungen trotz des nicht serienreifen Applikationsstands der Lambdaregelung Unterbrechungen der Schwefelfreisetzung infolge von leichten Abweichungen des Luftverhältnisses in Richtung „mager“ vermieden werden sollten. Im oben genannten Betriebspunkt wurde ohne Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung eine stationäre Endtemperatur von 610 °C erreicht. 5 min nach Einsetzen der Schwefelfreisetzung bei etwa 590 °C wurde wieder zum Betriebspunkt mit $n = 2000$ 1/min und $p_{me} = 2$ bar gewechselt und die Verschwefelung fortgesetzt.

In Abb. 7-18 ist exemplarisch die fünfte der insgesamt zehn Teil-Desulfatisierungen dargestellt. Wie man erkennt, wird bei der Desulfatisierung größtenteils H₂S emittiert. Auch bei weiteren Untersuchungen wurde festgestellt, daß bei einer Desulfatisierung bei geringer gespeicherter Schwefelmasse der H₂S-Anteil an der insgesamt freigesetzten Schwefelmasse deutlich größer ist als bei den in Kap. 7.1.2.2 beschriebenen Versuchen mit einer höheren gespeicherten Schwefelmasse.

Bei der ersten Teil-Desulfatisierung wird eine maximale H₂S-Emission von 1.8 g/h erreicht, bei der zehnten Teil-Desulfatisierung sind es 7 g/h. Die Zunahme der H₂S-Emission weist darauf hin, daß die Desulfatisierung unter den gewählten Randbedingungen nicht vollständig ist und somit eine Akkumulation von Schwefel stattfindet. Insgesamt ist die H₂S-Emission jedoch als gering und damit hinsichtlich einer Geruchsbildung als unkritisch zu betrachten.

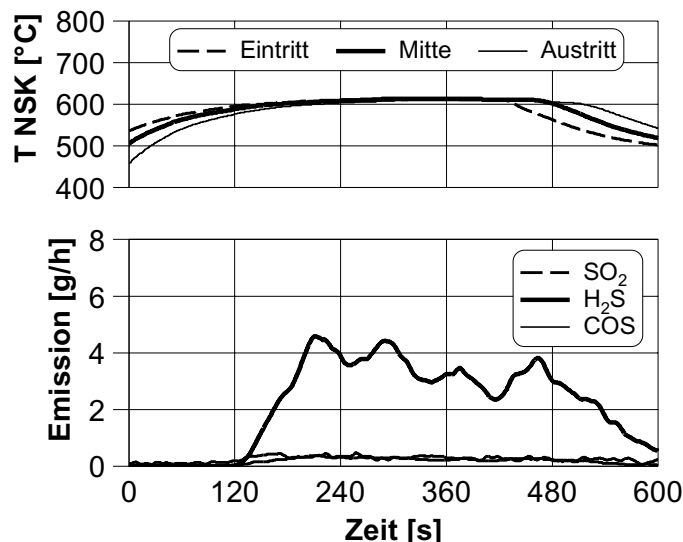


Abb. 7-18: Fünfte von insgesamt zehn Teil-Desulfatisierungen ($n = 2700$ 1/min, $p_{me} = 4$ bar, $\lambda = 0.98$, NSK verschwefelt mit 5×0.5 g)

Nach einer Zufuhr von insgesamt 5 g Schwefel und zehn Teil-Desulfatisierungen wurde eine Haupt-Desulfatisierung durchgeführt. Hierzu wurde zum Betriebspunkt mit $n = 3500$ 1/min und $p_{me} = 4$ bar gewechselt. Als Luftverhältnis wurde wieder $\lambda = 0.98$ eingestellt. Mit Hilfe von Spätzündung zur Katalysator-Aufheizung wurde eine Temperatur von 740 °C erreicht. Wie man in der linken Hälfte von Abb. 7-19 erkennt, wird hierbei eine H₂S-Emission von maximal 14 g/h festgestellt. Ebenso wie bei den vorangegangenen Teil-Desulfatisierungen tritt auch hier praktisch keine SO₂-Emission auf.

Zum Vergleich wurden dem NO_x-Speicher-Katalysator in einem zweiten Versuch nach gründlicher Desulfatisierung erneut 5 g Schwefel durchgeführt, wobei keine Teil-Desulfatisierungen durchgeführt wurden. Bei der anschließenden Haupt-Desulfatisierung wurden die gleichen Bedingungen wie bei dem oben beschriebenen Versuch gewählt.

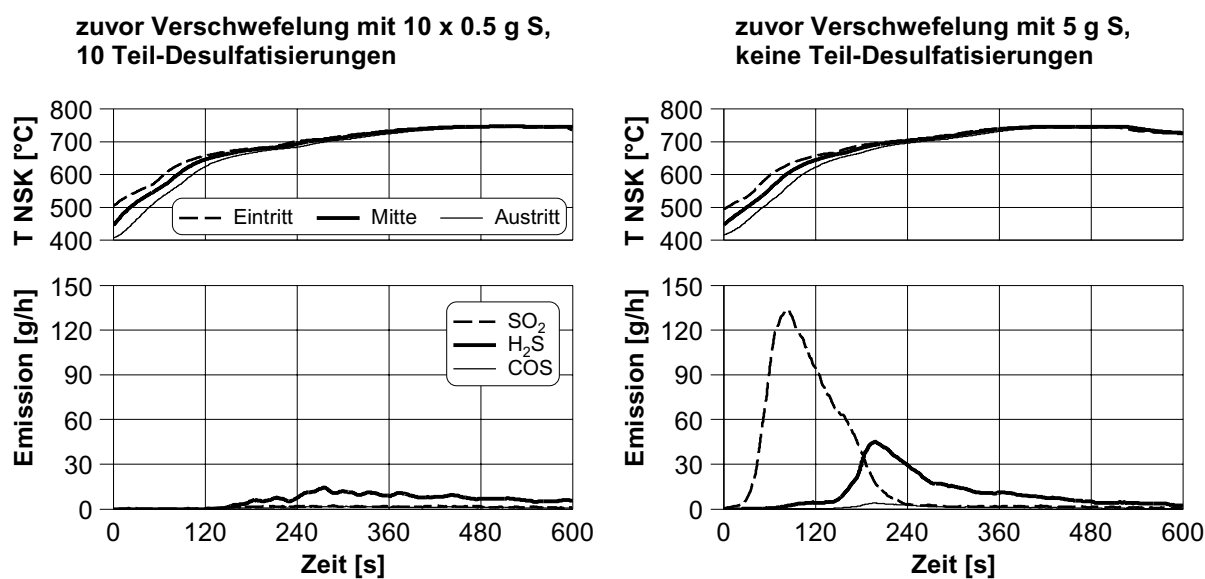


Abb. 7-19: Vergleich der abschließenden Haupt-Desulfatisierungen ($n = 3500$ 1/min, $p_{me} = 4$ bar, $\lambda = 0.98$, NSK verschwefelt mit 5 g)

In der rechten Hälfte von Abb. 7-19 ist zu erkennen, daß bei dieser Desulfatisierung im Vergleich eine deutlich höhere Schwefelmasse freigesetzt wird. Hierbei wird erwartungsgemäß zunächst eine SO₂-Freisetzung beobachtet, bevor eine H₂S-Emission auftritt. Die maximale H₂S-Emission beträgt 45 g/h und ist damit um den Faktor drei höher als bei dem Versuch mit zehn vorangegangenen Teil-Desulfatisierungen.

Durch die Teil-Desulfatisierungen wird also die gespeicherte Schwefelmasse gering gehalten und damit die Gefahr einer hohen H₂S-Emission unter ungünstigen Bedingungen verringert. Bemerkenswert ist, daß trotz der unterschiedlichen Durchführung bei beiden Versuchsreihen vor der Haupt-Desulfatisierung sehr ähnliche NO_x-Speicherkapazitäten $m_{\text{NO}_x 50\%}$ festgestellt werden. Diese liegen bei etwa 65 % des Wertes vor der Verschwefelung. Offensichtlich wird die NO_x-Speicherfähigkeit durch die Teil-Desulfatisierungen also nicht verbessert. Somit ist davon auszugehen, daß bei der Strategie mit Teil-Desulfatisierungen die Abstände zwischen zwei Haupt-Desulfatisierungen ähnlich sein werden wie bei Verzicht auf die Teil-Desulfatisierungen.

Die oben beschriebenen Ergebnisse wurden erzielt, indem jeweils nach Zufuhr von 0.5 g Schwefel eine Teil-Desulfatisierung durchgeführt wurde. Im realen Fahrbetrieb ist die zugeführte Schwefelmasse jedoch nicht exakt bekannt, da im Fahrzeug bislang weder der Schwefelgehalt des Kraftstoffs noch die SO₂-Konzentration im Rohabgas oder die Schwefelbeladung des NO_x-Speicher-Katalysators bestimmt werden können. Um dennoch die Abstände zwischen den Teil-Desulfatisierungen vorgeben zu können, wäre eine adaptive Vorgabe der Intervalle zwischen den Teil-Desulfatisierungen denkbar. Wie oben beschrieben, werden bei Diagnose eines verschlechterten NO_x-Speicherverhaltens Haupt-Desulfatisierungen durchgeführt. Sofern in der Motorsteuerung die Kraftstoffmasse bekannt ist, die zwischen zwei Haupt-Desulfatisierungen zugeführt wurde, kann im weiteren Fahrbetrieb beispielsweise jeweils nach Zufuhr von 10 % dieser Kraftstoffmasse eine Teil-Desulfatisierung durchgeführt werden. Somit ist eine Anpassung an den tatsächlichen Schwefelgehalt im Kraftstoff möglich.

7.2.4.3 Kraftstoff-Mehrverbrauch durch die Desulfatisierungen

Der aus der Durchführung von Desulfatisierungen resultierende Kraftstoff-Mehrverbrauch ist vor allem von der Häufigkeit, aber auch von den Parametern für die Desulfatisierung (Temperatur, Dauer, Luftverhältnis) und vom Fahrzustand während der Desulfatisierungen abhängig. Die Häufigkeit von Desulfatisierungen wird wiederum beeinflusst durch den Schwefelgehalt im Kraftstoff, den Kraftstoffverbrauch, die Speicherfähigkeit des NO_x-Speicher-Katalysators im Neuzustand (Katalysatorvolumen, Beschichtung), die zugelassene Verringerung der NO_x-Speicherfähigkeit und nicht zuletzt durch die Wahl der Strategie zur Vermeidung hoher H₂S-Emissionen.

Nachfolgend wird eine Abschätzung des Kraftstoff-Mehrverbrauchs durch die Desulfatisierungen durchgeführt. Hierfür werden folgende Annahmen getroffen:

- Schwefelgehalt im Kraftstoff 50 mg/kg, Kraftstoffverbrauch 8 l/100 km
- nach Zufuhr von 5 g Schwefel ist die Durchführung einer Desulfatisierung erforderlich

- zum Erreichen der Temperaturen für die Desulfatisierung sind immer motorische Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung erforderlich (ungünstiger Fall)
- die mittlere Fahrgeschwindigkeit während der Desulfatisierung beträgt 90 km/h
- die Desulfatisierung erfolgt mit $\lambda = 0.99$

Unter diesen Bedingungen ist etwa nach einer Fahrstrecke von 1600 km eine Haupt-Desulfatisierung erforderlich. Für eine Desulfatisierung über 15 min bei Katalysator-Temperaturen von 700 bis 750 °C kann eine Dauer für Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung von insgesamt 20 min und ein hierbei auftretender Kraftstoff-Mehrverbrauch von 25 % angenommen werden. Bezogen auf die gesamte Fahrstrecke, d.h. 1600 km zuzüglich 30 km während der Desulfatisierung, ergibt sich ein Mehrverbrauch von 0.5 %.

Wird zur Vermeidung hoher H₂S-Emissionen die oben beschriebene Strategie mit zusätzlichen Teil-Desulfatisierungen eingesetzt, wären diese beispielsweise zehnmal häufiger erforderlich als die Haupt-Desulfatisierungen, d.h. nach jeweils 160 km Fahrstrecke. Für eine Teil-Desulfatisierung über 5 min bei Katalysator-Temperaturen von 600 bis 650 °C kann eine Katalysator-Aufheizung über insgesamt 8 min bei einem Kraftstoff-Mehrverbrauch von 20 % angenommen werden. Der Mehrverbrauch, der sich mit dieser Strategie über die gesamte Fahrstrecke zwischen dem Ende der letzten Haupt-Desulfatisierung und dem Ende der hier betrachteten Haupt-Desulfatisierung ergibt, beträgt dann 1.7 %. Zum Vergleich sei festgestellt, daß der Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Haupt-Desulfatisierungen nach jeweils 160 km Fahrstrecke immerhin 5 % betragen würde.

Diese Werte ergeben sich unter den oben angegebenen Annahmen. Beispielsweise bei einem geringeren Schwefelgehalt im Kraftstoff ist der Kraftstoff-Mehrverbrauch entsprechend geringer. Die Ergebnisse der Abschätzung liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die in Kap. 3.3.2 genannten Literaturangaben zum Kraftstoff-Mehrverbrauch durch Desulfatisierungen.

7.2.5 Minimierung der H₂S-Emission durch Lufteinblasung

In Kap. 7.2.4.2 wurde eine Desulfatisierungsstrategie beschrieben, mit der die maximale H₂S-Emission im Fahrbetrieb vermindert werden kann. Als weiterer Ansatz zur H₂S-Minimierung wurde auf dem Motorprüfstand versucht, mit Hilfe von Lufteinblasung nach NO_x-Speicher-Katalysator und Einsatz eines weiteren Katalysators hinter dem NO_x-Speicher-Katalysator eine Oxidation von H₂S zu SO₂ und H₂O zu ermöglichen. Als nachgeschalteter Katalysator wurde der bei den bisherigen Untersuchungen als Startkatalysator eingesetzte Drei-Wege-Katalysator mit einem Volumen von 0.76 l verwendet. Prinzipiell erscheint auch ein geringeres Volumen ausreichend.

