

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

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 Katalysortyps 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].

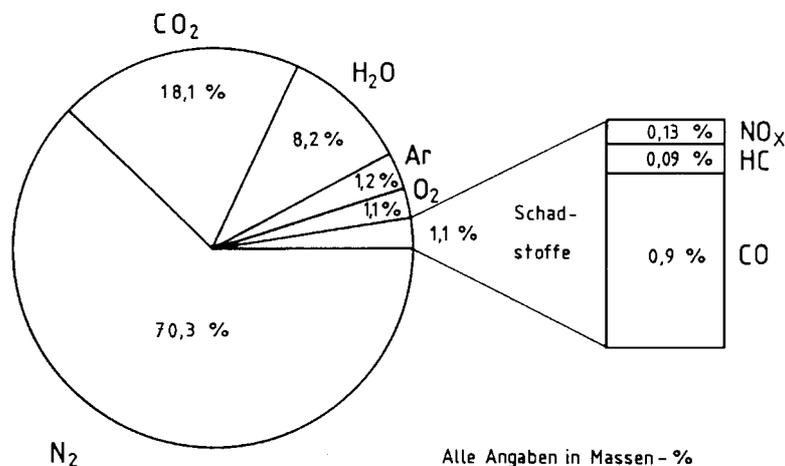


Abb. 2-1: Abgaszusammensetzung eines Mittelklassefahrzeugs mit Ottomotor, ohne Katalysator (ECE-Test) [11]

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 teiloxydierte 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].

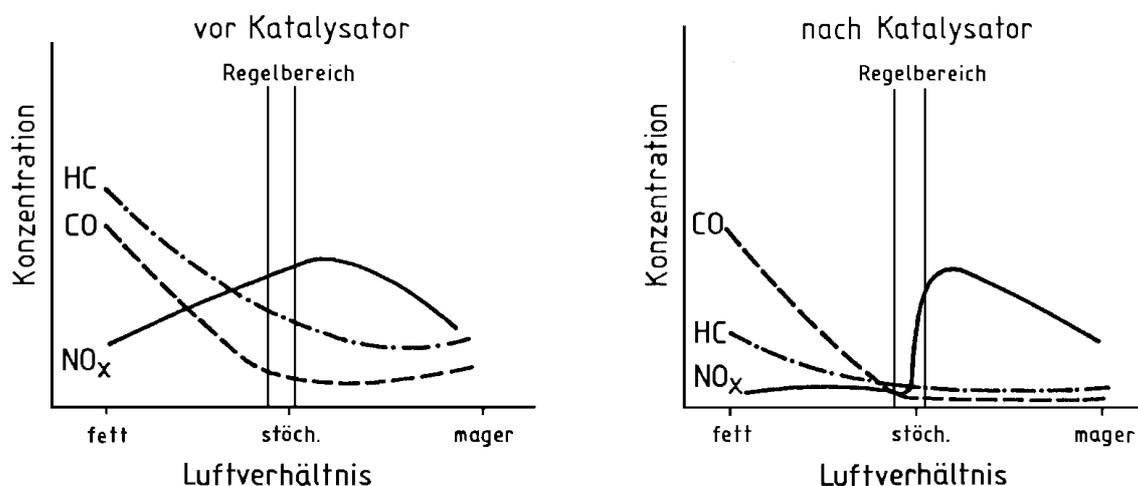


Abb. 2-2: Rohemissionen und Emissionen nach Drei-Wege-Katalysator bei einem Ottomotor in Abhängigkeit vom Luftverhältnis [11]

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].

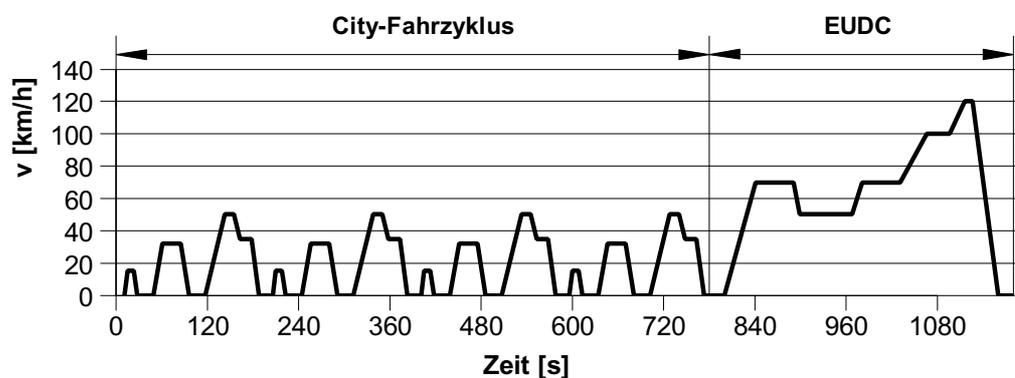


Abb. 2-3: Geschwindigkeitsprofil des Neuen Europäischen Fahrzyklus [22]

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].

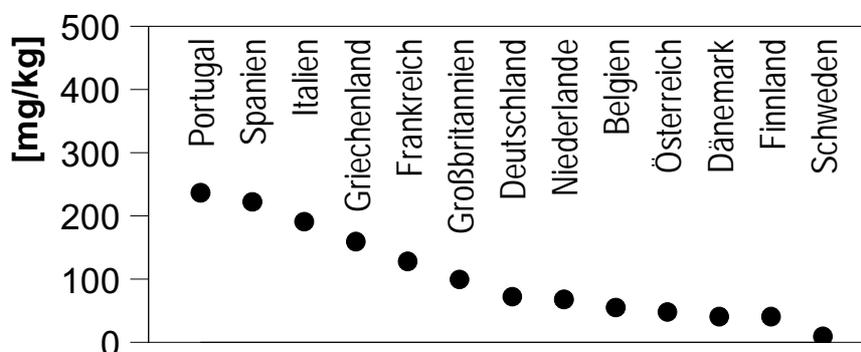


Abb. 2-4: Durchschnittlicher Schwefelgehalt in Ottokraftstoffen [5]

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].

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 NOx-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 NOx-Sensors nach NOx-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 NOx-Rohemission im Magerbetrieb
- Einsatz eines NOx-Speicher-Katalysators mit einer möglichst geringen Sauerstoff-Speicherfähigkeit
- Einsatz eines NOx-Speicher-Katalysators mit großen Volumen und hoher NOx-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 Zylindervertrimmung, 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 NOx-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 NOx-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 NOx-Speicher-Katalysators steht.