



Marko Kajgo, BSc

Untersuchung eines alternativen NH₃-Speicher- und Dosiersystems für die SCR-Anlage eines leichten Nutzfahrzeuges

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Maschinenbau

eingereicht an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Helmut Eichlseder
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Zweitbetreuer

Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Grabner
Dipl.-Ing. Klaus Dieter Barnstedt
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, Oktober 2016

Vorwort

Die folgende Masterarbeit entstand im Rahmen eines EU-Projekts an dem das Institut für Verbrennungskraftmaschinen der Technischen Universität Graz, der Motorenhersteller Fiat Powertrain und das dänische Unternehmen Amminex, welches auf die Abgasnachbehandlung von Verbrennungsmotoren spezialisiert ist, mitwirkten.

Auf meinen Wunsch hin, ein Thema mit theoretischem und praktischem Anteil zu bearbeiten, kontaktierte mich Herr Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Helmut Eichseder sofort nach Einlangen des Projekts und ermöglichte mir so die Bearbeitung dieses spannenden Themas. Dafür und auch für die Unterstützung während der Durchführung der Arbeit, möchte ich mich an dieser Stelle ganz herzlich bedanken.

Ein weiteres Dankeschön geht an meine Betreuer, die mich zu jeder Zeit mit Rat und Tat unterstützt haben. Die Messungen am Prüfstand wären ohne Dipl.-Ing Klaus Dieter Barnstedt kaum möglich gewesen und mit Sicherheit nicht so reich an nützlichen Informationen. Für die Unterstützung bei der Datenauswertung und für jeden weiteren Support, speziell in Fragen zu Computersoftware, geht ein Dank an Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Peter Grabner.

Natürlich bedanke ich mich auch bei allen weiteren Institutsmitarbeitern, mit denen ich im Laufe meiner Arbeit in Kontakt gekommen bin. Die Hilfsbereitschaft und die freundliche Atmosphäre machten meinen Aufenthalt am Institut äußerst angenehm.

An dieser Stelle möchte ich auch meinen Eltern für alles danken, was sie mir ermöglicht haben. Ich hoffe, dass mein Studienabschluss sie stolz macht und verspreche, nie zu vergessen, was sie für mich getan haben.

Eidesstattliche Erklärung

Affidavit

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used.

Graz, am 17.10.2016

Marko Kajgo

Kurzfassung

Zur Nachbehandlung von Stickoxiden im dieselmotorischen Abgas kommt nach heutigem Stand fast ausschließlich AdBlue als Reduktionsmittel in der selektiven katalytischen Reduktion in Frage. Aus Sicherheitsgründen konnte sich bislang keine alternative Variante der NH_3 -Speicherung in mobilen Anwendungen etablieren. Trotz des flächendeckenden Einsatzes von AdBlue-SCR-Systemen, vor allem im Nutzfahrzeugbereich, haben diese, bedingt durch ihre Funktionsweise, noch einige Nachteile, die sich auf deren Effizienz niederschlagen. Geringe Speicherkapazitäten und dadurch große Volumen bzw. Massen, Schwierigkeiten bei der Erzeugung von NH_3 aus dem Harnstoff und die hohe Systemkomplexität sind nur einige dieser Nachteile. Das Ziel zukünftiger Entwicklungen im Bereich der selektiven katalytischen Abgasnachbehandlung sollte daher sein, die Nachteile des aktuellen Seriensystems zu reduzieren. Ein solches System wäre dadurch deutlich effizienter und könnte das derzeitige Standardsystem ablösen.

Im Rahmen eines EU-Forschungsprojekts wurde in dieser Arbeit die Funktionalität eines alternativen NH_3 -Speicher- und Dosiersystems auf seine Eignung im mobilen Einsatz untersucht. Zu diesem Zweck wurde ein Serienmotor für leichte Nutzfahrzeuge herangezogen, welcher von Werk aus mit einer AdBlue-SCR-Anlage ausgestattet ist. Der Serienzustand des Motors sollte dabei als Basis dienen und die erwarteten Vorteile des alternativen Systems sollten im direkten Vergleich mit dem Seriensystem aufgezeigt werden. Besonderes Augenmerk sollte dabei auf die Umsatzraten im unteren Temperaturbereich gelegt werden. Durch die neuartige Methode der Speicherung und Dosierung von Ammoniak verspricht der Hersteller der Alternative, hohe Umsatzraten in einem weitaus größeren Kennfeldbereich, als dies mit AdBlue möglich ist. Höhere Umsatzraten sollen in weiterer Folge dazu führen, dass die vorgegebenen Grenzwerte für die NO_x -Emissionen weit unterboten werden können. Auf diese Weise könnte man innermotorische Maßnahmen zur Stickoxidreduktion deutlich zurücknehmen, was sich sehr positiv auf Wirkungsgrad und Kraftstoffverbrauch des Motors auswirken würde. Ebenfalls könnten die Verbesserungen des Stickoxidwerte zur leichteren Einhaltung künftiger, strengerer Abgasgesetzgebungen beitragen.

Abstract

For the aftertreatment of nitrogen oxides in diesel exhaust gas, it is state of the art, to use almost exclusively AdBlue as reducing agent. Because of security reasons, it is hard to establish any alternative NH_3 storage system for mobile applications. Despite the widespread use of AdBlue SCR systems, especially in the commercial vehicle sector, there are some drawbacks, due to their operation, which reflect on their efficiency. Low storage capacity and thereby large volumes or mass, difficulty in the generation of NH_3 from urea and the high system complexity, are only some of these disadvantages. The aim of future developments in the field of selective catalytic exhaust treatment therefore should be, to reduce the handicaps of the current series system. A further developed system would be much more efficient and could be able to replace the current standard system.

As part of a EU research project, the functionality of an alternative NH_3 storage and dispensing system has been studied for its suitability. To this purpose, a series motor for light commercial vehicles was used, which is standardly equipped with an AdBlue SCR system. The series condition of the engine should serve as a base and the expected benefits of the alternative system should be demonstrated in a direct comparison with the series system. Particular attention should be paid to the conversion rates at lower temperatures. According to the new method of storing and dosing of Ammonia, the manufacturer of the alternative system, promises high conversion rates in a much wider performance range, than it is possible with AdBlue. Higher conversion rates would subsequently lead to a lower deviation of limiting values for NO_x emissions. In this way it would be possible to take back internal engine measures for reduction of nitrogen oxides significantly, which would have a very positive effect on the efficiency and the fuel consumption of the engine. Also, the improvement of the nitric oxide levels can contribute to easier meeting future, more stringent exhaust emission regulations.