Bei den Untersuchungen wurde eine Desulfatisierung mit $\lambda = 0.9$ betrachtet. Ohne Lufteinblasung kommt es bei dieser Desulfatisierung zu einer hohen H₂S-Emission (vgl. Kap. 7.1.2.2). Mit Lufteinblasung erfolgt dagegen eine vollständige Oxidation von H₂S und COS zu SO₂ sowie zu H₂O und CO₂. Somit könnte die H₂S-Freisetzung bei Vollast-Anfettung durch Lufteinblasung und einen nachgeschalteten Katalysator vermieden werden. Allerdings ist zu beachten, daß ein geringer Teil des freigesetzten Schwefels während der Desulfatisierung im nachgeschalteten Drei-Wege-Katalysator gespeichert wird. Bei einem späteren Wechsel zu $\lambda < 1$ kommt es

dann zur Desorption, wobei geringe Mengen von SO₂ und auch H₂S und COS freigesetzt werden.

Um bei Vollast-Betrieb mit $\lambda = 0.9$ im nachgeschalteten Drei-Wege-Katalysator ein Luftverhältnis $\lambda > 1$ einzustellen, ist ein zusätzlicher Luftmassenstrom in Höhe von mindestens 12 % des angesaugten Luftmassenstroms notwendig. Beim Versuchsmotor ergibt sich bei $n = 3000$ 1/min ein erforderlicher zusätzlicher Luftmassenstrom von etwa 28 kg/h, bei $n = 5000$ 1/min werden etwa 40 kg/h benötigt. Diese Luftmassenströme können beispielsweise von serienreif verfügbaren Sekundärluft-pumpen geliefert werden [173, 174]. Diese Pumpen wurden für die Lufteinblasung zur schnellen Katalysator-Aufheizung nach dem Kaltstart entwickelt. Da sie allerdings nur für eine Einschaltdauer von maximal 3 min ausgelegt sind [174], ist eine zeitliche Beschränkung der Lufteinblasung auf Phasen mit starker H₂S-Bildung erforderlich. Diese Phasen, beispielsweise zu Beginn der Desulfatisierung bei hoher gespeicherter Schwefelmenge, müssen über entsprechende Funktionen in der Motorsteuerung rechtzeitig erkannt werden. Bei mechanisch aufgeladenen Motoren wird die Sekundärluft dagegen durch den Lader zur Verfügung gestellt [168]. In diesem Fall wäre keine zeitliche Begrenzung erforderlich.

Neben der Vermeidung einer H₂S-Geruchsbildung hat das hier beschriebene Verfahren auch den Vorteil minimaler HC- und CO-Emissionen trotz des Motorbetriebs mit $\lambda < 1$, da diese Abgaskomponenten durch die Lufteinblasung vollständig oxidiert werden.

7.3 Desulfatisierung im realen Fahrbetrieb

In diesem Kapitel werden Aspekte zur Durchführung der Desulfatisierung im Fahrzeug betrachtet. Hierbei wird ein Verfahren zur Abschätzung der Gefahr einer Geruchsbildung durch H₂S beschrieben. Darüber hinaus werden Desulfatisierungsversuche auf dem Rollenprüfstand mit optimierter Strategie dargestellt.

7.3.1 Abschätzung der Geruchsbildung durch die H₂S-Emission

In den vorangegangenen Kapiteln wurde stets der bei den Desulfatisierungen freigesetzte H₂S-Massenstrom betrachtet. Nachfolgend soll eine Abschätzung der H₂S-Geruchsbildung erfolgen. Hierdurch soll ein Zusammenhang zwischen einem emittierten H₂S-Massenstrom und einer möglichen Geruchsbelästigung von Insassen nachfolgender Fahrzeuge hergestellt werden.

Da die Strömungsverhältnisse hinter einem fahrenden Fahrzeug sehr komplex sind, wird zunächst ein einfaches Modell entwickelt. Wie in Abb. 7-20 dargestellt, wird hierbei angenommen, daß sich die Abgasausbreitung ausschließlich auf das vom Fahrzeug durchfahrene Volumen beschränkt und sich innerhalb dieses Volumens eine homogene Verteilung einstellt. Gemäß dieser Annahme liegt im gesamten durchfahrenen Volumen eine konstante H₂S-Konzentration vor, die nachfolgend als $c(\text{H}_2\text{S})^*$ bezeichnet wird. Es ist davon auszugehen, daß in Wirklichkeit in großem Abstand hinter dem Fahrzeug eine geringere H₂S-Konzentration vorliegt, während dicht hinter dem Fahrzeug Zonen mit einer höheren H₂S-Konzentration zu erwarten sind.

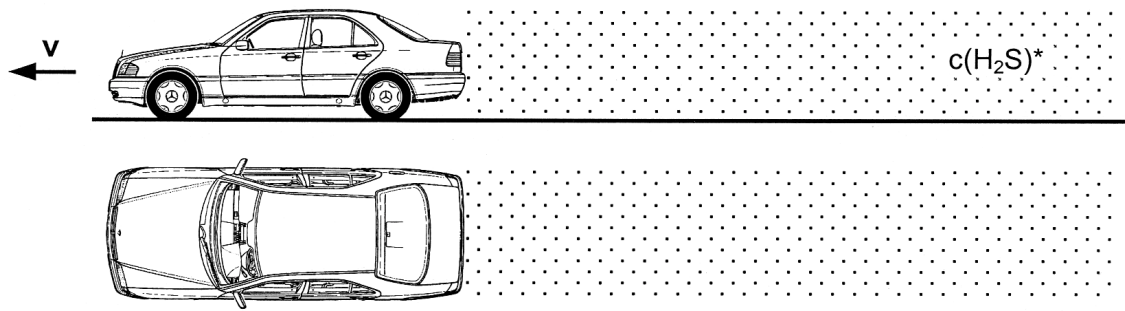


Abb. 7-20: Annahme der H₂S-Verteilung hinter einem fahrenden Fahrzeug zur Abschätzung der Geruchsbildung

Das beschriebene Modell ermöglicht eine Abschätzung der Geruchsbildung, indem die H₂S-Konzentration $c(\text{H}_2\text{S})^*$ in diesem Volumen mit der H₂S-Geruchsschwelle verglichen wird. Wie in Kap. 3.3.2 bereits erwähnt, liegen die Literaturangaben zur Geruchsschwelle von H₂S im Bereich zwischen 0,8 und 150 µg/m³.

In Abb. 7-21 ist die H₂S-Konzentration $c(\text{H}_2\text{S})^*$ dargestellt, die sich mit diesem Modell für verschiedene H₂S-Massenströme und Fahrgeschwindigkeiten ergibt. Es ist davon auszugehen, daß H₂S-Emissionen ab etwa 100 g/h zu einer deutlichen Geruchsbildung führen, da selbst bei hoher Fahrgeschwindigkeit die höchste in der Literatur gefundene Geruchsschwelle von 150 µg/m³ noch überschritten wird. Bei einer H₂S-Emission von etwa 5 g/h wird dagegen bei Fahrgeschwindigkeiten über 100 km/h nur weniger als ein Zehntel dieser maximalen Geruchsschwelle erreicht. Vermutlich tritt in diesem Fall keine oder zumindest nur eine schwache Geruchsbildung auf. Wie man in Abb. 7-21 auch erkennt, kann die geringste in der Literatur genannte Geruchsschwelle von 0,8 µg/m³ selbst bei einer H₂S-Emission von nur 1 g/h nicht unterschritten werden.

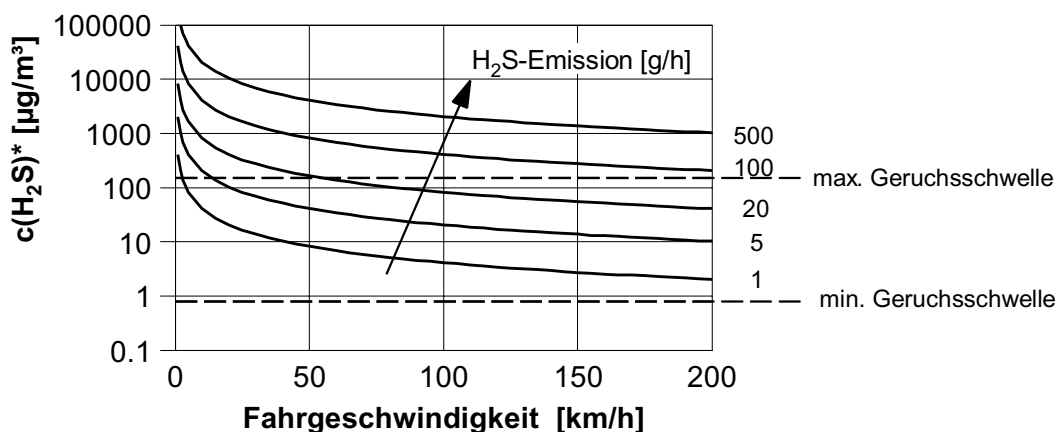


Abb. 7-21: $c(\text{H}_2\text{S})^*$ für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten und H₂S-Massenströme (Fahrzeug Mercedes-Benz C-Klasse W202)

Mit diesen Ergebnissen kann eine Bewertung der in vorangegangenen Kapiteln festgestellten H₂S-Emissionen erfolgen. Bei Vergleich mit Abb. 7-5 ergibt sich beispielsweise, daß bei einer Schwefelbeladung von 8 g bei kleineren Luftverhältnissen als etwa $\lambda = 0,97$ die maximale Geruchsschwelle für H₂S überschritten wird.

Auf Basis der hier durchgeführten Abschätzung kann auch festgestellt werden, daß durch die in Kap. 7.2.4.2 untersuchte Strategie mit Haupt- und Teil-Desulfatisierungen bei $\lambda = 0.98$ die Geruchsbildung durch die Absenkung der maximalen H₂S-Emission von 45 g/h auf 15 g/h (Abb. 7-19) zwar verringert, aber möglicherweise nicht vollständig vermieden werden kann.

7.3.2 Elemente einer optimierten Desulfatisierungsstrategie

Aus den in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Untersuchungen gehen verschiedene Erkenntnisse hervor, die bei einer optimierten Strategie zur Desulfatisierung zu berücksichtigen sind. Hinzu kommen weitere Aspekte, die bisher nicht diskutiert wurden. Die wesentlichen Elemente einer optimierten Strategie werden nachfolgend aufgelistet.

- Bei Diagnose einer verschlechterten NO_x-Speicherfähigkeit werden sogenannte Haupt-Desulfatisierungen durchgeführt.
- Um die gespeicherte Schwefelmasse gering zu halten, werden zusätzlich zu den Haupt-Desulfatisierungen noch Teil-Desulfatisierungen durchgeführt. Da der Schwefelgehalt des verwendeten Kraftstoffs als unbekannt anzunehmen ist, ist eine adaptive Vorgabe der Intervalle zwischen den Teil-Desulfatisierungen auf Basis der sich ergebenden Intervalle zwischen zwei Haupt-Desulfatisierungen sinnvoll.
- Der Start von Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung wird als sinnvoll erachtet, wenn die Temperatur in der Mitte des NO_x-Speicher-Katalysators fahrzustandsbedingt über 500 °C beträgt.
- Die Intensität der Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung wird entsprechend der aktuellen Katalysator-Temperatur geregelt.
- Die Maßnahmen zur Katalysator-Aufheizung vor oder während einer Desulfatisierung werden abgebrochen, wenn die angestrebte Temperatur auch nach längerer Dauer infolge einer Änderung des Fahrzustands nicht erreicht werden kann.
- Falls eine Desulfatisierung fahrzustandsbedingt abgebrochen werden muß, wird diese später bei wieder geeigneten Bedingungen fortgesetzt. Nach einer sehr kurzen Desulfatisierung muß bis zu einer Fortsetzung der Desulfatisierung auf Magerbetrieb verzichtet werden, da andernfalls das verschlechterte Speicherverhalten zu einer Erhöhung von Emissionen und Kraftstoffverbrauch führen würde.
- Das Luftverhältnis bei der Desulfatisierung beträgt $\lambda = 0.98 - 0.99$ und wird bereits während der Aufheizung eingestellt.
- Die anzustrebende Dauer der Haupt- oder Teil-Desulfatisierung kann über eine Modellierung des Desulfatisierungsvorgangs in der Motorsteuerung vorgegeben werden. Entsprechende Zeitähler zur Bestimmung der tatsächlichen Desulfatisierungsdauer berücksichtigen die Unterbrechung der Schwefelfreisetzung in Phasen mit Luftüberschuß oder zu geringer Temperatur.
- Je nach Fahrstrecke oder Kraftstoffverbrauch seit der letzten Haupt-Desulfatisierung werden Fahrzustände, in denen auch ohne Heizmaßnahmen bereits erhöhte Katalysator-Temperaturen vorliegen, für eine Haupt-Desulfatisierung mit entsprechend reduzierten Heizmaßnahmen genutzt. Somit wird der zusätzliche Kraftstoffverbrauch durch Heizmaßnahmen verringert.

- Fahrzustände mit ausreichender Katalysator-Temperatur ohne Heizmaßnahmen werden prinzipiell zur Desulfatisierung genutzt, indem ein geeignetes Luftverhältnis vorgegeben wird.
- Um hohe H₂S-Emissionen zu vermeiden, kann in Phasen mit hoher Schwefelbeladung und damit der Gefahr hoher H₂S-Emission auf die Vollast-Anfettung verzichtet werden. Nachteilig ist hierbei eine vorübergehende geringe Drehmomenteinbuße (vgl. Kap. 2.2.1).
- Durch einen Verzicht auf die Schubabschaltung während der Desulfatisierungsprozedur werden Unterbrechungen der Schwefelfreisetzung verhindert.
- Die Vorgabe eines Luftverhältnisses $\lambda < 1$ zur Desulfatisierung kann auf hohe Fahrgeschwindigkeiten beschränkt werden. Hierdurch kann eine ausreichende Abgasverdünnung sichergestellt und damit die Gefahr einer Geruchsbildung verringert werden.