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Abkürzungen	xi
1 Einleitung	1
2 Allgemeine Grundlagen	3
2.1 Abgase von Verbrennungsmotoren und deren Auswirkungen	3
2.2 Abgaszusammensetzung von Verbrennungsmotoren	5
2.2.1 Limitierte Komponenten	6
2.3 Abgasgesetzgebung für schwere Diesel-NFZ-Motoren	16
2.4 Maßnahmen zur Schadstoffminderung	18
2.4.1 Innermotorische Maßnahmen	18
2.4.2 Außermotorische Maßnahmen – Abgasnachbehandlung	21
2.5 Selektive katalytische Reduktion mit Harnstoff	28
2.5.1 Prozessschritte des SCR-Verfahrens	28
2.5.2 Chemische Reaktionen	29
2.5.3 Bauliche Komponenten	33
3 Amminex Ammonia Storage and Dosing System ASDS	37
3.1 AdAmmine [®] vs. AdBlue [®]	37
3.2 ASDS Aufbau	39
3.3 ASDS-Komponenten und deren Funktionsweise	41
3.3.1 Hauptkartuschen (Main Units)	41
3.3.2 Startkartusche (Start-Up Unit)	42
3.3.3 Dosiereinheit (DU) AFM-CVD	43
3.3.4 Steuergerät (ECU) und Software	44
4 Experimenteller Aufbau	45
4.1 Prüfstands Aufbau	45
4.1.1 Motordaten	46
4.1.2 Abgasanlage	47
4.1.3 Motorprüfstand	48
4.1.4 SCR-Anlagen	49
4.1.5 Messtechnik	52

5	Messungen am Prüfstand	59
5.1	Typprüfzyklen	59
5.1.1	WHTC	59
5.1.2	WHSC	60
5.1.3	WNTE	60
5.1.4	Prüfablauf nach UN/ECER49	61
5.1.5	Konfigurationen	64
6	Auswertung und Ergebnisse	67
6.1	Auswertung	67
6.2	Ergebnisse	71
6.2.1	Kennfeldbetrachtungen	71
6.2.2	Messergebnisse der Typprüfzyklen	77
7	Zusammenfassung und Ausblick	93
	Literaturverzeichnis	95

Formelzeichen und Abkürzungen

Lateinische Formelzeichen

C	ppm	Konzentration
c	%(m/m)	Konzentration
e_i	g/kWh	spezifische emittierte Menge einer Abgaskomponente
f	s ⁻¹	Frequenz
H_a	g/m ³	absolute Luftfeuchtigkeit
K	%	Konvertierungsgrad
L	kg L/kg B	Luftmenge (auch: kmol L/kmol B)
L_{\min}	kg L/kg B	Mindestluftbedarf (auch: kmol L/kmol B)
L_{st}	kg L/kg B	stöchiometrischer Luftbedarf
\dot{m}	kg/s	Massenstrom
M	g/mol	molare Masse
M_d	Nm	Drehmoment
M_e	Nm	effektives Drehmoment
n	min ⁻¹	Drehzahl
O_2	kg O ₂ /kg B	Sauerstoffmenge (auch: kmol O ₂ /kmol B)
$O_{2\min}$	kg O ₂ /kg B	Mindestsauerstoffbedarf (auch: kmol O ₂ /kmol B)
p	bar, Pa	Druck
p_e	bar	effektiver Mitteldruck
P	(k)W	Leistung
P_e	kW	effektive Leistung
RG	s ⁻¹	Raumgeschwindigkeit
RH	–	relative Luftfeuchtigkeit
t	°C	Temperatur
t	s	Zeit
T	K	thermodynamische Temperatur
V	m ³	Volumen
\dot{V}	m ³ /s	Volumenstrom
W	kWh	Arbeit
x	m	Koordinate
y	m	Koordinate
z	m	Koordinate

Griechische Formelzeichen

α	%	Fahrpedalstellung
α	–	stöchiometrische Reduktionsmittelmenge
ε	–	Verdichtungsverhältnis
η	–	Wirkungsgrad
η_e	–	effektiver Wirkungsgrad
η_i	–	innerer (indizierter) Wirkungsgrad
η_m	–	mechanischer Wirkungsgrad
λ	–	Luftverhältnis, Luftzahl
φ	° KW	Kurbelwinkel

Indizes und Abkürzungen

abs	absolut	HWL	Harnstoff-Wasser-Lösung
Abg	(im) Abgas	HO ₂	Hydroperoxyl
AGN	Abgasnachbehandlung	i	innen; indiziert; Laufvariable (1, 2, . . . , k)
AGR	Abgasrückführung	k. A.	keine Angabe
ATL	Abgasturbolader	Kat	Katalysator
CH ₄	Methan	konst	konstant
chem	chemisch	konv	konventionell
CN	Cyanid	KM	Kühlmittel
CO	Kohlenmonoxid	KW	Kurbelwelle; Kurbelwinkel
CO ₂	Kohlendioxid	L	Luft; Ladeluft
CUC	clean-up-catalyst	LL	Leerlauf
DI	Direct Injection (Direkteinspritzung bzw. Direkteinblasung)	LLK	Ladeluftkühler
DMS	Dehnmessstreifen	LNF	leichtes Nutzfahrzeug
DOC	diesel oxidation catalyst	max	maximal
DPF	Dieselpartikelfilter	min	minimal
ECE	Economic Commission for Europe (United Nations)	N ₂	molekularer Stickstoff
EGR	Exhaus Gas Recirculation	N ₂ O	Distickstoffmonoxid
EN	Europäische Norm	NCO	Isocyan
EU	Europäische Union	HNCO	Isocyansäure
geom	geometrisch(es)	NFZ	Nutzfahrzeug
gem	gemessen	NH ₃	Ammoniak
ges	gesamt	(NH ₂) ₂ CO	Harnstoff
ggf	gegebenenfalls	NO	Stickstoffmonoxid
H ₂ O	Wasser	NO ₂	Stickstoffdioxid
HC	Kohlenwasserstoff	NO _x	Stickoxide
HCN	Cyanwasserstoff	O ₂	molekularer Sauerstoff
		OH	Hydroxyl
		PKW	Personenkraftwagen

RDE	Real Driving Emissions	WHSC	Worldwide Harmonized Stationary Cycle
rel	relativ	WHTC	Worldwide Harmonized Transient Cycle
OH	Raumgeschwindigkeit	WNTE	Worldwide Harmonized Mot-To-Exceed Cycle
st	stöchiometrisch; Stoff	Zyl	Zylinder
SCR	selektive catalytic reduktion		
SCR-Kat	SCR-Katalysator		
u	untere, Umgebung		
UN	United Nations		
VKM	Verbrennungskraftmaschine		

1 Einleitung

Das weltweite Verkehrsaufkommen erlebte in den letzten Jahrzehnten einen immensen Zuwachs. Sowohl aus dem Personenverkehr als auch aus dem Gütertransport sind die konventionellen Verbrennungsmotoren nicht weg zu denken. Die Verbrennung fossiler Brennstoffe in diesem Ausmaß führt jedoch zu einer großen Belastung der Umwelt.

Die verkehrsbedingten Emissionen nehmen mit dem steigenden Verkehrsaufkommen immer weiter zu. Neben den seit langem bekannten Auswirkungen des Kohlendioxids auf den Treibhauseffekt und damit das Klima, ist es von großer Wichtigkeit sich mit der schädigenden Wirkung anderer Abgasbestandteile auseinander zu setzen. Es ist mittlerweile erwiesen, dass Substanzen wie Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe, Partikel und Stickoxide lebende Organismen schädigen. Aus diesem Grund reagiert die Gesetzgebung mit limitierten Grenzwerten für diese Komponenten. Die ständige Verschärfung der Emissionsgesetze führt zu einem kontinuierlichen Drang nach Verbesserung und Entwicklung neuer Methoden zur Senkung der Abgaswerte.

Es bietet sich natürlich zu aller erst an, ohne zusätzliche Systeme, zu versuchen, bessere Abgaswerte zu erzielen. Oftmals ergeben sich dadurch sogar weitere Vorteile. Als ein Beispiel soll hier vorerst nur die Common-Rail-Einspritzung genannt werden, welche zusätzlich zu besseren Abgaswerten auch eine Kraftstoffersparnis mit sich bringt. Natürlich gibt es noch weitere Maßnahmen, die allerdings in nachfolgenden Kapiteln genauer erklärt werden.

Die zweite Variante der Schadstoffreduktion ist die Verwendung von Abgasnachbehandlungssystemen. Als bewährtes System für Ottomotoren ist der 3-Wege-Katalysator bekannt, welcher sowohl CO und HC, als auch NO_x mit Konvertierungsraten über 90 % umsetzt. Leider ist diese Technologie nicht für den Dieselmotor einsetzbar, weil der 3-Wege-Katalysator eine stöchiometrische Abgaszusammensetzung verlangt. Der Sauerstoffüberschuss im Abgas von Dieselmotoren ist der treibende Grund andere Systeme zu entwickeln. Partikel werden heute standardmäßig mittels Dieselpartikelfiltern abgeschieden. Oxidationskatalysatoren sorgen für die Umsetzung von CO und HC. Was die Umsetzung von NO_x -Emissionen betrifft, gibt es zurzeit keine einheitliche Lösung. Es gibt mehrere Ansätze bzw. Systeme, welche von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich zu Verwendung kommen. Zusammengefasst werden alle diese Systeme unter dem Begriff De NO_x -Strategien. In nachstehenden Kapiteln sollen ein paar dieser Strategien erläutert werden.

Entsprechend dem Thema dieser Arbeit soll schon hier das vielversprechende SCR-System erwähnt werden. Das SCR-Verfahren („Selective Catalytic Reduction“) ist schon seit längerer Zeit Standard im Nutzfahrzeugsegment. Hier wird eine bestimmte Reak-

tion zwischen Ammoniak (NH_3) und den Stickstoffoxiden (NO_x), die sich aus Stickstoffmonoxid (NO) und Stickstoffdioxid (NO_2) zusammensetzen, hervorgerufen. Reines Ammoniak ist allerdings kompliziert in der Handhabung, bedingt durch dessen gesundheitliche Auswirkungen auf den Menschen. Es werden deswegen Substanzen eingesetzt aus denen vor Ort Ammoniak erzeugt bzw. freigesetzt werden kann und die kein Sicherheitsrisiko darstellen. Am weitesten verbreitet ist die unter „AdBlue®“ bekannte Harnstoff-Wasser-Lösung.

Wie bereits erwähnt hat das AdBlue-SCR-System seit dem Jahre 2002 im Nutzfahrzeugsegment die Serienreife erreicht. Bis auf die Tatsache, dass man mit der Harnstoff-Wasser-Lösung ein weiteres Betriebsmedium mitführen muss, zeigt das System vorerst keine relevanten Nachteile. Mit Einführung der EURO 6 Norm findet es auch immer breitere Verwendung im PKW.

Gegenstand dieser Arbeit ist der Vergleich zwischen einem AdBlue-System und einem neuen, in Entwicklung befindlichen System. Das ASDS-System der Firma Amminex soll laut Hersteller deutliche Vorteile gegenüber dem Standardsystem haben. Aufgrund der veränderten Art der Speicherung und Dosierung des NH_3 , soll das System hohe Konvertierungsraten schon bei deutlich niedrigeren Temperaturen des SCR-Katalysators ermöglichen. Das neue System soll ohne großen Aufwand an Stelle des AdBlue-Systems integriert werden können. Ein einfacher Tausch des Tanksystems und der Dosiereinheit soll ohne weitere Modifikationen am Abgasstrang oder am SCR-Katalysator möglich sein. Die Betriebsstrategien können entweder direkt vom AdBlue-System übernommen werden, oder es werden optimierte Strategien eingesetzt, zur Erreichung bestmöglicher Ergebnisse.

Beide Systeme werden für den Vergleich am Motorenprüfstand getestet. Der Vergleich der Ergebnisse wird für verschiedenste Fahrzyklen angestellt, für instationäre und stationäre. Die Ergebnisse werden am Ende der Arbeit noch genauer diskutiert und ausgeführt.

2 Allgemeine Grundlagen

2.1 Abgase von Verbrennungsmotoren und deren Auswirkungen

Die von uns Menschen verursachten und ausgestoßenen Abgase bestehen in der Regel aus mehreren Komponenten, welche zusammengefasst unter dem Namen anthropogene Schadstoffe geführt werden. Diese Schadstoffe haben starke Auswirkungen auf die Atmosphäre. Die ansteigenden Konzentrationen der Schadstoffe in der Atmosphäre wirken sich sehr stark auf wesentliche Bereiche aus, den Treibhauseffekt, den stratosphärischen Ozonabbau und die Modifikation der troposphärischen Luftchemie. Die drei oben genannten Bedrohungsbereiche sind aufgrund starker Wechselwirkungen nur schwer voneinander zu trennen [2].

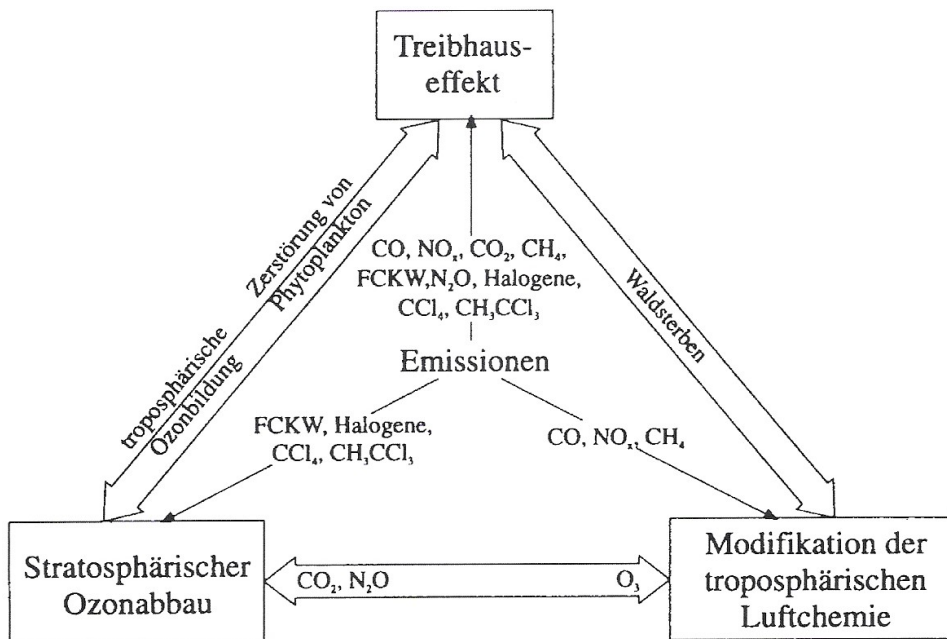


Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen den Bedrohungen für die Atmosphäre [2]

Zum besseren Verständnis und der späteren Zuordnung der Abgasbestandteile zum jeweiligen Bereich, soll hier kurz auf die Bedeutung der drei Bedrohungsbereiche aus Abbildung 2.1 eingegangen werden.