In der Motorsteuerung des Versuchsfahrzeugs wurde eine Desulfatisierungsstrategie realisiert, die die hier genannten Elemente beinhaltet. Diese wurde im realen Fahrbetrieb unter verschiedenen Fahrbedingungen erprobt und abgestimmt.

7.3.3 Desulfatisierungen auf dem Rollenprüfstand

Mit der im Versuchsfahrzeug realisierten Desulfatisierungsstrategie wurden Untersuchungen auf dem Rollenprüfstand durchgeführt, um die Emissionen bei der Desulfatisierung messen zu können. Bei diesen Untersuchungen wurde analog zu den in Kap. 7.2.4.2 beschriebenen Prüfstandsuntersuchungen jeweils nach Zufuhr von 0.5 g Schwefel eine Teil-Desulfatisierung durchgeführt. Die zugeführte Schwefelmasse wurde aus dem Kraftstoffverbrauch und dem Schwefelgehalt des Kraftstoffs (100 mg/kg) errechnet. Zur Desulfatisierung wurde wieder ein Luftverhältnis von $\lambda = 0.98$ gewählt. Im Unterschied zu den Prüfstandsuntersuchungen wurde hier bei Teil-Desulfatisierungen eine etwas höhere Temperatur des NO_x-Speicher-Katalysators von 630 bis 650 °C erreicht.

Insgesamt wurden 15 Teil-Desulfatisierungen durchgeführt. Beispielhaft ist in Abb. 7-22 die 13. Teil-Desulfatisierung dargestellt. Diese Desulfatisierung wurde während näherungsweise konstanter Fahrt zwischen 100 und 105 km/h durchgeführt. Vor und nach der Desulfatisierung wurde im Mager/Fett-Betrieb mit geregelter Adsorptions- und Regenerationsdauer gefahren. Die Fahrgeschwindigkeit lag hierbei bei 60 km/h.

Nachfolgend werden die verschiedenen Schritte beschrieben, die in der Motorsteuerung für die Durchführung der Desulfatisierung abgearbeitet werden:

- Ab Temperaturen $T_{\text{NSK Mitte}} > 470$ °C wird generell kein Magerbetrieb mehr zugelassen, da die NO_x-Speicherfähigkeit des Katalysators bei höheren Temperaturen stark abnimmt.
- Die Katalysator-Aufheizung zur Desulfatisierung beginnt ab $T_{\text{NSK Mitte}} = 500$ °C, gleichzeitig erfolgt der Wechsel zu $\lambda = 0.98$.
- Die Katalysator-Aufheizung erfolgt durch Zylinder-Vertrimmung ohne Spätzündung bei Zylindern mit $\lambda < 1$. Hierbei werden zunächst die Zylinder 1 und 4 mit $\lambda = 0.81$ betrieben, die Zylinder 2 und 3 mit $\lambda = 1.24$. Bei Erreichen der angestrebten Katalysator-Temperatur wird die Zylinder-Vertrimmung verringert.
- Der Zeitzähler für die Teil-Desulfatisierung startet ab $T_{\text{NSK Mitte}} > 590$ °C, die angestrebte Desulfatisierungsdauer beträgt 5 min.

- Während der Desulfatisierung mit aktiver Aufheizung wird keine Schubabschaltung zugelassen.
- Die Desulfatisierung mit aktiver Aufheizung wird beendet, wenn der Zeitzähler den angestrebten Wert erreicht.
- Nach Ende der Desulfatisierung mit aktiver Aufheizung wird der Betrieb zunächst mit $\lambda = 0.98$ fortgesetzt, bis die Katalysator-Temperatur auf $T_{\text{NSK Mitte}} = 550 \text{ °C}$ abgefallen ist. Danach erfolgt der Wechsel zu $\lambda = 1$.
- Ab Katalysator-Temperaturen $T_{\text{NSK Mitte}} < 470 \text{ °C}$ wird wieder zu Magerbetrieb gewechselt.

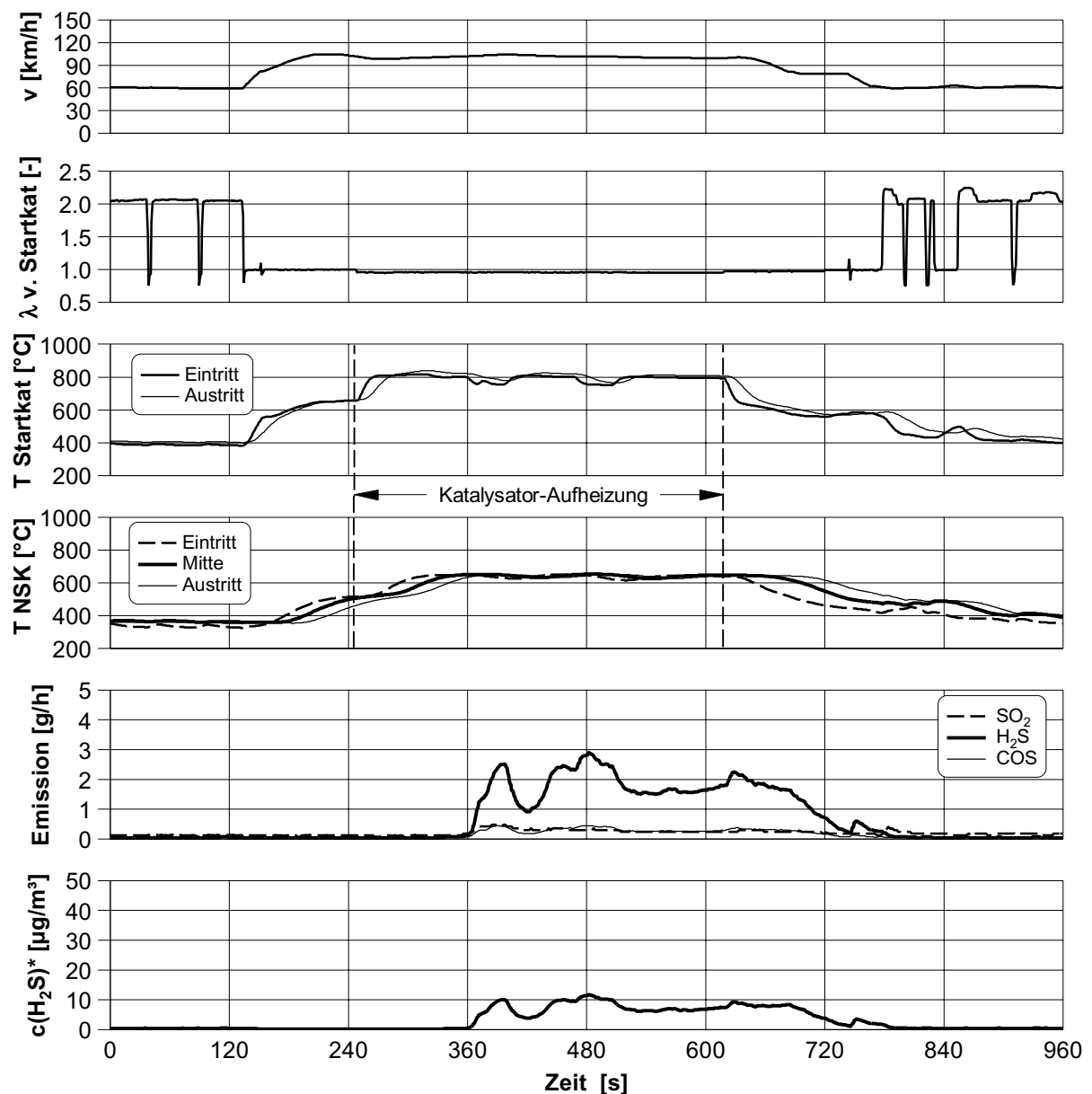


Abb. 7-22: 13. von insgesamt 15 Teil-Desulfatisierungen (Desulfatisierung mit $\lambda = 0.98$, Zylinder-Vertrimmung, NSK verschwefelt mit $13 \times 0.5 \text{ g}$)

Wie in Abb. 7-22 zu erkennen, wird die angestrebte Katalysator-Temperatur bei der Konstantfahrt mit 100 bis 105 km/h rasch erreicht. Durch die Exothermie der Reaktionen im Startkatalysator erreicht dieser Temperaturen von etwa 800 °C. Die Temperaturerhöhung im NO_x-Speicher-Katalysator gegenüber Konstantfahrt ohne Katalysator-Aufheizung beträgt zwischen 100 und 150 K. Wie auch bei den in Kap. 7.2.4.2 beschriebenen Prüfstandsuntersuchungen wird bei der Teil-Desulfatisierung überwiegend H₂S freigesetzt. Zur Bewertung der H₂S-Emission wurde mit Hilfe des in Kap. 7.3.1 beschriebenen Modells die H₂S-Konzentration $c(\text{H}_2\text{S})^*$ bestimmt. Während der Desulfatisierung beträgt dieser Wert maximal 12 µg/m³, so daß keine nennenswerte Geruchsbildung zu erwarten ist.

Nach insgesamt 15 Teil-Desulfatisierungen wurde eine Haupt-Desulfatisierung durchgeführt. Die Randbedingungen hierbei entsprechen weitgehend den für die Teil-Desulfatisierungen genannten Bedingungen. Folgende Unterschiede sind jedoch zu nennen:

- Die Desulfatisierung erfolgt während instationären Fahrbetriebs mit Fahrgeschwindigkeiten bis 125 km/h. Hierbei werden mehrere gezielte Vollast-Beschleunigungen durchgeführt, während denen eine Vollast-Anfettung auf $\lambda = 0.85$ erfolgt. Diese Vollast-Beschleunigungen dienen dazu, die erwartete Zunahme der H₂S-Emission bei Verkleinerung des Luftverhältnisses während der Desulfatisierung zu untersuchen.
- Die Zylinder-Vertrimmung wird verstärkt. Zu Beginn werden die Zylinder 1 und 4 mit $\lambda = 0.77$ betrieben, die Zylinder 2 und 3 mit $\lambda = 1.35$.
- Der Zeitähler für die Haupt-Desulfatisierung startet ab $T_{\text{NSK Mitte}} > 670$ °C, die angestrebte Desulfatisierungsdauer beträgt 15 min.

Bei dieser Haupt-Desulfatisierung betragen die Temperaturen im Startkatalysator bis etwa 900 °C und im NO_x-Speicher-Katalysator bis etwa 760 °C (Abb. 7-23). Die Temperatur im NO_x-Speicher-Katalysator ist damit um etwa 150 bis 200 K höher als ohne Katalysator-Aufheizung.

Auch bei dieser Desulfatisierung wird der Schwefel zum größten Teil als H₂S freigesetzt. In den einzelnen Beschleunigungsphasen mit $\lambda = 0.85$ ist jeweils wie erwartet eine deutliche Zunahme der H₂S-Emission zu erkennen. Dies gilt vor allem in einem noch frühen Stadium der Desulfatisierung, da in diesem Fall die noch im NO_x-Speicher-Katalysator gespeicherte Schwefelmenge besonders groß ist.

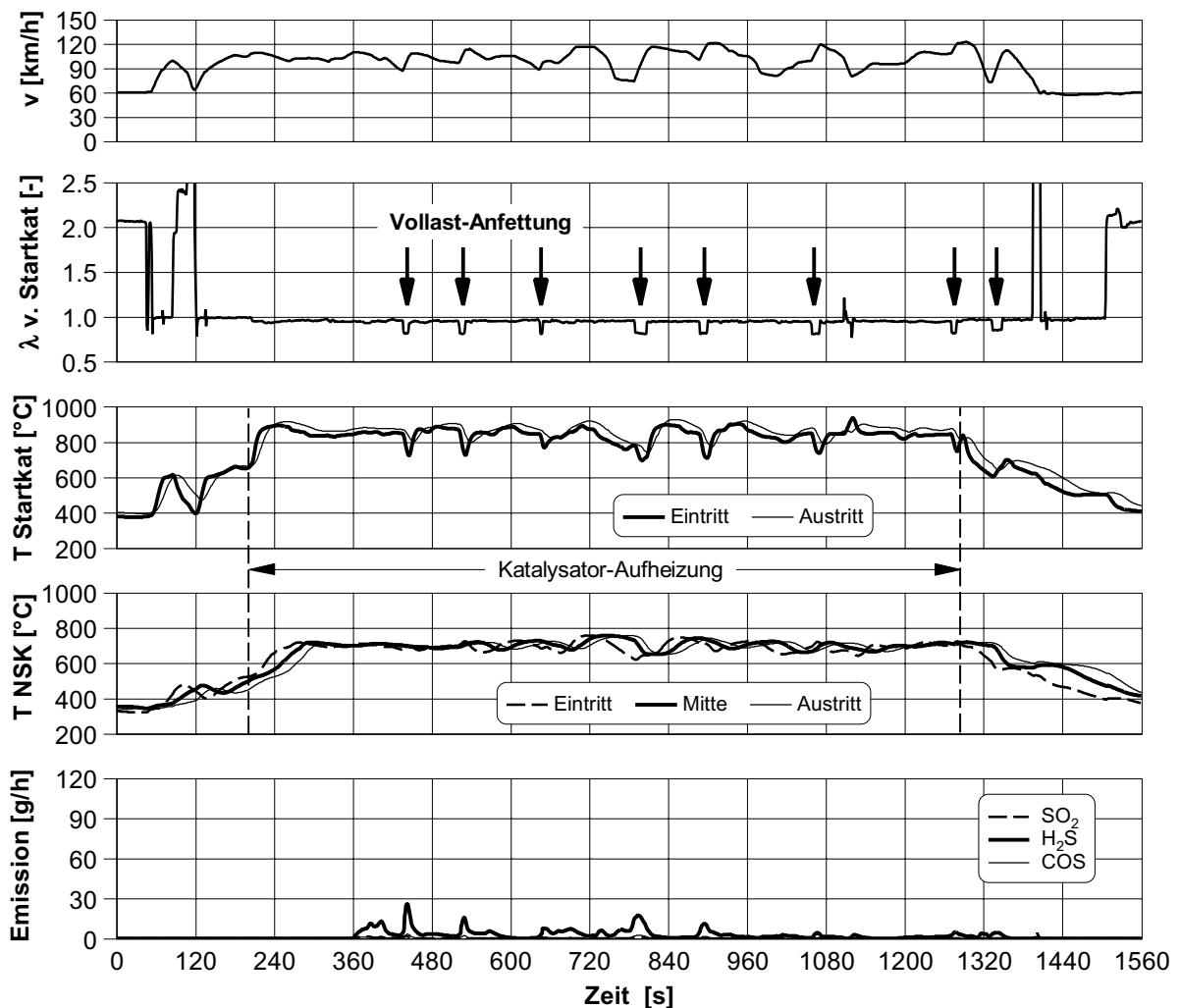


Abb. 7-23: Haupt-Desulfatisierung nach 15 Teil-Desulfatisierungen (Desulfatisierung mit $\lambda = 0.98$, bei Vollast $\lambda = 0.85$, Zylinder-Vertrimmung, NSK verschwefelt mit 15×0.5 g)

Um die Strategie mit zusätzlichen Teil-Desulfatisierungen zu bewerten, wird der gerade beschriebene Versuch (Abb. 7-23) nachfolgend einer Haupt-Desulfatisierung ohne vorangegangene Teil-Desulfatisierungen gegenübergestellt. Hierzu wurde das Fahrzeug über eine Strecke von 800 km gefahren, ohne eine gezielte Desulfatisierung oder Fahrzustände mit einer Katalysator-Temperatur über 550 °C herbeizuführen. Auf dieser Fahrstrecke wurde dem NO_x-Speicher-Katalysator eine Schwefelmasse von 5 g zugeführt. Die anschließende Haupt-Desulfatisierung wurde unter den gleichen Randbedingungen durchgeführt wie die oben beschriebene Haupt-Desulfatisierung. Insbesondere wurde die gleiche Fahrkurve vorgegeben.

Wie in Abb. 7-24 zu erkennen, wird bei diesem Versuch zu Beginn der Desulfatisierung ausschließlich SO_2 freigesetzt. Mit fortschreitender Desulfatisierung klingt die SO_2 -Emission ab, während die H_2S - und COS -Emissionen zunehmen. Wegen der größeren gespeicherten Schwefelmasse tritt hier bei Vollast-Anfettung eine deutlich stärkere Zunahme der H_2S -Emission auf als bei dem zuvor beschriebenen Versuch.

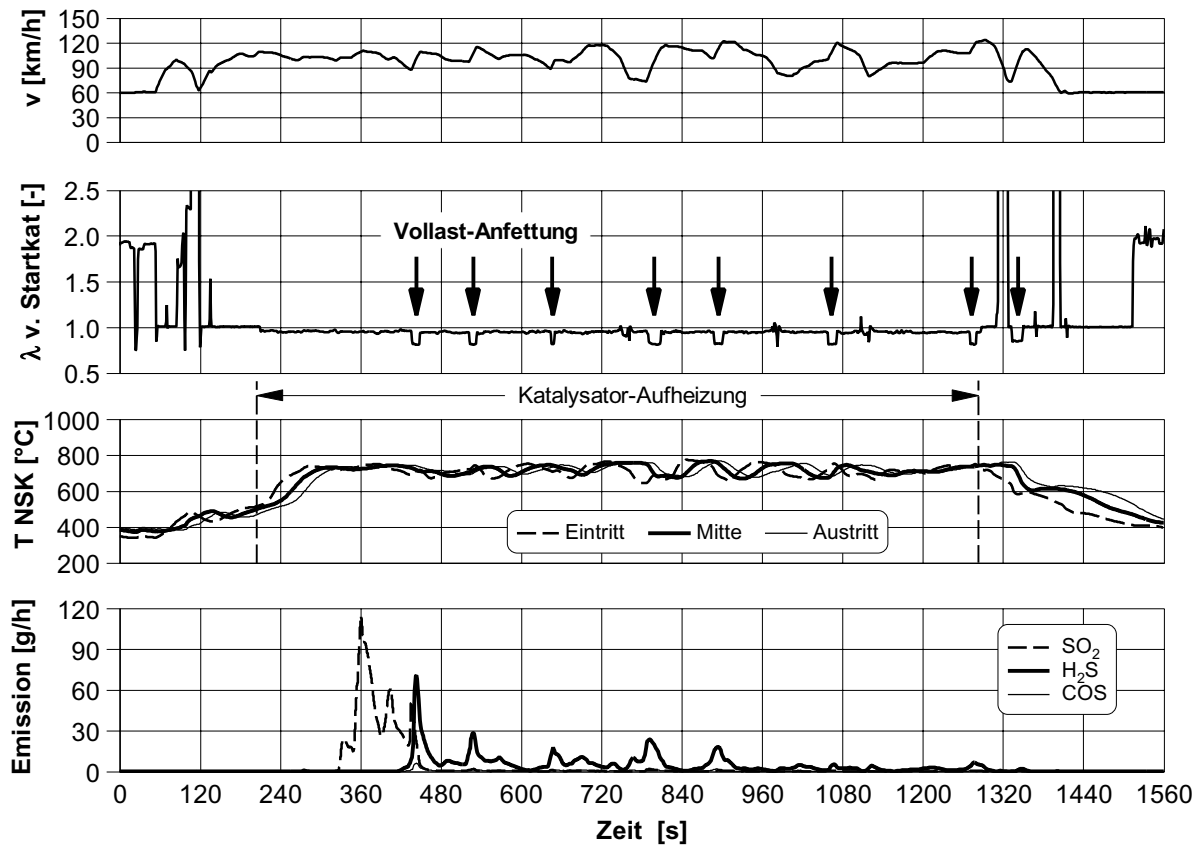


Abb. 7-24: Haupt-Desulfatisierung ohne vorherige Teil-Desulfatisierungen (Desulfatisierung mit $\lambda = 0.98$, bei Vollast $\lambda = 0.85$, Zylinder-Vertrimmung, NSK verschwefelt mit 5 g)

In Abb. 7-25 sind die Verläufe der H₂S-Konzentration im durchfahrenen Volumen $c(\text{H}_2\text{S})^*$ bei den beiden Haupt-Desulfatisierungen gegenübergestellt. Bei der Haupt-Desulfatisierung mit vorherigen Teil-Desulfatisierungen erreicht die H₂S-Konzentration $c(\text{H}_2\text{S})^*$ in den Phasen mit Vollast-Anfettung etwa 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Damit liegt die H₂S-Konzentration noch unter der maximalen Geruchsschwelle von 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Allerdings kann im Hinblick auf die starke Streuung der Literaturangaben zur H₂S-Geruchsschwelle eine Geruchsbildung nicht ausgeschlossen werden. Dies wird durch eine Testfahrt bestätigt, bei der unter vergleichbaren Bedingungen bei Vollast-Anfettung in einem frühen Stadium der Desulfatisierung in einem nachfolgenden Fahrzeug eine leichte Geruchsbildung festgestellt wurde.

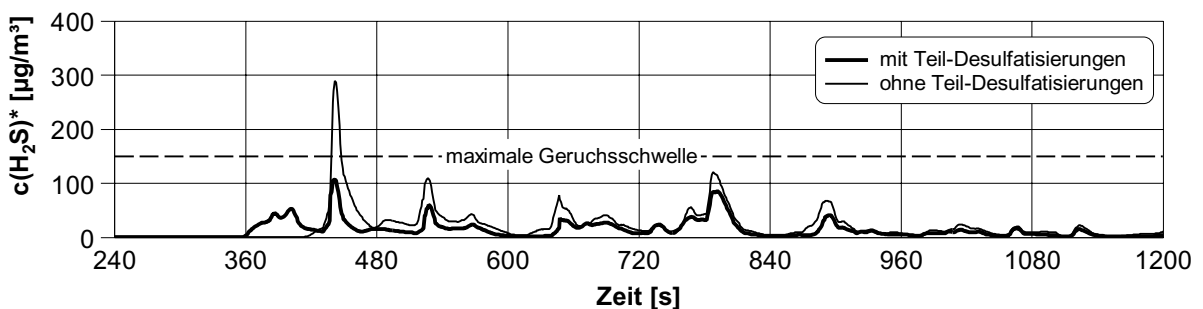


Abb. 7-25: Vergleich der $c(\text{H}_2\text{S})^*$ -Verläufe bei Haupt-Desulfatisierungen mit und ohne vorherige Teil-Desulfatisierungen (Desulfatisierung mit $\lambda = 0.98$, bei Vollast $\lambda = 0.85$)

Bei der Haupt-Desulfatisierung ohne vorherige Teil-Desulfatisierungen beträgt die H₂S-Konzentration $c(\text{H}_2\text{S})^*$ das bis zu 2.5-fache gegenüber dem Versuch mit vorherigen Teil-Desulfatisierungen. Hierbei wird bei der ersten Beschleunigung mit Anfettung bei etwa $t = 440$ s das doppelte der maximalen Geruchsschwelle erreicht, so daß in diesem Fall eine deutliche Geruchsbildung zu erwarten ist. Es ist davon auszugehen, daß eine Vollast-Anfettung zu einem noch früheren Zeitpunkt zu einer noch höheren H₂S-Emission geführt hätte.

Durch noch häufigere Durchführung von Teil-Desulfatisierungen könnte die H₂S-Bildung bei Vollast-Anfettung vermutlich noch weiter verringert werden. Allerdings wäre hiermit ein deutlich höherer Kraftstoffverbrauch verbunden. Somit erscheint es sinnvoll, zusätzlich zu der hier untersuchten Strategie in kritischen Phasen auf eine Vollast-Anfettung zu verzichten. Dieser Ansatz wurde bereits in Kap. 7.2.1.2 diskutiert. In diesem Zusammenhang sei festgestellt, daß die Werte für $c(\text{H}_2\text{S})^*$ in den Desulfatisierungsphasen ohne Anfettung bei beiden Varianten deutlich unter der maximalen Geruchsschwelle liegen. Hieraus wird deutlich, daß eine Desulfatisierung bei $\lambda = 0.98$ ohne Vollast-Anfettung hinsichtlich der Geruchsbildung als unkritisch zu betrachten ist.

Noch zuverlässiger kann eine H₂S-Geruchsbildung durch Lufteinblasung vor einem dem NO_x-Speicher-Katalysator nachgeschalteten Katalysator vermieden werden, wie die in Kap. 7.2.5 beschriebenen Untersuchungen gezeigt haben. Allerdings ist diese Maßnahme sehr aufwendig.

7.3.4 Einfluß von schwefelarmem Kraftstoff auf die Desulfatisierungsstrategie

In Deutschland werden zunehmend Ottokraftstoffe mit einem geringen Schwefelgehalt von maximal 10 mg/kg angeboten (Kap. 2.1.3). Bei Verwendung schwefelarmer Kraftstoffe ist die oben diskutierte Problematik der H₂S-Emission weniger stark ausgeprägt, wenn die Intervalle zwischen den Desulfatisierungen unverändert bleiben. Allerdings ist es aus Verbrauchsgründen sinnvoll, die Desulfatisierungsintervalle entsprechend der geringeren zugeführten Schwefelmenge zu vergrößern. Wichtig ist hierbei, daß durch Diagnose des NO_x-Speicherverhaltens die Verwendung von Kraftstoffen mit höherem Schwefelgehalt beispielsweise bei Betankung im Ausland erkannt wird und entsprechend eine Anpassung der Intervalle erfolgt.

Auch bei Verwendung von schwefelarmem Kraftstoff kommt es zur Akkumulation von Schwefel im NO_x-Speicher-Katalysator. Hinzu kommt, daß in heutigen Motorölen ebenfalls Schwefel enthalten ist. Bei starker Absenkung des Schwefelgehalts im Kraftstoff gewinnt somit der Schwefeleintrag durch das Motoröl an Bedeutung. Heute beträgt der Schwefelgehalt von Motorölen typischerweise etwa 0.2 bis 1 %.

Hieraus wird deutlich, daß auch bei flächendeckender Verfügbarkeit von schwefelarmem Kraftstoff weiterhin eine Strategie zur Desulfatisierung erforderlich ist.

8. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Der NO_x-Speicher-Katalysator bietet ein hohes Potential zur nachmotorischen NO_x-Minderung bei Ottomotoren mit Direkteinspritzung. Die mit einem NO_x-Speicher-Katalysator erreichten NO_x-, HC- und CO-Emissionen sowie der Kraftstoffverbrauch sind dabei stark von den Parametern bei den Nitrat-Regenerationen abhängig.

Wie die in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen zeigen, gibt es für jede Regeneration eine optimale Dauer, bei der sowohl die NO_x-Emission als auch die HC- und CO-Emissionen nach NO_x-Speicher-Katalysator gering sind. Die Regenerationsdauer kann mit Hilfe einer Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator geregelt werden. Bei einer Motordrehzahl $n = 2000$ 1/min und einem effektiven Mitteldruck $p_{me} = 2$ bar kann mit einer binären Lambdasonde bei einem Regenerations-Luftverhältnis von $\lambda_{Reg} = 0.65$ ab einer gespeicherten NO_x-Masse von etwa 1 g eine Regelung nahe der optimalen Regenerationsdauer erfolgen. Bei einer NO_x-Beladung von nur 0.4 g wird dagegen eine um etwa 20 % zu lange Regeneration durchgeführt. Die ebenfalls untersuchte Breitband-Lambdasonde ist zur Regelung der Regenerationsdauer weniger geeignet, da im Vergleich zur binären Lambdasonde generell längere Regenerationen durchgeführt werden.

Ein Luftverhältnis bei der Regeneration von $\lambda_{Reg} = 0.65$ ist optimal im Hinblick auf eine hohe NO_x-Konversion und einen niedrigen Kraftstoffverbrauch. Allerdings tritt hierbei bereits bei geringfügig zu langer Regeneration ein hoher HC- und CO-Durchbruch auf. Dieser Effekt kann durch eine gestufte Vorgabe des Luftverhältnisses verringert werden. Mit einer optimierten Strategie wird durch Übergang von $\lambda_{Reg} = 0.65$ zu $\lambda_{Reg} = 0.75$ nach 60 Arbeitsspielen eine Verringerung der HC- und CO-Emissionen in der Regenerationsphase um 16 % bzw. 51 % erreicht.