Treibhauseffekt

Der elektromagnetische Strahlungsaustausch zwischen Erde und Atmosphäre befindet sich naturgemäß im Gleichgewicht. Durch das Emittieren von anthropogenen Gasen (CO_2 , CH_4 , N_2O etc.) kann dieses Gleichgewicht stark beeinflusst werden. Die erwähnten Gase absorbieren elektromagnetische Strahlung selektiv. Das bedeutet, dass die kurzwellige einfallende Sonnenstrahlung ungehindert eindringen kann, jedoch die von der Erde reflektierte langwellige Strahlung teilweise absorbiert wird. Ein Gleichgewicht zwischen einfallender und abgestrahlter Wärme verschiebt sich durch anthropogenen Einfluss zu höheren Temperaturen. Daher führt eine Konzentrationsänderung dieser Gase zu starken Klimaänderungen und zum Anstieg der mittleren Temperatur auf der Erdoberfläche [2].

Stratosphärisches Ozon

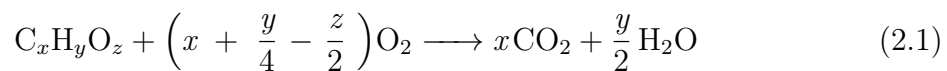
Der natürliche Ozongürtel der Erde dient als Schutz vor ultravioletter Strahlung der Sonne, indem er einen Großteil dieser Strahlung absorbiert. Durch den Ausstoß von Stoffen wie FCKW (Fluor-Chlor-Kohlenwasserstoffe) wird das natürliche Ozon jedoch abgebaut. Damit verschwindet auch der Schutz vor UV-Strahlung. Dies kann erhebliche Auswirkungen auf alle Lebewesen haben, da sie erhöhte Strahlung in diesem Wellenlängenbereich nicht gewohnt sind. In diesem Fall könnte die UV-Strahlung z. B. Mutationen und Hautkrebs hervorrufen [2].

Modifikationen in der troposphärischen Luftchemie

Die Oxidation mit atmosphärischem Sauerstoff ist ein wichtiger Prozess für viele Verbindungen im natürlichen geochemischen Kreislauf. Durch das Emittieren von großen Mengen von Stoffen, welche auch in der Atmosphäre oxidieren, nimmt der Mensch der Natur einen großen Teil ihres Oxidationspotentials und bringt dadurch wichtige Kreisläufe aus dem Gleichgewicht. Unmittelbare Folgen sind z. B. erhöhte Lebenszeiten von Luftverunreinigungen und dadurch auch deren Anreicherung in sogenannten „Reinluftgebieten“. Des Weiteren hat die Beeinflussung des Klimas durchaus ernstzunehmende Folgen [2].

2.2 Abgaszusammensetzung von Verbrennungsmotoren

Die Komponenten des Abgases von Verbrennungsmotoren lassen sich ganz grob in zwei Bereiche aufteilen. Ausgehend von der Betrachtung der Verbrennung gibt es daher erwünschte und unerwünschte Verbrennungsprodukte. Unter die Kategorie der erwünschten Produkte der vollständigen Verbrennung fallen im Prinzip nur Kohlendioxid und Wasser. Dies ergibt sich auch aus der einfachen Bruttoreaktionsgleichung für die vollständige Verbrennung (Oxidation) (Gleichung (2.1)) einer Kohlenwasserstoffverbindung [1, 5].



In der Praxis ist die vollständige Verbrennung in einem Verbrennungsmotor kaum realisierbar. Daher ist immer mit dem Auftreten von weiteren Komponenten im Abgas zu rechnen. Diese fallen unter die Kategorie der Produkte der unvollständigen Verbrennung. Aufgrund von Inhomogenität in der Gemischbildung treten daher zusätzlich Kohlenmonoxid CO und unverbrannte Kohlenwasserstoffe HC auf. Des Weiteren ist auch mit Stickoxiden NO_x zu rechnen, welche in erster Linie als Folgen von Sekundärreaktionen zwischen dem Sauerstoff und dem Stickstoff in der Verbrennungsluft entstehen. Speziell bei Dieselmotoren, aber mittlerweile auch für direkteinspritzende Ottomotoren, sind Emissionen von Partikeln (Ruß) relevant. Den letzten, jedoch sehr kleinen, Teil des Verbrennungsgases, nehmen Schwefelverbindungen und Reaktionsprodukte von Additiven und Verunreinigungen im Brennstoff bzw. in der angesaugten Luft, ein [2, 5].

Eine grobe Einteilung der Abgaszusammensetzung eines DI-Dieselmotors soll Abbildung 2.2 darstellen. Aus dieser geht klar hervor, dass das Abgas fast vollkommen aus Stickstoff, Kohlendioxid, Wasser und Sauerstoff besteht. Allerdings ist der kleine Anteil an Schadstoffen nicht zu vernachlässigen [3]. Wenn man das weltweite Verkehrsaufkommen betrachtet, ergeben sich in Summe schon beträchtliche Werte an Schadstoffen, die Tag für Tag in die Atmosphäre emittiert werden. Anlässlich ihrer gesundheitlichen und klimabezogenen Auswirkungen sind daher strenge Normen notwendig, um die emittierten Mengen einzugrenzen und zu senken. Der Gesetzgeber sieht daher vor, kontinuierlich die erlaubten Grenzwerte für diese limitierten Komponenten herabzusenken. Motorenhersteller müssen das also vorausschauend bei der Entwicklung ihrer Motoren berücksichtigen.

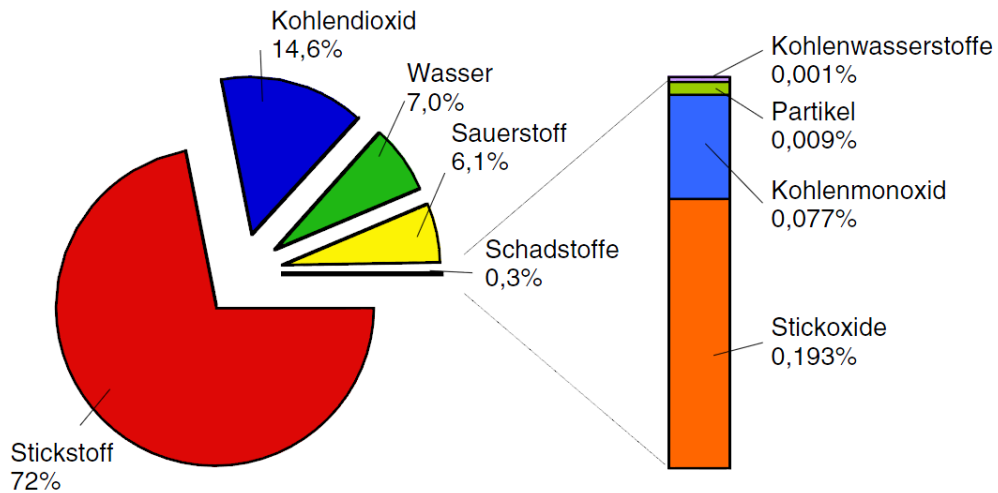


Abbildung 2.2: Abgaszusammensetzung eines DI-Dieselmotors [3]

2.2.1 Limitierte Komponenten

Die Entstehung von Schadstoffen während der Verbrennung wird maßgeblich vom Luftverhältnis λ und von der Verbrennungstemperatur beeinflusst. Bei Lambda $\lambda < 1$ herrscht Sauerstoffmangel. In diesem Fall ist zu wenig Sauerstoff vorhanden um den Kraftstoff vollständig umzusetzen. Dadurch entstehen als Produkte der unvollständigen Verbrennung hauptsächlich Kohlenmonoxid, Partikel (Ruß) und Kohlenwasserstoffe. Mit sinkendem Luftverhältnis steigen also deren Konzentrationen an.