Zur Regelung der Adsorptionsdauer kann ein NO_x-Sensor nach NO_x-Speicher-Katalysator eingesetzt werden, der einen zunehmenden NO_x-Schlupf und damit die Notwendigkeit einer Nitrat-Regeneration detektiert. Als Schwellenwert für die Einleitung einer Regeneration ist ein NO_x-Massenstrom von 2 mg/s geeignet.

Im Neuen Europäischen Fahrzyklus (NEFZ) sind zusätzlich Nitrat-Regenerationen erforderlich, wenn bei Beschleunigungen von Magerbetrieb zu $\lambda=1$ -Betrieb gewechselt wird. Hierdurch sind die Zeitpunkte für einige Regenerationen bereits festgelegt. Mit einer Motorabstimmung, bei der ab $p_{me} = 4$ bar zu $\lambda=1$ -Betrieb gewechselt wird, erfolgen mit dem Versuchsfahrzeug im NEFZ insgesamt 11 Regenerationen bei Wechsel zu $\lambda=1$ -Betrieb und 5 Regenerationen wegen hohen NO_x-Schlupfes. Bei Erhöhung der Umschaltsschwelle auf $p_{me} = 5$ bar sind nur noch die Zeitpunkte von 4 Regenerationen fest vorgegeben, hinzu kommen jedoch 17 Regenerationen wegen hohen NO_x-Schlupfes. Diese Variante ist hinsichtlich der Emissionen deutlich ungünstiger als die zuerst genannte Variante mit niedrigerer Umschaltsschwelle.

Mit optimierter Betriebsstrategie wird im NEFZ-Warmtest eine NO_x-Konversion von 99 % erreicht. Der Kraftstoff-Mehrverbrauch gegenüber Betrieb ohne Nitrat-Regenerationen beträgt hierbei 2.3 %, wobei die erforderliche Umsetzung des in den Katalysatoren gespeicherten Sauerstoffs mit einem Mehrverbrauch von 1.8 % einen deutlich größeren Beitrag leistet als die eigentliche NO_x-Umsetzung.

Im NEFZ-Kalttest wird mit einem frischen NO_x-Speicher-Katalysator und optimierter Betriebsstrategie der EU4-Grenzwert für NO_x trotz einer relativ hohen NO_x-Rohemission von 1.7 g/km um 55 % unterschritten. Auch die CO-Emission liegt deutlich unter dem EU4-Grenzwert. Die durch die Durchbrüche bei den Nitrat-

Regenerationen bedingte HC-Emission beträgt nur 13 % des EU4-Grenzwertes und stellt einen relativ kleinen Beitrag zur gesamten HC-Emission dar.

Schwefel im Kraftstoff führt bei dem untersuchten NO_x-Speicher-Katalysator zu einer Schädigung, die durch Desulfatisierungen weitgehend reversibel ist. Zur Desulfatisierung ist ein schwach fettes Luftverhältnis, beispielsweise $\lambda = 0.99$, am besten geeignet, da hierbei der Schwefel überwiegend in Form von SO₂ freigesetzt wird. Bei kleineren Luftverhältnissen steigt die H₂S-Emission und damit die Gefahr einer unangenehmen Geruchsbildung stark an. Allerdings nimmt die erforderliche Dauer für eine vollständige Desulfatisierung bei kleinerem Luftverhältnis ab.

Durch gezielte Heizmaßnahmen kann die Temperatur des NO_x-Speicher-Katalysators um etwa 250 K angehoben werden. Somit sind die zur Desulfatisierung erforderlichen Temperaturen von mindestens etwa 600 °C auch in relativ ungünstigen Fahrzuständen erreichbar. Für die Aufheizung sind eine Lufteinblasung vor Katalysator oder ein als Zylindervertrimmung bezeichnetes Verfahren besser geeignet als Spätzündung, da der für die gleiche Temperaturerhöhung erforderliche Kraftstoff-Mehrverbrauch wesentlich geringer ist.

Die Wahl der Parameter für die Desulfatisierung ist von Zielkonflikten geprägt. Beispielsweise ist zur Vermeidung hoher H₂S-Emissionen, insbesondere auch bei Vollast-Anfettung, eine häufige Desulfatisierung vorteilhaft, während für einen niedrigen Kraftstoffverbrauch eine seltene Desulfatisierung anzustreben ist. Daher wurde eine Strategie entwickelt und erprobt, mit der zusätzlich zu gründlichen Haupt-Desulfatisierungen in relativ geringen Abständen Teil-Desulfatisierungen durchgeführt werden, die zur Vermeidung eines hohen Kraftstoffverbrauchs kürzer als die Haupt-Desulfatisierungen sind und bei niedrigeren Temperaturen erfolgen. Haupt-Desulfatisierungen sind etwa bei einer gespeicherten Schwefelmasse von 5 g erforderlich. Bei einem Schwefelgehalt im Kraftstoff von 50 mg/kg entspricht dies einer Fahrstrecke von etwa 1600 km. Der auf die gesamte Fahrstrecke bezogene Kraftstoff-Mehrverbrauch beträgt in diesem Fall 0.5 %. Werden wie vorgeschlagen jeweils nach Zufuhr von 0.5 g Schwefel zusätzliche Teil-Desulfatisierungen durchgeführt, ergibt sich unter den gleichen Bedingungen insgesamt ein Mehrverbrauch von 1.7 %.

Wie Fahrzeuguntersuchungen auf dem Rollenprüfstand zeigen, kann mit dieser Strategie die H₂S-Emission deutlich verringert werden, eine Geruchsbildung durch H₂S bei Betrieb mit Vollast-Anfettung kann jedoch nicht sicher vermieden werden. Als aufwendiges, aber sehr wirksames Verfahren zur Vermeidung hoher H₂S-Emissionen ist auch eine Lufteinblasung hinter NO_x-Speicher-Katalysator in Verbindung mit einem nachgeschalteten Katalysator möglich. Hierdurch wird eine Oxidation von H₂S zu SO₂ und H₂O herbeigeführt.

Die Schädigung des NO_x-Speicher-Katalysators durch Schwefel und die Gefahr der H₂S-Geruchsbildung werden durch Kraftstoffe mit sehr niedrigem Schwefelgehalt von beispielsweise 10 mg/kg verringert. Derartige Kraftstoffe sind in Deutschland zunehmend flächendeckend erhältlich. Desulfatisierungen sind jedoch auch weiterhin erforderlich, da es auch bei niedrigem Schwefelgehalt im Kraftstoff zu einer Akkumulation von Schwefel im NO_x-Speicher-Katalysator kommt.

Die Untersuchungen zeigen, daß die Betriebsstrategie eines Ottomotors mit Direkteinspritzung und NO_x-Speicher-Katalysator einen wesentlichen Einfluß auf die Emissionen und den Kraftstoffverbrauch hat. Bestmögliche Ergebnisse werden erzielt, wenn die nachfolgend beschriebenen Maßnahmen berücksichtigt werden:

- Vermeidung einer zu langen Dauer der Nitrat-Regenerationen durch Regelung mit einer binären Lambdasonde nach NO_x-Speicher-Katalysator
- Zusätzlicher Einsatz eines mathematischen Katalysatormodells in der Motorsteuerung, um auch bei höheren Motordrehzahlen ein rechtzeitiges Regenerationsende zu erzielen
- Optimierung der Adsorptionsdauer mit Hilfe eines NO_x-Sensors nach NO_x-Speicher-Katalysator
- Optimierung der Größe des Kennfeldbereichs mit Magerbetrieb
- Wahl eines möglichst kleinen Luftverhältnisses zu Beginn der Nitrat-Regeneration, Verringerung der Anfettung mit fortschreitender Regeneration
- Realisierung einer möglichst niedrigen NO_x-Rohemission im Magerbetrieb
- Einsatz eines NO_x-Speicher-Katalysators mit einer möglichst geringen Sauerstoff-Speicherfähigkeit
- Einsatz eines NO_x-Speicher-Katalysators mit großen Volumen und hoher NO_x-Speicherfähigkeit, um möglichst selten Nitrat-Regenerationen durchführen zu müssen
- Desulfatisierung mit leicht fettem Luftverhältnis (etwa $\lambda = 0.99$), auch bereits während der Aufheizphase
- Katalysator-Aufheizung zur Desulfatisierung mit Lufteinblasung oder Zylindertrimmung, sofern die im Fahrbetrieb erreichten Katalysator-Temperaturen nicht ausreichen
- Möglichst Verzicht auf Schubabschaltungen während der Desulfatisierungsphasen, um Unterbrechungen der Schwefelfreisetzung zu vermeiden
- Möglichst Verzicht auf Vollast-Anfettung in Phasen mit starker Schwefelfreisetzung, um eine hohe H₂S-Emission zu vermeiden
- Relativ häufige Durchführung von Desulfatisierungen (Haupt- und Teil-Desulfatisierungen), um die gespeicherte Schwefelmenge gering zu halten und damit eine hohe H₂S-Emission unter ungünstigen Bedingungen zu vermeiden
- Eventuell Lufteinblasung und Einsatz eines weiteren Katalysators hinter dem NO_x-Speicher-Katalysator zur H₂S-Minimierung
- Verwendung von Kraftstoff mit möglichst geringem Schwefelgehalt

Aus den in dieser Arbeit beschriebenen Untersuchungen geht hervor, daß die Abgasnachbehandlung eines Ottomotors mit Direkteinspritzung mittels NO_x-Speicher-Katalysator auch mit optimierter Betriebsstrategie des Motors mit einem nennenswerten Kraftstoff-Mehrverbrauch verbunden ist. Je nach Motorabstimmung, Katalysatortyp, Schwefelgehalt im Kraftstoff und einzuhaltenden Abgasgrenzwerten beträgt der Mehrverbrauch etwa zwischen 2 und 5 %. Hierdurch wird ein Teil des Verbrauchsvorteils durch den Betrieb mit Ladungsschichtung aufgezehrt. Der erhöhte Aufwand gegenüber einem konventionellen Ottomotor mit Drei-Wege-Katalysator ist somit nur gerechtfertigt, wenn der verbleibende Verbrauchsvorteil in einem akzeptablen Verhältnis zu den Mehrkosten durch den Einsatz der Direkteinspritzung und des NO_x-Speicher-Katalysators steht.

9. Literaturverzeichnis

- [1] Krebs, R.; Spiegel, L.; Stiebels, B.
Ottomotoren mit Direkteinspritzung von Volkswagen
8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 1999
- [2] Willand, J.; Vent, G.; Wirbeleit, F.
Können innermotorische Maßnahmen die aufwendige Abgasnachbehandlung ersetzen?
21. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2000
- [3] Tauscher, W.; Buchsbaum, A.; Bichler, G.
Wege und Möglichkeiten zur Bereitstellung von schwefelarmem Kraftstoff
20. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1999
- [4] Noma, K.; Iwamoto, Y.; Murakami, N.; Iida, K.; Nakayama, O.
Optimized Gasoline Direct Injection Engine for the European Market
SAE Technical Paper Series, Nr. 980150, Warrendale, USA, 1998
- [5] Glück, K.; Göbel, U.; Hahn, H.; Höhne, J.; Krebs, R.; Kreuzer, T.; Pott, E.
Die Abgasreinigung der FSI-Motoren von Volkswagen
MTZ Motortechnische Zeitschrift, 61. Jahrgang (2000), S. 402 – 412,
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2000
- [6] Waltner, A.; Niefer, H.; Kemmler, R.; Schön, C.
Bestandsaufnahme und Perspektiven zur Abgasreinigung am Ottomotor –
Auf dem Weg zu Niedrigstemissionen
8. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 1999
- [7] Strehlau, W.; Jeyrer, J.; Lox, E.S.; Kreuzer, T.; Hori, M.; Hoffmann, M.
Lean NOx catalysis for gasoline fueled European cars
Automotive Engineering, Februar 1997
- [8] Kraemer, O.; Jungbluth, G.
Bau und Berechnung von Verbrennungsmotoren
5. Auflage, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1983
- [9] Adler, U. et al.
Kraftfahrtechnisches Taschenbuch
Herausgegeben von Robert Bosch GmbH
21. Auflage, VDI-Verlag, Düsseldorf, 1991
- [10] Schaumburg, H. (Hrsg.)
Sensoranwendungen
B. G. Teubner, Stuttgart, 1995
- [11] Schäfer, F.; van Basshuysen, R.
Schadstoffreduzierung und Kraftstoffverbrauch von Pkw-Verbrennungsmotoren
In: List, H.; Pischinger, A.; Die Verbrennungskraftmaschine, Band 7
Springer Verlag, Wien, New York, 1993

-
- [12] Erdmann, H.-D.
Emissionen in Ottomotoren, Entstehungsmechanismen und motorinterne und externe Maßnahmen
Tagung Zukünftige Abgasgesetzgebungen in Europa und USA: Technische Lösungen; Ottomotoren, Haus der Technik, Essen, 1998
- [13] Beitz, W.; Küttner, K.-H.
Dubbel – Taschenbuch für den Maschinenbau
17. Auflage, Springer Verlag, Berlin u.a., 1990
- [14] Cheng, W.K.; Hamrin, D.; Heywood, J.B.; Hochgreb, S.; Min, K.; Norris, M.
An Overview of Hydrocarbon Emissions Mechanisms in Spark-Ignition Engines
SAE Technical Paper Series , Nr. 932708, Warrendale, USA, 1993
- [15] Pischinger, F.
Verbrennungsmotoren, Band 2
Vorlesungsumdruck, RWTH Aachen, 1996
- [16] Spicher, U.
Verbrennungsmotoren A
Vorlesungsumdruck, Universität Karlsruhe (TH), 1996
- [17] Hasenclever, H.-C.; Schneider, M.
DeNOx am Otto-DI-Motor
Abschlußbericht zum FVV-Vorhaben Nr. 664, FVV-Heft 681
Forschungsvereinigung Verbrennungskraftmaschinen e.V., Frankfurt, 1999
- [18] Weber, M.
Nachweis von oxidierten Stickstoffverbindungen und Überprüfung des photostationären Zustandes in belasteter und unbelasteter Luft
Dissertation, Universität Bonn, 1993
- [19] Esch, G.; Menzel, D.
Health Effects Associated with Nitrogen Oxides
Air Pollution by Nitrogen Oxides, proceedings of the US-Dutch Int. Symposium, 1982
- [20] Lenz, H.P.; Pucher, E.; Kohoutek, P.; Rennenberg, H.; Hahn, J.; Elstner, E.F.; Hippeli, S.
Emissionen, Immissionen und Wirkung von Abgaskomponenten
VDI Fortschrittsberichte Reihe 12 Nr. 183, VDI, Düsseldorf, 1993
- [21] Posthumus, A.C.
Ecological Effects Associated with NOx, Especially on Plants and Vegetation
Air Pollution by Nitrogen Oxides, proceedings of the US-Dutch Int. Symposium, 1982
- [22] N.N.
Abgas-Emissionen – Grenzwerte, Vorschriften und Messung, PKW
DaimlerChrysler AG, 1999

- [23] Schnaibel, E.; Blumenstock, A.
Methoden der Katalysatorüberwachung für zukünftige Abgaskonzepte ($\lambda=1$ und Magerkonzepte)
Tagung Zukünftige Abgasgesetzgebungen in Europa und USA: Technische Lösungen; Ottomotoren, Haus der Technik, Essen, 1998
- [24] Eichlseder, H.; Baumann, E.; Hoss, B.; Müller, P.; Neugebauer, S.
Herausforderungen auf dem Weg zur EU IV-Emissionserfüllung bei Otto-Direkteinspritzmotoren
21. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2000
- [25] Günther, J.; Kemmler, R.; Krutzsch, B.; Schön, C.;
Einfluß von Kraftstoffschwefel auf zukünftige Fahrzeugabgasreinigungssysteme für magerbetriebene Ottomotoren
2nd International Colloquium Fuels, Technische Akademie Esslingen, 1999
- [26] Eichlseder, H.; Baumann, E.; Müller, P.; Neugebauer, S.
Chancen und Risiken von Ottomotoren mit Direkteinspritzung
MTZ Motortechnische Zeitschrift, 61. Jahrgang (1999), S. 144 - 152, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2000
- [27] Quissek, F.; König, A.; Abthoff, J.; Dorsch, H.; Krömer, G.; Sebbecke, W.; Stanski, U.
Einfluß des Schwefelgehalts im Kraftstoff auf das Abgasemissionsverhalten von PKW
19. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1998
- [28] Wolkenstein, P.
Optimax statt Super Plus
mot , Heft 10/2000, S. 11, Vereinigte Motor-Verlage, Stuttgart
- [29] N.N.
Schwefel im Sprit: Das Ende beginnt
ADAC motorwelt 6/2000, ADAC, München, 2000
- [30] Aral AG
Pressemeldung vom 25.04.2000
Internetadresse <http://www.aral.de>
- [31] Deutsche Shell AG
Presseinformation von 10.05.2000
Internetadresse <http://www.shell.com/de-de>
- [32] Krämer, M.; Abthoff, J.; Duvinage, F.; Ruzicka, N., Krutzsch, B.; Liebscher, T.
Possible Exhaust Gas Aftertreatment Concepts for Passenger Car Diesel Engines with Sulphur-free Fuel
SAE Technical Paper Series , Nr. 1999-01-1328, Warrendale, USA, 1999
- [33] Kuder, J.; Kruse, T.
Parameteroptimierung an Ottomotoren mit Direkteinspritzung
MTZ Motortechnische Zeitschrift, 61. Jahrgang (2000), S. 378 – 384, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2000

- [34] Preussner, C.; Kampmann, S.
Benzin-Direkteinspritzung – eine neue Herausforderung für zukünftige Motorsteuerungssysteme; Teil 2: Einspritzventil und Gemischbildung
MTZ Motortechnische Zeitschrift, 58. Jahrgang (1997), S. 592 – 598,
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1997
- [35] Preussner, C.; Doering, C.; Fehler, S.; Kampmann, S.
GDI: Interaction between Mixture Preparation, Combustion System and Injector Performance
SAE Technical Paper Series , Nr. 980498, Warrendale, USA, 1998
- [36] Kume, T.; Iwamoto, Y.; Iida, K.; Murakami, M.; Akishino, K.; Ando, H.
Combustion Control Technologies for Direct Injection SI Engine
SAE Technical Paper Series , Nr. 960600, Warrendale, USA, 1996
- [37] Kuesell, M.; Moser, W.; Philipp, M.
Motronic MED7 for Gasoline Direct Injection Engines: Engine Management System and Calibration Procedures
SAE Technical Paper Series, Nr. 1999-01-1284, Warrendale, USA, 1999
- [38] Iwamoto, Y.; Noma, K.; Nakayama, O.; Yamauchi, T.; Ando, H.
Development of Gasoline Direct Injection Engine
SAE Technical Paper Series, Nr. 970541, Warrendale, USA, 1997
- [39] Grebe, U.D.; Königstein, A.; Krieger, T.
Benzindirekteinspritzung – Anforderungen von der Fahrzeugseite an das Motorkonzept
3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren,
Stuttgart, 1999
- [40] Hasenclever, H.
Der NO_x-Speicher-Katalysator am DI-Ottomotor
Dissertation, Technische Universität Darmstadt,
VDI Fortschrittsberichte Reihe 12 Nr. 397, VDI, Düsseldorf, 1999
- [41] Grebe, U.D.; Königstein, A.; Friedrich, C.; Schaffner, P.; Indra, F.
Systemvergleich zwischen Ottomotoren mit Direkteinspritzung und drosselklappenfreier Laststeuerung durch variable Ventiltriebe
20. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1999
- [42] Holy, G.; Piock, W.F.; Unger, E.
Verbrauchsorientierte Otto-Direkteinspritzung für EURO III/IV
Tagung Zukünftige Abgasgesetzgebungen in Europa und USA: Technische Lösungen; Ottomotoren, Haus der Technik, Essen, 1998
- [43] Krämer, M.; Maly, R.R.; Willand, J.; Pischinger, S.; Krutzsch, B.; Gruden, I.; Voigtländer, D.
Emissionsreduzierung beim mager betriebenen Ottomotor
16. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1995
- [44] Fraidl, G.K.; Piock, W.F.; Wirth, M.
Die Direkteinspritzung als Basis zukünftiger Ottomotorkonzepte
19. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1998

- [45] Angel, M.
Untersuchungen zum Vollastverhalten eines Ottomotors mit innerer Gemischbildung
Diplomarbeit, Technische Universität Ilmenau, 1997
- [46] Grimm, H.
Die Emission von Benzol und anderen Kohlenwasserstoffen im Abgas von Ottomotoren und ihre Beeinflussung durch katalytische Abgasnachbehandlung
Dissertation, Technische Universität Clausthal, 1988
- [47] Wolters, P.; Grigo, M.
Entwicklung von Ottomotoren mit Direkteinspritzung: Motorkonzepte und Entwicklungswerkzeuge
Tagung Direkteinspritzung im Ottomotor, Haus der Technik, Essen, 1997
- [48] Stutzenberger, H.; Preussner, C.; Gerhardt, J.
Benzin-Direkteinspritzung für Ottomotoren – Entwicklungsstand und Ausblick
17. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1996
- [49] Krebs, R.
Methodik zur Entwicklung eines Ottomotors mit Direkteinspritzung
Vortrag, Seminar für Verbrennungsmotoren, Universität Karlsruhe (TH), 1999
- [50] Karl, G.; Abthoff, J.; Bargende, M.; Kemmler, R.; Kühn, M.; Bubeck, G.
Thermodynamische Analyse eines direkteinspritzenden Ottomotors
17. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1996
- [51] Niefer, H.; Frey, J.; Karl, G.; Krämer, S.
Der DE-Ottomotor: Quo vadis – wohin führt der Weg?
20. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1999
- [52] Fraidl, G.K.; Piock, W.F.; Holy, G.; Unger, E.M.; Wirth, M.
Otto-Direkteinspritzung – das Verbrauchskonzept für EURO 4
20. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1999
- [53] Zhang, H.; Pflieger, C.; Lemire, B.
Integration eines Smart NO_x-Sensors im Abgasstrang für die Benzindirekteinspritzung
21. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2000
- [54] Hepburn, J.; Kenney, T.; McKenzie, J.; Thanasiu, E.; Dearth, M.
Engine and Aftertreatment Modeling for Gasoline Direct Injection
SAE Technical Paper Series, Nr. 982596, Warrendale, USA, 1998
- [55] Ernst, J.
Untersuchungen zur Emission unverbrannter Kohlenwasserstoffe beim Ottomotor mit Direkteinspritzung und strahlgeführtem Brennverfahren
Dissertation, Universität Karlsruhe, 2001
- [56] Krämer, S.
Untersuchung zur Gemischbildung, Entflammung und Verbrennung beim Ottomotor mit Benzin-Direkteinspritzung
Dissertation, Universität Karlsruhe (TH),
VDI Fortschrittsberichte Reihe 12 Nr. 353, VDI, Düsseldorf, 1998

- [57] Hertzberg, A.
Untersuchung des Spritzverhaltens von Einspritzdüsen und dessen Einfluß auf das motorische Verhalten bei Benzin-Direkteinspritzung
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 1995
- [58] Tschöke, H.; Buhr, R.
Einfluß des Brennraumes eines Otto-DI-Motors auf Verbrauch und Abgasemissionen
Tagung Direkteinspritzung im Ottomotor, Haus der Technik, Essen, 1997
- [59] Niefer, H.; Frey, J.; Krämer, S.; Karl, G.
Der Direkteinspritz-Ottomotor im Spannungsfeld zwischen Euphorie und Wirklichkeit
3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Stuttgart, 1999
- [60] Klenk, R.
Untersuchung der motorischen Eigenschaften unterschiedlicher Brennverfahren der Benzin-Direkteinspritzung
Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1999
- [61] Rieger, T.K.
Auswirkung des Verdichtungsverhältnisses und der luftseitigen Beeinflussung der Gemischbildung auf das motorische Verhalten bei Benzin-Direkteinspritzung
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 1996
- [62] Hertzberg, A.; Klenk, R.; Vent, G.
Untersuchungen an einem direkteinspritzenden Ottomotor mit luftgeführtem Brennverfahren
In: Spicher, U.; Direkteinspritzung im Ottomotor II
Expert Verlag, Renningen, 2000
- [63] Hasenclever, H.-C.; Hohenberg, G.
Motorische Auswirkungen der Synthese von DI-Ottomotor und NOx-Speicherkatalysator
3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, 1999
- [64] Moser, W.; Mentgen, D.; Rembold, H.
Benzin-Direkteinspritzung – eine neue Herausforderung für zukünftige Motorsteuerungssysteme; Teil 1: Einspritzsystem und Motorsteuerung
MTZ Motortechnische Zeitschrift, 58. Jahrgang (1997), S. 458 – 464,
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1997
- [65] Spicher, U.; Weimar, H.-J.
Direkteinspritzung bei Ottomotoren: Hintergrund und theoretische Grundlagen
Tagung Direkteinspritzung im Ottomotor, Haus der Technik, Essen, 1997
- [66] Goppelt, G.
Der neue Ottomotor mit Direkteinspritzung von Renault
MTZ Motortechnische Zeitschrift, 60. Jahrgang (1999), S. 530 – 534,
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1999
- [67] Kasedorf, J.
Benzineinspritzung und Katalysatortechnik
Vogel Buchverlag, Würzburg, 1995

- [68] Voigtländer, D.
Untersuchungen zur Stickoxidminderung an mager betriebenen Ottomotoren mit NO_x-Speicher-Katalysatoren
Dissertation, Technische Universität Dresden, 1998
- [69] Kaspar, J.; Fornasiero, P.; Graziani, M.
Use of CeO₂-based Oxides in the Three-Way Catalysis
Catalysis Today, Vol. 50, S. 285 – 298, Elsevier Science B.V., Amsterdam, Niederlande, 1999
- [70] Yao, H.C.; Yao, F.Y.
Ceria in Automotive Exhaust Catalysts, I Oxygen Storage
Journal of Catalysis, Vol. 86, Academic Press, Orlando, USA, 1994
- [71] Truex, T.J.
Interaction of Sulfur with Automotive Catalysts and the Impact on Vehicle Emissions – A Review
SAE Technical Paper Series, Nr. 1999-01-1543, Warrendale, USA, 1999
- [72] Adler, U. et al.
Autoelektrik, Autoelektronik am Ottomotor
Herausgegeben von Robert Bosch GmbH, 2. Auflage, VDI Verlag, Düsseldorf, 1994
- [73] Brogan, M.S.; Will, N.S.; Twigg, M.V.; Wilkins, A.J.
Recent developments in denox-catalyst technology for Diesel and lean-burn gasoline engines
6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 1997
- [74] Brandt, S.; Dahle, U.; Hochmuth, J.K.; Deeba, M.
Entwicklungsfortschritte bei NO_x-Adsorber Katalysatoren für magerbetriebene Ottomotoren
3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Stuttgart, 1999
- [75] Lörch, H.
Katalysierte NO_x-Entfernung aus Abgasen von Diesel- und Otto-DI-Motoren mittels HC-SCR- und NO_x-Speicher-Reduktions-Katalysatoren
Dissertation, Universität Karlsruhe (TH), 1998
- [76] Hori, M; Okumura, A.; Goto, H.; Horiuchi, M.
Development of New Selective NO_x Reduction Catalyst for Gasoline Leanburn Engines
SAE Technical Paper Series, Nr. 972850, Warrendale, USA, 1997
- [77] Montag, U.
Einfluß von Schwefel im Kraftstoff auf bestehende und zukünftige Fahrzeugabgasreinigungssysteme für Ottomotoren
Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), 1998
- [78] Dahle, U.
Abgasreinigungssystem für DI-Motor
MTZ Motortechnische Zeitschrift, 60. Jahrgang (1999), S. 808, Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1999