Die Entstehung von Stickoxiden ist stark von der Temperatur während der Verbrennung abhängig. Hohe Verbrennungstemperaturen begünstigen die Bildung von Stickstoffoxiden. Diese Temperaturen kommen vorwiegend bei leicht überstöchiometrischen Luftverhältnissen zu Stande. Steigt das Luftverhältnis weiter an, sinkt die Verbrennungstemperatur und mit ihr auch die Konzentration der Stickoxide.

Je magerer das Gemisch allerdings wird, umso schneller erlöschen die Flammen. Das Gemisch brennt nicht mehr vollständig durch. Es bleiben Bereiche mit unverbrannten Kohlenwasserstoffen (HC) im Brennraum zurück. Diese werden einfach mit dem Verbrennungsgas ausgeschoben [3]. Abbildung 2.3 zeigt die Abhängigkeit der Schadstoffe vom Luftverhältnis für einen Dieselmotor.

Kohlenmonoxid CO

Kohlenmonoxid wurde bereits weiter oben als Produkt der unvollständigen Verbrennung eingestuft. Es entsteht während der Verbrennung typischerweise bei kleinen Luftverhältnissen, tritt aber auch bei hohen Temperaturen als stabiles Produkt auf. In Bereichen kleiner Luftverhältnisse ($\lambda < 1$) entsteht CO als Produkt unvollständiger Oxidation. Ist jedoch ausreichend Luft oder sogar ein Luftüberschuss ($\lambda > 1$) vorhan-

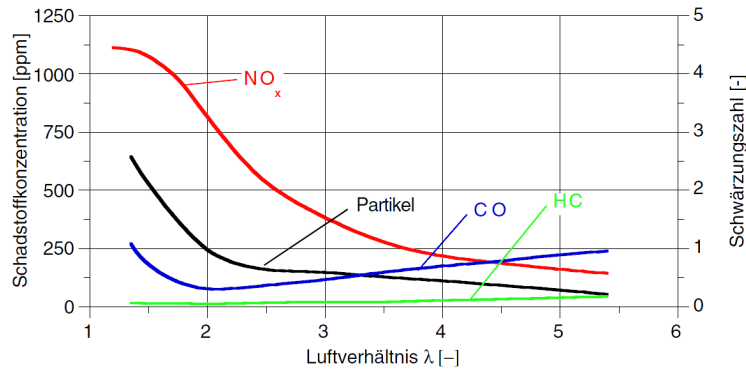


Abbildung 2.3: Schadstoffe in Abhängigkeit vom Luftverhältnis (für einen Dieselmotor) [3]

den, so wird CO während der Verbrennung primär durch Dissoziation von CO_2 zu CO und O_2 gebildet. Ein übermäßiges Angebot an Sauerstoff ($\lambda > 1$) kann also ebenfalls zur Entstehung von CO beitragen [3]. Niedrige Temperaturen und zunehmend unvollständige Verbrennung im wandnahen Bereich des Brennraums begünstigen die Entstehung von CO. Abgesehen von der motorischen Verbrennung entsteht CO aber auch bei der Methanoxidation in der Atmosphäre. Bei der Oxidation von CO auf das gesundheitlich unbedenkliche CO_2 spielen folgende chemische Reaktionen eine wichtige Rolle [3, 5].



Dabei ist Reaktion (2.2) die dominante Reaktion. Somit ist ersichtlich, dass die Oxidation des Kohlenmonoxids sehr stark von der Konzentration der OH-Radikale abhängt. Besonders zu erwähnen ist aber, dass diese Reaktion erst abläuft, nachdem alle Kohlenwasserstoffe oxidiert wurden. Grund dafür ist die höhere Reaktionsbereitschaft zwischen OH-Radikalen und Brennstoffmolekülen. Zusätzlich werden die OH-Radikale in Bereichen mit Sauerstoffmangel ($\lambda < 1$) für die Oxidation von H_2 verwendet [5].



Beide Reaktionen, sowohl (2.2) als auch (2.3), laufen hier gleichzeitig ab. Somit wird die Oxidation des CO auch durch diese Reaktion beeinflusst. Bewegt man sich in Bereichen des stöchiometrischen Betriebs ($\lambda = 1$) können beide Reaktionen zu einer, nahe am Gleichgewicht ablaufenden, Reaktion zusammengefasst werden. Diese ist als Wassergasreaktion weit bekannt. Der Überschuss an H und OH im Bereich $\lambda = 1$ ermöglicht die Bruttoreaktion in folgender Form [5].



Wird das Luftverhältnis weiter angehoben dominiert wieder Reaktion (2.2).

Kohlenmonoxid ist hoch giftig. Die Tatsache dass es sowohl farb- als auch geruchlos ist macht es noch gefährlicher. Im Vergleich zu Sauerstoff oder Kohlendioxid, geht Kohlenmonoxid eine viel stärkere Bindung mit dem Hämoglobin im Blut ein. Auf diese Weise reichert es sich in Form von COHb sehr stark im Blut an und verringert damit die Sauerstoffsättigung. Organe mit einem hohen Sauerstoffbedarf, wie z. B. Gehirn und Herz, werden in Folge einer CO-Vergiftung nicht mehr ausreichend mit Sauerstoff versorgt. Im schlimmsten Fall führt das bei zu langer Aussetzung einer CO-reichen Umgebung zum Organversagen. In Vergleich zu anderen Schadstoffkomponenten ist der Einfluss von Kohlenmonoxid auf das Klima relativ gering [2].

Die Emission von Kohlenmonoxid kann im Grunde nur dadurch vermindert werden, wenn man dem Kohlenmonoxid genügend Zeit und genügend Sauerstoff zur Oxidation auf Kohlendioxid bereitstellt. Im Verbrennungsmotor hat man allerdings verfahrensbedingt eher wenig Zeit zur Verfügung. Aus diesem Grund sollte man eine möglichst vollständige Verbrennung mit Luftüberschuss anstreben, so wie es beim Dieselmotor der Fall ist, oder nachträglich in einer katalytischen Umgebung eine Oxidation ermöglichen.

Unverbrannte Kohlenwasserstoffe HC

Sowohl fossile Kraftstoffe als auch in Motoren verwendete Schmiermittel bestehen grundsätzlich aus Kombinationen verschiedenster Kohlenwasserstoffe. Die Verwendung von C_xH_y -Verbindungen im Verbrennungsmotor bringt daher mit sich, dass solche Verbindungen auch, ohne chemische Reaktionen zu durchlaufen, im Abgas des Motors auftreten können. Bei Verbrennungen mit ausreichend Sauerstoff kann man davon ausgehen, dass in jenen Bereichen die von der Flamme erfasst werden, nahezu keine Kohlenwasserstoffrückstände verbleiben. Die im Abgas auftretenden Kohlenwasserstoffe müssen daher zum größten Teil aus Bereichen stammen, die von der Flamme nicht, oder nicht vollständig, erfasst werden. Der Gesetzgeber limitiert die Summe aller HC und geht dabei nicht auf die Zusammensetzung genau ein. Da die genauen Bestandteile keine Rolle spielen, wird leider auch nicht auf das Gefahrenpotenzial einzelner Substanzen eingegangen [2, 3].

Unverbrannte Kohlenwasserstoffe entstehen in der Regel zum größten Teil beim Kaltstart und während der darauf folgenden Warmlaufphase des Verbrennungsmotors. Die Effekte die allerdings für die Bildung von HC-Emissionen verantwortlich sind, sind abhängig vom Brennverfahren. Speziell soll im Rahmen dieser Arbeit auf die Entstehung von HC-Emissionen im Dieselmotorenverfahren eingegangen werden.