- [79] Schürz, W.; Ellmer, D.
Anforderungen an das Motormanagementsystem bei Anwendung von NO_x-Speicherkatalysatoren
7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 1998
- [80] Marquardt, K.-J.; Braun, T.; Binder, K.
Ein Abgasnachbehandlungssystem für Dieselmotoren auf Basis der SCR-Technologie
3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Stuttgart, 1999
- [81] Hühwohl, G.; Maurer, B.
Abgasreinigungssysteme zur Erfüllung der Emissionsrichtlinien EURO IV, Stufe 1 und 2
9. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 2000
- [82] Held, W.; König, A.; Richter, T.; Puppe, L.
Catalytic NO_x reduction in net oxidizing exhaust gas
SAE Technical Paper Series, Nr. 900496, Warrendale, USA, 1990
- [83] Weisweiler, W.; Schneider, M.
NO_x-Speicher-Reduktions-Katalysatoren zur NO_x-Minderung in sauerstoffreichen Abgasen
3. Stuttgarter Symposium Kraftfahrwesen und Verbrennungsmotoren, Stuttgart, 1999
- [84] Miyoshi, N. et al.
Development of New Concept Three-Way-Catalyst for Automotive Lean-Burn Engines
SAE Technical Paper Series, Nr. 950809, Warrendale, USA, 1995
- [85] Brogan, M.S.; Brisler, R.J.; Walker, A.P.; Webster, D.E.; Boegner, W.; Fekete, N.P.; Krämer, M.; Krutzsch, B.; Voigtländer, D.
Evaluation of NO_x Storage Catalysts as an Effective System for NO_x Removal from the Exhaust Gas of Leanburn Gasoline Engines
SAE Technical Paper Series, Nr. 952490, Warrendale, USA, 1995
- [86] Dearth, M.; Hepburn, J.S.; Thanasiu, E.; McKenzie, J.; Horne, G.S.
Sulfur interaction with Lean NO_x traps: Laboratory and Engine Dynamometer Studies
SAE Technical Paper Series, Nr. 982595, Warrendale, USA, 1998
- [87] Guyon, M.; Blejean, F.; Bert, C.; Le Faou, P.
Impact of Sulfur on NO_x Trap Catalyst Activity – Study of the Regeneration Conditions
SAE Technical Paper Series, Nr. 982607, Warrendale, USA, 1998
- [88] Philips, P.; Grieser, K.; Mayer, T.; Dickers, G.; Wallbrück, B.
Fiesta Magerkonzept für Stufe III Emissionen
6. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik, Aachen, 1997
- [89] Miyoshi, N.; Matsumoto, S.; Katoh, K.
Development of New Concept Three-Way Catalyst for Automotive Lean-Burn Engines
SAE Technical Paper Series, Nr. 950809, Warrendale, USA, 1995

- [90] Asanuma, T.; Takeshima, S.; Yamashita, T.; Tanaka, T.
Influence of Sulfur Concentration in Gasoline on NO_x Storage-Reduction Catalyst
SAE Technical Paper Series, Nr. 1999-01-3501, Warrendale, USA, 1999
- [91] Pott, E.; Splisteser, G.; Bosse, R.; König, A.; Quissek, F.-J.; Kutschera, I.
Potential der NO_x-Speicherkatverfahrens bei DI-Dieselmotoren
20. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 1999
- [92] Lake, T.H.; Bending, R.G.; Williams, G.P.; Beaumont, A.J.; Warburton, A.; Andersson, J.
Entwicklung eines Regel- und Abgasnachbehandlungssystems für einen GDI-Motor
MTZ Motortechnische Zeitschrift, 60. Jahrgang (1999), S. 800 – 807,
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1999
- [93] Koch, M.
Mager-Sucht
Auto Motor und Sport, Heft 17/1997, S. 34-38, Vereinigte Motor-Verlage,
Stuttgart
- [94] Fekete, N.P.; Kemmler, R.; Voigtländer, D.; Krutzsch, B.; Zimmer, E.; Wenninger, G.; Strehlau, W.; Lox, E.S.; Müller, W.; van den Tillaart, J.A.A.
Evaluation of NO_x Storage Catalysts for Lean Burn Gasoline Fueled Passenger Cars
SAE Technical Paper Series, Nr. 970746, Warrendale, USA, 1997
- [95] Fraidl, G.K.; Mayerhofer, Piock, W.; Wirth, M.
Entwicklungsrichtungen und Synergiepotentiale am Ottomotor mit Direkteinspritzung
In: Spicher, U.; Direkteinspritzung im Ottomotor II
Expert Verlag, Renningen, 2000
- [96] Goebel, U.; Hoehne, J.; Lox, E.; Mueller, W.; Okumura, A.; Ruwisch, L.M.
Durability Aspects of NO_x Storage Catalysts for Direct Injection Gasoline Vehicles
In: Spicher, U.; Direkteinspritzung im Ottomotor II
Expert Verlag, Renningen, 2000
- [97] Brogan, M.; Swallow, D.; Rickwood, E.; Brisley, R.; Twigg, M.; Walker, A.; Rajaram, R.; Millington, P.
Advances in Exhaust Gas Aftertreatment for Direct Injection Gasoline Vehicles
In: Spicher, U.; Direkteinspritzung im Ottomotor II
Expert Verlag, Renningen, 2000
- [98] Heck, R.M.; Farrauto, R.J.
Catalytic Air Pollution Control
Chapman & Hall GmbH, Weinheim, 1995
- [99] Goebel, U.; Hoehne, J.; Lox, E.S.; Mueller, W.; Okumura, A.; Strehlau, W.
Durability Aspects of NO_x Storage Catalysts for Direct Injection Vehicles
SAE Technical Paper Series, Nr. 1999-01-1285, Warrendale, USA, 1999

- [100] Koga, K. et al.
Vorrichtung und Verfahren für die Regelung einer Verbrennungskraftmaschine
Deutsche Patentanmeldung DE19522165 C2, 1995
- [101] Krzykowski, H.; Philips, P.; Dickers, G.; Grieser, K.; Mayer, T.E.
Verfahren zur Regelung der Temperatur einer Katalysatoranordnung sowie
Vorrichtung zur Durchführung des Verfahrens
Europäische Patentanmeldung EP 0856645 A1, 1998
- [102] Grieser, K.; Himmelsbach, J.
Abgasanlage für einen Verbrennungsmotor
Europäische Patentanmeldung EP 0905355 A2, 1998
- [103] Hartick, J.
A Compact Temperature Control System for Lean Exhaust Gas to Improve
Conversion Performance of NO_x Aftertreatment
SAE Technical Paper Series, Nr. 1999-01-3497, Warrendale, USA, 1999
- [104] Hartick, J.; Moore, J.S.; Brogan, M.S.
Temperature control of exhaust gas from a lean tune gasoline engine to help
meet stringent emissions requirements
IMEchE Paper, Nr. S490/013/97, London, Großbritannien, 1998
- [105] Erkfeldt, S.; Larsson, M.; Hedblom, H.; Skoglundh, M.
Sulphur Poisoning and Regeneration of NO_x Trap Catalyst for Direct Injected
Gasoline Engines
SAE Technical Paper Series, Nr. 1999-01-3504, Warrendale, USA, 1998
- [106] Dou, D.; Bailey, O.H.
Investigation on NO_x Adsorber Catalyst Deactivation
SAE Technical Paper Series, Nr. 982594, Warrendale, USA, 1998
- [107] Diwell, A.F.; Hamilton, H.G.C.; Rajaram, R.R.; Brogan, M.
Combatting air pollution
Europäische Patentanmeldung EP 0814242 A1, 1997
- [108] Schmiedel, H. et al.
Einfluß des Schwefelgehalts im unverbleiten Ottokraftstoff auf die Wirksamkeit
von Abgaskatalysatoren
Forschungsbericht DGMK-Projekt 493, Deutsche Wissenschaftliche
Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle e.V., Hamburg, 1994
- [109] Strehlau, W.; Leyrer, J.; Lox, E.S.; Kreuzer, T.; Hori, M.; Hoffmann, M.
New Developments in Lean NO_x Catalysis for Gasoline Fueled Passenger
Cars in Europe
SAE Technical Paper Series, Nr. 962047, Warrendale, USA, 1996
- [110] Schneider, M.; Weisweiler, W.
NO_x-Speicher-Reduktions-Katalysatoren zur katalysierten Reinigung von
Abgasen mager betriebener Verbrennungsmotoren
In: Spicher, U.; Direkteinspritzung im Ottomotor II
Expert Verlag, Renningen, 2000
- [111] Breuer, H.
dtv-Atlas zur Chemie, Band 1 Allgemeine und anorganische Chemie
7. Auflage, Deutscher Taschenbuch Verlag, München, 1994

- [112] Kühn, R.; Birett, K.
Merkblätter Gefährliche Arbeitsstoffe
118. Ergänzende Lieferung 6/99, Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg,
1999
- [113] Bauer, H.
Emissionen und ihre Wirkungen, Handbuch des Umweltschutzes und der
Umweltschutztechnik, Bd. 1
Springer Verlag, 1996
- [114] Leichnetz, K.
Prüfröhrchen-Taschenbuch
7. Ausgabe, Drägerwerk AG, Lübeck, 1988
- [115] Hamm, E.
Abgasgeruch von Verbrennungsmotoren
Dissertation, Technische Universität Darmstadt,
VDI Fortschrittsberichte Reihe 12 Nr. 410, VDI, Düsseldorf, 1999
- [116] Klingenberg, H; Schürmann, D.
Nicht limitierte Automobil-Abgaskomponenten
Volkswagen AG, Wolfsburg, 1988
- [117] Beyer, H.; Walter, W.
Lehrbuch der organischen Chemie
21. Auflage, Hirzel Verlag, Stuttgart, 1988
- [118] Strese, G. et al.
Gas-Atlas
Bundesanstalt für Arbeitsschutz, Dortmund, 1989
- [119] Neumüller, O.
Römpps Chemie-Lexikon
8. Auflage, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart, 1983
- [120] Sorbe, G.
Sicherheitstechnische Kenndaten
CD-ROM, Ausgabe 05/2000, Ecomed Verlagsgesellschaft, Landsberg
- [121] Kunkel, R.
Persönliche Mitteilung, 19.10.2000
Messer Griesheim, Duisburg
- [122] Hohenberg, G.; Hamm, E.
Geruchsprobleme von DI-Ottomotoren
21. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2000
- [123] Ikeda, Y.; Sobue, K.; Tsuji, S.; Matsumoto, S.
Development of NOx Storage-Reduction Three-way Catalyst for D-4 Engines
SAE Technical Paper Series, Nr. 1999-01-1279, Warrendale, USA, 1999
- [124] Ogai, M.
Exhaust gas purifying catalyst
Europäische Patentanmeldung EP 0857511 A2, 1998
- [125] Hepburn, J.S.; Thanasiu, E.; Dobson, D.A.; Watkins, W.A.
Experimental and Modeling Investigations of NOx Trap Performance
SAE Technical Paper Series, Nr. 962051, Warrendale, USA, 1996

- [126] Kreuzer, T.
Interview
MTZ Motortechnische Zeitschrift, 60. Jahrgang (1999), S. 810 f.,
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 1999
- [127] Baur, B.; Hertzberg, A.; Koch, C.R.; Biemelt, A.
Verfahren zum Wechseln der Betriebsart einer direkteinspritzenden Otto-
Brennkraftmaschine
Deutsche Patentanmeldung DE 19824915 C1, 1998
- [128] Bauer, H.; Benninger, N.; Maienberg, U.
Steuereinrichtung für eine direkteinspritzende Brennkraftmaschine
Deutsche Patentanmeldung DE 19631986 A1, 1996
- [129] Hertzberg, A.; Koch, C.R.
Strategien für den Betriebsartwechsel beim direkteinspritzenden Ottomotor
Daimler-Benz AG, Interner Bericht F1M-96-0071, 1996
- [130] Robert Bosch GmbH
Produkt-Information Planare Breitband-Lambda-Sonde
Internetadresse <http://www.bosch.de/k/de/products/prod/lambda.html>, 2000
- [131] Neumann, H.; Hötzel, G.; Lindemann, G.
Advanced Planar Oxygen Sensors for Future Emission Control Strategies
SAE Technical Paper Series, Nr. 970459, Warrendale, USA, 1997
- [132] Krebs, R.; Stiebels, B.; Spiegel, L.; Pott, E.
FSI – Ottomotor mit Direkteinspritzung im Volkswagen Lupo
21. Internationales Wiener Motorensymposium, Wien, 2000
- [133] Larsson, M.; Andersson, L.; Fast, O.; Litorell, M.
NOx Trap Control by Physically Based Model
SAE Technical Paper Series, Nr. 1999-01-3503, Warrendale, USA, 1999
- [134] Penner, S.
Abstimmung einer NOx-Speicher-Katalysatorkonfiguration hinsichtlich der
Motorsteuerungsfunktionen zum Betrieb an einem direkteinspritzenden
Ottomotor
Diplomarbeit, Fachhochschule Kaiserslautern, 1999
- [135] Bailey, O.H.; Dou, D.; Denison, G.W.
Regeneration Strategies for NOx Adsorber Catalysts
SAE Technical Paper Series, Nr. 972845, Warrendale, USA, 1997
- [136] Philips, P.; Erdmann, R.; Grieser, K.
Verfahren zur Regeneration einer Stickoxidfalle im Abgassystem eines
Verbrennungsmotors
Deutsche Patentanmeldung DE 19741079 A1, 1997
- [137] Katoh, K. et al.
Exhaust Gas Cleaning Device for an Internal Combustion Engine
Europäische Patentanmeldung EP 0636770 A1, 1995
- [138] Kato, N.; Kokune, N.; Lemire, B.; Walde, T.
Long Term Stable NOx Sensor with Integrated In-Connector Control
Electronics
SAE Technical Paper Series, Nr. 1999-01-0202, Warrendale, USA, 1999

- [139] Dickers, G.; Mayser, T.E.; Philips, P.; Grieser, K.
Verfahren zur Entschwefelung einer Stickoxidfalle im Abgassystem eines
Verbrennungsmotors
Europäische Patentanmeldung EP 0860595 A1, 1998
- [140] Schürz, W.
Verfahren zur Regeneration eines Speicherkatalysators
Europäische Patentanmeldung EP 0858837 A2, 1998
- [141] Cullen, M.J.; Farmer, D.G.; Hepburn, J.S.; Brandt, A.W.
Method and apparatus for maintaining catalyst efficiency of a NOx trap
Europäische Patentanmeldung EP 0869263 A1, 1997
- [142] Asik, J.R.; Meyer, G.M.
Method and apparatus for desulfating a NOx trap
US-amerikanische Patentanmeldung US 5758493, 1996
- [143] Ottowitz, A.; Pfalzgraf, B.
Verfahren zum Betreiben einer mehrzylindrigen Brennkraftmaschine mit
Direkteinspritzung in den Zylinder
Europäische Patentanmeldung EP 0902172 A2, 1998
- [144] Hepburn, J.S.; Meyer, G.M.; Asik, J.R.
Method and apparatus for desulphating a NOx trap
Europäische Patentanmeldung EP 0899430 A2, 1998
- [145] Asanuma, T.; Kihara, T.; Takeshima, S.; Tanaka, T.; Katoh, K.; Iguchi, S.
An exhaust purification device of an engine
Europäische Patentanmeldung EP 0733787 A2, 1996
- [146] Voigtländer, D.; Wenninger, G.; Krutzsch, B.; Boegner, W.; Karl, G.; Schön, C.
Verbrennungsmotoranlage mit Stickoxid-Speicherkatalysator und
Betriebsverfahren hierfür
Deutsche Patentanmeldung DE 19747222 C1, 1997
- [147] Hepburn, J.S.
Verfahren sowie Vorrichtung zur Überwachung der Wirksamkeit einer NOx-
Falle
Deutsche Patentanmeldung DE 19744738 A1, 1997
- [148] Hepburn, J.S.
Verfahren sowie Vorrichtung zur Überwachung der Wirksamkeit einer NOx-
Falle
Deutsche Patentanmeldung DE 19744579 A1, 1997
- [149] Meitzler, A.H.
Application of Exhaust-Gas-Oxygen Sensors to the Study of Storage Effects in
Automotive Three-Way Catalysts
SAE Technical Paper Series, Nr. 800019, Warrendale, USA, 1980
- [150] Robert Bosch GmbH
Vorläufiges Kenndatenblatt Y 258 K12 083 Breitband-Lambdasonde LSU mit
Auswerteschaltung AWS
Stuttgart, 1995

- [151] Hewlett-Packard Company
Produktinformation HP Algorithm Prototyping System
1998
- [152] Kato, N.; Hamada, Y.; Kurachi, H.
Performance of Thick Film NO_x Sensor on Diesel and Gasoline Engines
SAE Technical Paper Series, Nr. 970858, Warrendale, USA, 1997
- [153] ETAS GmbH Co. KG
Lambda Meter LA3 Benutzerhandbuch
Schwieberdingen, 1996
- [154] Brettschneider, J.
Berechnung des Luftverhältnisses λ von Luft-Kraftstoff-Gemischen und des
Einflusses von Meßfehlern auf λ
Bosch Technische Berichte, 6, S. 177 – 186, 1979
- [155] Rosemount
Bedienungsanleitung Binos 1000
Hanau, 1992
- [156] Pierburg GmbH
Bedienungsanleitung FID PM–2000
Neuss, 1993
- [157] Pierburg GmbH
Bedienungsanleitung CLD PM–2000
Neuss, 1993
- [158] Siemens AG
Bedienungsanleitung Oxymat 5
Karlsruhe, 1990
- [159] Spicher, U.
Methoden zur Analyse der motorischen Verbrennung
Vorlesungsumdruck, Universität Karlsruhe (TH), 1996
- [160] Hausschulz, G. et al.
Emissions- und Immissionsmeßtechnik im Verkehrswesen
Verlag TÜV Rheinland, Köln, 1983
- [161] Akashi, K.; Inoue, K.; Adachi, M.; Ishida, K.; Villinger, J.; Federer, W.;
Dornauer, A.
Utilization of a Soft Ionization Mass Spectrometer for Ultra High Sensitivity and
Fast Response Emission Measurements
SAE Technical Paper Series, Nr. 980046, Warrendale, USA, 1998
- [162] V&F Analysetechnik GmbH
Benutzerhandbuch AIRSENSE 500,
Absam, Österreich, 1998
- [163] Schoder, T.
Systematische Untersuchungen zum Regenerationsverhalten verschwefelter
NO_x-Speicherkatalysatoren
Diplomarbeit, Fachhochschule Aalen, 1999

- [164] Ebner, W.
Einsatzmöglichkeiten der Massenspektrometrie mit chemischer Ionisierung zur Analyse von Abgaskomponenten aus Verbrennungsmotoren
Diplomarbeit, Fachhochschule für Technik Esslingen, 1997
- [165] AVL List GmbH
Gerätehandbuch AVL 415 Rauchwertmeßgerät
Graz, Österreich, 1992
- [166] Horiba Instruments Inc.
Horiba VETS 9000 AK Vehicle Emission Test System, Reference Manual
Kyoto, Japan, 1994
- [167] Horiba Instruments Inc.
Instruction Manual MEXA-9430 D
Kyoto, Japan, 1994
- [168] Fortnagel, M.; Heil, B.; Giese, J.; Mürwald, M.; Weining, H.K.; Lückert, P.
Technischer Fortschritt durch Evolution – Neue Vierzylinder-Ottomotoren von Mercedes-Benz auf Basis des erfolgreichen M111
MTZ Motortechnische Zeitschrift, 61. Jahrgang (2000), S. 582 – 590,
Vieweg Verlag, Wiesbaden, 2000
- [169] Nishizawa, K.; Yamada, T.; Ishizuka, Y.; Inoue, T.
Technologies for Reducing Cold-Start Emissions of V6 ULEVs
SAE Technical Paper Series , Nr. 971022, Warrendale, USA, 1997
- [170] Kollmann, K.; Abthoff, J.; Zahn, W.
Secondary Air Injection with a New Developed Electrical Blower for Reduced Exhaust Emissions
SAE Technical Paper Series , Nr. 940472, Warrendale, USA, 1994
- [171] Piock, W.; Wirth, M.
Verfahren zur Einbringung von Kraftstoff in den Brennraum einer direkteinspritzenden Otto-Brennkraftmaschine
Europäische Patentanmeldung EP 0864734 A2, 1998
- [172] Peters, B.
Numerische Simulation des 3-Weg-Katalysators bei instationärer Motorbetriebsweise
Dissertation, RWTH Aachen, 1990
- [173] Robert Bosch GmbH
Erstausrüstungs-Information Elektrische Sekundärluftpumpe
Stuttgart, 1997
- [174] Robert Bosch GmbH
Technische Kundenunterlage Y 130 K10 025
1998
- [175] N.N.
MVAG Formelsammlung
Daimler-Benz AG, Stuttgart, 1992

10. Abkürzungen und Formelzeichen

λ	Luftverhältnis
λ_{Reg}	Luftverhältnis bei der Nitrat-Regeneration
κ	Adiabatexponent
Abb.	Abbildung
AGR	Abgasrückführung
AGR-Rate	Abgasrückführrate
Al	Aluminium
AMA	Abgasmeßanlage
Ar	Argon
Ba	Barium
bin.	binär
C	Kohlenstoff
c	Konzentration
$c(\text{H}_2\text{S})^*$	H_2S -Konzentration (aus Modell)
CIMS	chemisch ionisierendes Massenspektrometer
CLD	Chemolumineszenz-Detektor
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
COS	Kohlenoxidsulfid (Carbonylsulfid)
Cu	Kupfer
CVS	Constant Volume Sampling
eff.	effektiv
EOBD	European On Board Diagnosis
EU	Europäische Union
EUDC	Extra Urban Driving Cycle
FID	Flammenionisations-Detektor
FSN	Filter Smoke Number
Gl.	Gleichung
H_2	Wasserstoff
H_2O	Wasser
H_2S	Schwefelwasserstoff
HC	Kohlenwasserstoffe (Hydrocarbons)
in	inch (1 in = 25.4 mm)
$K_{\text{NO}_x 60/3}$	NO_x -Konversion im Mager/Fett-Betrieb (60 s mager, 3 s fett)
konst.	konstant
KW	Kurbelwinkel

m	Masse
\dot{m}	Massenstrom
Ma-%	Massenprozent
MAK	maximale Arbeitsplatz-Konzentration
max, max.	maximal
mil	milli-inch (1 mil = 25.4 μm)
min.	minimal
$m_{\text{NOx } 50\%}$	gespeicherte NOx-Masse bis zu einem NOx-Schlupf von 50 %
m_s	freigesetzte Schwefelmasse
n	Motordrehzahl
n.	nach
N	Stickstoff (atomar)
N ₂	Stickstoff (molekular)
N ₂ O	Distickstoffoxid (Lachgas)
NDIR	Nichtdispersiver Infrarot-Adsorptionsanalysator
NEFZ	Neuer Europäischer Fahrzyklus
NH ₃	Ammoniak
NO	Stickstoffmonoxid
NO ₂	Stickstoffdioxid
NOx	Stickoxide
Nr.	Nummer
NSK	NOx-Speicher-Katalysator
O	Sauerstoff (atomar)
O ₂	Sauerstoff (molekular)
OBD	On Board Diagnosis
OT	oberer Totpunkt
P _e	effektive Leistung
PKW	Personenkraftwagen
p _{me}	effektiver Mitteldruck
p _{mi}	indizierter Mitteldruck
ppb	parts per billion
ppm	parts per million
Reg.	Regeneration
S	Schwefel
SCR	Selective Catalytic Reduction
SO ₂	Schwefeldioxid
SO ₃	Schwefeltrioxid
Startkat	Startkatalysator

stöch.	stöchiometrisch
S.V.	Raumgeschwindigkeit (Space Velocity)
T	Temperatur
Tab.	Tabelle
t_{Ads}	Adsorptionsdauer
TiO_2	Titandioxid
T_{NSK}	Temperatur im NO _x -Speicher-Katalysator
t_{Reg}	Regenerationsdauer
V	Volumen
\dot{V}	Volumenstrom
v	Geschwindigkeit
v.	vor
V_2O_5	Vanadiumpentoxid
Var.	Variante
V_{H}	Hubvolumen
ZrO_2	Zirkondioxid

Anhang

Berechnung von Massenströmen aus gemessenen Konzentrationen für verschiedene Abgaskomponenten

a) Kohlenwasserstoffe (HC)

Der HC-Massenstrom \dot{m}_{HC} errechnet sich aus folgenden Gleichungen:

$$\dot{m}_{\text{HC}} = \dot{V}_{\text{HC}} \cdot \rho_{\text{HC}}$$

$$\dot{m}_{\text{HC}} = \dot{V}_{\text{Abgas}} \cdot c(\text{HC}) \cdot \rho_{\text{HC}} \quad \text{mit } c(\text{HC}) = \text{Abgaskonzentration von HC in ppm} \cdot 10^{-6}$$

$$\rho_{\text{HC}} = \frac{m_{\text{HC}}}{V_{\text{HC}}} = \frac{m_{\text{mol HC}}}{V_{\text{mol}} \cdot \frac{T_{\text{Abgas}} \cdot p_{\text{mol}}}{T_{\text{mol}} \cdot p_{\text{Abgas}}}}$$

$$\dot{V}_{\text{Abgas}} = \frac{\dot{m}_{\text{Abgas}}}{\rho_{\text{Abgas}}} = \frac{\dot{m}_{\text{Abgas}}}{\frac{p_{\text{Abgas}}}{R_{\text{Abgas}} \cdot T_{\text{Abgas}}}}$$

$$V_{\text{mol}} = 22.4 \text{ l/mol}$$

$$T_{\text{mol}} = 273.15 \text{ K}$$

$$p_{\text{mol}} = 1.013 \text{ bar} = 101300 \text{ N/m}^2$$

$$R_{\text{Abgas}} = 288.315 \text{ J/kgK}$$

$$m_{\text{mol HC}} = 44 \text{ g/mol (Molmasse von } \text{C}_3\text{H}_8\text{)}$$

$$\Rightarrow \dot{m}_{\text{HC}} = \frac{\dot{m}_{\text{Abgas}} \cdot m_{\text{mol HC}} \cdot c(\text{HC}) \cdot R_{\text{Abgas}} \cdot T_{\text{mol}}}{V_{\text{mol}} \cdot p_{\text{mol}}}$$

b) Kohlenmonoxid (CO)

Die Berechnung des CO-Massenstroms \dot{m}_{CO} erfolgt analog zu oben dargestellter Vorgehensweise für HC.

Für CO gilt: $m_{\text{mol CO}} = 28 \text{ g/mol}$

Vor der Messung der CO-Konzentration muß wegen einer Querempfindlichkeit des Analysators das in der Probe enthaltene Wasser entzogen werden. Dadurch ist die gemessene CO-Konzentration größer als der tatsächliche Wert. Dieser Effekt wird durch einen Feuchtekorrekturwert FA korrigiert.

$$FA = 1 - 1.85 \cdot \frac{\dot{m}_{\text{Kraftstoff}}}{\dot{m}_{\text{Luft}}} \quad [175]$$

c) Stickoxide (NO_x)

Auch die Berechnung des NO_x-Massenstroms \dot{m}_{NO_x} erfolgt analog zu oben dargestellter Vorgehensweise für HC. Hierbei wird eine vollständige Umwandlung zu NO₂ angenommen.

Für NO₂ gilt: $m_{\text{mol NO}_2} = 46 \text{ g/mol}$

Die Bildung von Stickoxiden ist feuchtigkeitsabhängig. Ein in [175] beschriebener Korrekturfaktor zeigt jedoch einen sehr geringen Einfluß, so daß hier auf diesen Faktor verzichtet wird.