Konventionelle Dieselmotoren arbeiten in der Regel mit heterogenem Gemisch. Das bedeutet, dass zum Zeitpunkt des Verbrennungsstarts im Brennraum kein homogenes Gemisch vorhanden ist. Der Dieselstrahl wird dabei von Sauerstoff und Inertgasen umschlossen [1]. Schematisch sei in Abbildung 2.4 ein Dieselstrahl dargestellt.

Der äußere Sprayrand ist in diesem Fall zu mager für eine Verbrennung, daher bleibt der hier verdunstete Kraftstoff unverbrannt. Im Inneren des Dieselsprays herrschen ge-

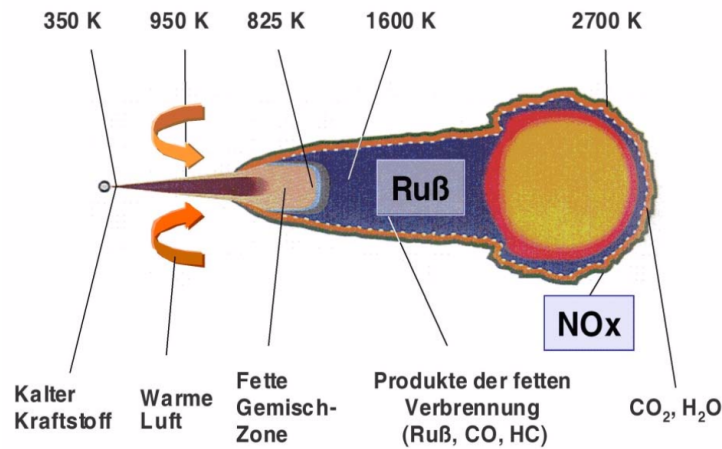


Abbildung 2.4: Bildungszonen der verschiedenen Schadstoffe in einem Dieselstrahl [8]

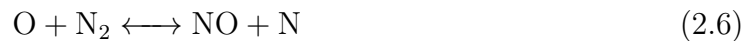
nau gegengleiche Verhältnisse. Hier ist nur Kraftstoff vorhanden, welcher natürlich ohne Sauerstoff nicht verbrennen kann. Kommt Kraftstoff direkt in Kontakt mit Bauteilen, kann sich dieser dort niederschlagen. Dieser verdunstet nur sehr langsam und wird folglich nicht vollständig oxidiert. Bedingt durch die direkte Einspritzung beim Dieselmotor, hat man, durch den in den Brennraum hineinragenden Injektor, eine weitere Quelle für HC-Emissionen. Sogenannte ungewünschte „Nachspritzer“ bringen durch ein erneutes kurzzeitiges Öffnen der Düsenadel, nach der eigentlichen Haupteinspritzung, große unzerstäubte Kraftstofftropen ein, welche nur schwer verdampfen und verbrennen. Bei Injektoren mit Sacklochdüsen führt das Ausdampfen von, im Sacklochvolumen verbliebenen, Kraftstoff ebenfalls zu HC-Emissionen. Dies passiert nämlich zu einem großen Teil nach der Verbrennung, weswegen der ausgedampfte Kraftstoff, nicht an der Verbrennung teil nimmt. Die Menge der so entstehenden HC-Emissionen hängt dabei direkt von der Größe des Sacklochvolumens ab. Durch die Verwendung von Sitzlochdüsen kann der HC-Ausstoß stark reduziert werden. Bei direkteinspritzenden Motoren kann auch Leckage an den Injektoren zu erhöhten HC-Emissionen, vor allem im Kaltstart, führen. Größere Mengen an Kraftstoff gelangen dabei beim Abstellen des Motors in den Brennraum und werden beim nächsten Start ausgeschieden [5].

Stickoxide NO_x

Wenn von Stickoxiden gesprochen wird, ist dieser Begriff immer als ein Sammelbegriff für Stickstoff-Sauerstoff-Verbindungen zu sehen. Während der motorischen Verbrennung entstehen in erster Linie NO und NO₂ welche auch in Summe als NO_x bezeichnet werden. Neben diesen beiden Komponenten, welche den Großteil der Stickoxidemissionen ausmachen, treten weitere Verbindungen wie N₂O, N₂O₃ und N₂O₅ auf, welche allerdings im Vergleich zu NO_x in vernachlässigbaren Mengen vorkommen. Aufgrund der strengen Limitierung der NO_x-Emissionen durch den Gesetzgeber, bekommen diese besondere Aufmerksamkeit [3].

Direkt nach Motorausritt bestehen die NO_x-Emissionen zunächst zu fast 90 % aus NO. Nach einiger Zeit oxidiert das NO im ausgestoßenen Abgas am Luftsauerstoff fast vollständig zu NO₂. Das NO kann über verschiedene Bildungsmechanismen entstehen. Entsprechend der Art der Entstehung wird das NO als thermisches NO, promptes NO, Brennstoff-NO oder als NO aus dem N₂O-Mechanismus bezeichnet. Die Art der NO-Bildung hängt dabei stark von den Betriebsbedingungen des Motors ab. In den meisten Fällen dominiert der Zeldovich-Mechanismus, der die Entstehung von thermischem NO beschreibt [2, 3].

Thermisches NO: Die Bildung des thermischen NO wurde erstmals von Zeldovich (1946) beschrieben. Seine ursprüngliche Formulierung der Entstehung von Stickoxiden aus einem zweistufigen chemischen Prozess wurde 1970 von Lavoie et al. erweitert. Dieser erweiterte Reaktionsmechanismus ist als erweiterter Zeldovich-Mechanismus bekannt und wird durch folgende drei elementare Reaktionen beschrieben [3, 5].



Die genannten Reaktionen laufen mit bestimmten Geschwindigkeiten ab, welche durch Geschwindigkeitskoeffizienten beschrieben werden. Reaktion (2.6) hat dabei den kleinsten Geschwindigkeitskoeffizienten, was bedeutet dass diese Reaktion am langsamsten abläuft. Im Rückschluss heißt das, dass diese Reaktion auch die geschwindigkeitsbestimmende Reaktion für den gesamten Entstehungsprozess des Stickstoffmonoxids ist. Grund hierfür ist die sehr stabile Dreifachbindung des N₂-Moleküls. Um diese aufzubrechen sind sehr hohe Aktivierungsenergien notwendig, welche erst bei sehr hohen Temperaturen erreicht werden. Von dieser starken Temperaturabhängigkeit rührt daher auch die Bezeichnung „thermisches“ NO [5].

Prompt-NO: Die Bildung des prompten NO lässt sich nicht so einfach beschreiben wie die des thermischen NO. Grund dafür ist vor allem die Abhängigkeit des Reaktionsablaufes von der Bildung des CH-Radikals und dessen weiterer Reaktion mit anderen

Molekülen. Die Tatsache dass eben diese CH-Radikale zu mehreren verschiedenen Zwischenprodukten weiterreagieren, erschwert es, die entscheidende Reaktion im Prompt-NO-Mechanismus darzustellen. Die erste Annahme nach Fenimore (1971) besagte, dass die aus der Reaktion zwischen CH und N₂ entstehende Blausäure HCN schnell zu NO weiterreagiert und somit auch den entscheidenden Pfad der Reaktion beschreibt [3, 5].



Im Vergleich zum thermischen NO sind die notwendigen Aktivierungsenergien beim Prompt-NO-Mechanismus relativ gering, weshalb hier auch deutlich geringere Temperaturen ausreichen um den Prozess in Gang zu setzten. Man spricht hier von Temperaturen um 1000 K. Das in Reaktion 2.9 gebildete HCN kann folglich auf mehreren Wegen weiterreagieren. Hierbei entstehen wiederum Zwischenprodukte wie z. B. NCO und NH, welche dann weiter zu NO umgesetzt werden [3]. Einige Reaktionen sollen hier dargestellt werden.



Alle nachfolgenden Reaktionen in denen folglich NO gebildet wird, verlaufen relativ schnell, weshalb auch die Reaktionen der Blausäure (HCN) geschwindigkeitsbestimmend sind.

Jüngere Nachforschungen ergaben nun, dass eine Weiterreaktion von NCN, welches ebenfalls als Zwischenspezies aus der Reaktion von CH und N₂ entsteht, eher bevorzugt abläuft und somit die Prompt-NO-Bildung bestimmt. NCN reagiert mit unterschiedlichen Spezies und bildet unter anderem eben auch NO, neben HCN, NCO und CN [5].



Diese große Anzahl an verschiedenen Reaktionswegen lässt erkennen, warum die Beschreibung des Bildungsweges von Prompt-NO relativ kompliziert ist. Eine tiefere Behandlung dieses Themas würde den Rahmen dieser Arbeit übersteigen, weshalb an dieser Stelle auf [5] verwiesen wird.

NO aus N₂O-Mechanismus: Wird die Bildung von CH unterdrückt, was vorwiegend in mageren Brennstoff-Luft-Gemischen geschieht, und bleiben die Temperaturen relativ niedrig, so wird weder thermisches noch promptes NO gebildet. In diesem Fall tritt die Entstehung von NO aus N₂O in den Vordergrund. N₂O entsteht nach der ersten Zeldovich-Reaktion bei Vorhandensein eines dritten Stoßpartners [5].



Der Stoßpartner M geht dabei unverändert aus Reaktion 2.17 hervor, ist aber sehr wichtig für die Reaktion. Er senkt nämlich die Aktivierungsenergie stark herab. Das gebildete Lachgas N₂O oxidiert nun in weiterer Folge, woraus NO nach Reaktion 2.18 entsteht [5].



Diese Reaktion läuft wegen ihrer Einfachheit unter den obigen Bedingungen bevorzugt ab und wird von höheren Drücken, positiv beeinflusst. Die niedrigen Temperaturen wirken sich im Vergleich kaum auf den Ablauf der Reaktion aus. Große Bedeutung hat diese Art der NO-Entstehung bei der ottomotorischen mageren Verbrennung, der dieselmotorischen Verbrennung mit hohen Spitzendrücken, aber auch bei modernen Verfahren wie dem mageren HCCI-Brennverfahren [5].

NO aus Brennstoff-Stickstoff: Die heutigen Brennstoffe die im Straßenverkehr Verwendung finden enthalten praktisch keinen gebundenen Stickstoff. Somit spielt die Entstehung von Stickoxiden aus, im Brennstoff gebundenem, Stickstoff keine weitere Rolle in diesem Bereich [5].

NO zu NO₂: Die Umwandlung von NO zu NO₂ kann nach mehreren Reaktionen erfolgen. Ausschlaggebend dafür welche Reaktion bevorzugt abläuft, ist die Flammtemperatur. Nach Miller und Bowman (1989) sind folgende drei Reaktionen für die Umwandlung relevant [5].



Dabei läuft Reaktion 2.19 hauptsächlich bei niedrigeren Flammentemperaturen ab, da hier vermehrt HO₂ gebildet wird. Bei höheren Temperaturen wird NO₂ nach Reaktion 2.20 abgebaut. Im Abgas des Verbrennungsmotors liegt das NO/NO₂-Gleichgewicht

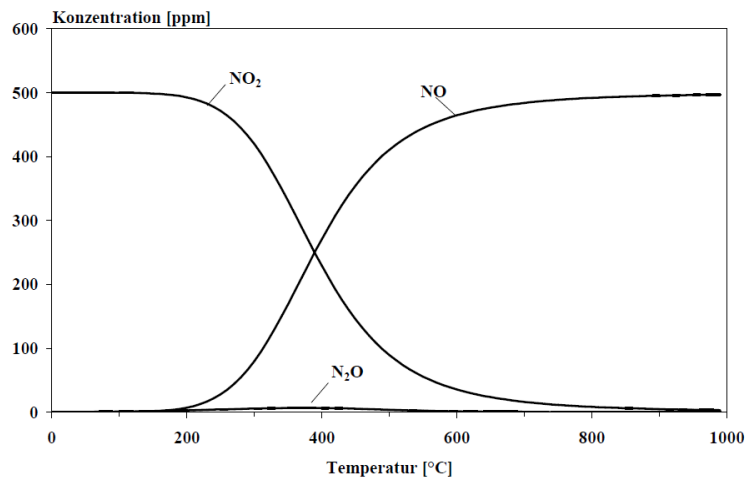


Abbildung 2.5: NO/NO₂-Verhältnis in Abhängigkeit zur Temperatur [7]

weit auf Seiten des NO. Abbildung 2.5 soll das NO/NO₂-Verhältnis in Abhängigkeit von der Temperatur graphisch aufzeigen. Durch moderne innermotorische Maßnahmen zur Reduktion von NO_x-Emissionen steigt allerdings der NO₂-Anteil an. Durch die magerere Verbrennung, hohe Abgasrückführaten oder auch späte Einspritzzeitpunkte wird die Temperatur der Verbrennung herabgesetzt. Dadurch tritt Reaktion 2.21 stärker hervor. NO₂ wird zunehmend nach Reaktion 2.21 gebildet, aufgrund der langsamen Verbrennung und schlechten Durchmischung jedoch nicht mehr zu NO zurückgebildet.

Unabhängig vom NO-Anteil im Abgas des Verbrennungsmotors, wird dieses mit dem Sauerstoff aus der Luft, nach kurzer Zeit und Umgebungstemperatur vollständig zu NO₂ aufoxidiert, entsprechend Reaktion 2.21 [5].

Partikelemissionen eines Dieselmotors

„Partikel sind all jene Stoffe, die an einem teflon-beschichteten Glasfaserfilter oder an einem Teflon-Membranfilter abgeschieden werden, das von verdünntem Abgas mit einer Temperatur unter 52° C durchströmt wird.“ [8]

Partikelemissionen setzen sich aus mehreren Bestandteilen zusammen. Abhängig vom Brennverfahren und dem jeweiligen Betriebspunkt stellen sich unterschiedliche Verhältnisse zwischen elementarem Kohlenstoff, im weiteren Ruß genannt, Sulfaten und Kohlenwasserstoffen ein. Eine tabellarische Auflistung (Tabelle 2.1) soll einen kleinen Überblick über die möglichen Komponenten der Partikelemissionen geben [5].

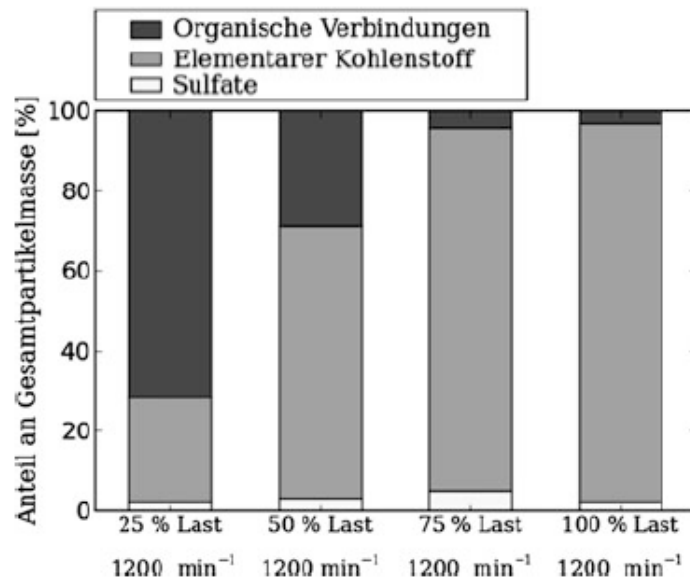
Des Weiteren soll Abbildung 2.6 die Abhängigkeit der Partikelzusammensetzung vom Betriebspunkt zeigen. In diesem Fall wurde die Partikelzusammensetzung eines NFZ-Dieselmotors über einer Betriebspunktvariation dargestellt. Bei konstanter Drehzahl wird der Lastpunkt verändert [5].

Tabelle 2.1: Partikelzusammensetzung [5]

organische Partikel	Ruß (versch. Form und Größe)		Kohlenwasserstoffe sublimiert bzw. kondensiert	
anorganische Partikel	Aschen von Öladditiven	Rostpartikel, Salze	Metallspäne	keramische Fasern

Klar ist, dass bei den beiden hochlastigen Punkten, also bei 75 % und 100 % Last, die Gesamtpartikelmasse deutlich höher ist als in den Punkten niedriger Last. Das Verhältnis der Bestandteile zueinander ist aber stark vom Betriebspunkt und der Bildungsgeschichte der Partikel abhängig. Bei niedrigen Lasten, also Betriebspunkten mit großem Lambda, ist der Anteil organischer Verbindungen sehr hoch. Partikel die hier entstehen sind relativ junge Partikel. Ihre Struktur wird meist direkt nach ihrer Bildung durch rasche Abkühlung eingefroren. Mit ansteigender Last, also bei hoher Teillast und Volllast, wo sich ein kleines Lambda einstellt, nimmt der Anteil an organischen Verbindungen immer weiter ab und der Rußanteil nimmt zu. In diesen Betriebspunkten sind die jungen Partikel über längere Zeit höheren Temperaturen und einer sauerstoffarmen Umgebung ausgesetzt [2, 5].

Der Sulfatanteil in Abbildung 2.6 ist zurückzuführen auf die Verwendung eines Kraftstoffs mit erhöhtem Schwefelgehalt. Dieseldieselkraftstoffe nach EU-Norm haben heutzutage einen deutlich niedrigeren Schwefelanteil, in der Regel 10 mg/kg, was dazu führt dass auch der Sulfatanteil deutlich niedriger ausfallen würde.

**Abbildung 2.6:** Zusammensetzung von Dieselpartikeln (Kweon et al. 2002) [5]

Der Entstehungsprozess von Partikeln ist sehr komplex. Anhand der folgenden Abbildung 2.7 soll die Rußbildung vereinfacht dargestellt werden.

Durch die thermische Belastung des Kraftstoff-Luft-Gemisches, hervorgerufen durch Wärmeleitung aus der heißen Flammenfront, werden H-C und C-C Bindungen aufgebrochen. Dabei entstehen große Mengen an Ethin. Dieses ist von großer Bedeutung für die folgende Rußbildung. Das gebildete Ethin bildet mit freien Radikalen, über Additionsreaktionen, polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe. Durch Koagulation (Zusammenstoß und Verbindung von Teilchen) werden aus den einzelnen Aromaten immer größere Molekülstrukturen. Diese Molekülstrukturen sind vorerst ebene Strukturen. Erst wenn sie räumliche Formen bilden spricht man von festen Rußkeimen. Diese Rußkeime sind jedoch meist nicht größer als 2 nm. Sie wachsen jedoch durch fortlaufende Koagulation und Oberflächenwachstum zu typischen Durchmessern von 50 bis 100 nm an. Diese immer noch kleinen Rußpartikel schließen sich dann weiter zusammen zu langen kettenförmigen Strukturen. In einer weiteren Phase kommt es dann schon zum Abbau und zur Verkleinerung der Rußteilchen durch die Oxidation mit Sauerstoffmolekülen und OH-Radikalen [2, 5].

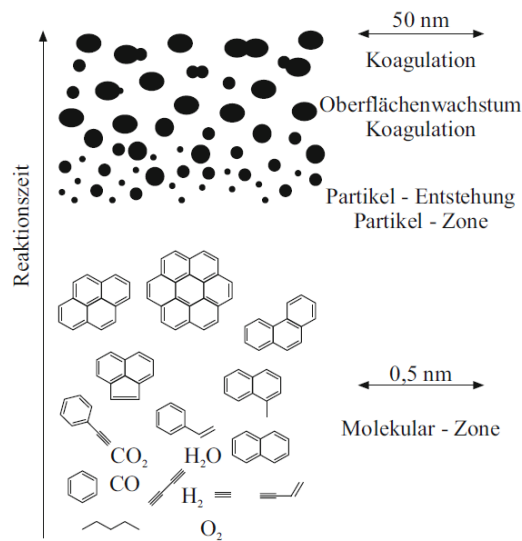


Abbildung 2.7: Schema der Rußbildung [5]

Rußbildung und Rußabbrand laufen oftmals gleichzeitig ab. Deshalb ist auch der Einfluss der Temperatur auf die Rußbildung sehr schwer zu beschreiben. Einerseits begünstigt eine hohe Temperatur die Bildung (Pyrolyse) von Ruß, andererseits treiben hohe Temperaturen auch die Oxidation und somit den Abbau von Ruß an. Im Fall des Dieselmotors, also nicht vorgemischter Flammen, steigt die Rußbildung in fetten Bereichen mit der Temperatur an. In mageren Gemischbereichen dagegen, sorgen hohe Temperaturen für eine schnellere Oxidation von Ruß [5].

2.3 Abgasgesetzgebung für schwere Diesel-NFZ-Motoren

Der Gesetzgeber sieht heute für die verschiedensten Fahrzeugklassen eine Menge unterschiedlicher Abgasnormen vor. Speziell für diese Arbeit soll auf die Abgasnorm für schwere Nutzfahrzeuge genauer eingegangen werden. Es wird die Abgasnorm für schwere Nutzfahrzeuge herangezogen, weil der hier verwendete Motor in Fahrzeugen verbaut wird, die eine zulässige Gesamtmasse von bis zu sieben Tonnen haben.

Der große Unterschied zwischen der Gesetzgebung für schwere Nutzfahrzeuge und den anderen Kategorien, also leichte Nutzfahrzeuge und Personenkraftwagen, liegt bereits darin, dass im schweren NFZ-Sektor der Motor unabhängig vom Fahrzeug am Motorenprüfstand untersucht und emissioniert wird. Die Grenzwerte für die limitierten Komponenten werden somit nicht auf Lauflleistungen (km) sondern auf abgegebene Arbeit (kWh) bezogen.

Für schwere Nutzfahrzeuge wurden für Europa ursprünglich die Emissionsgrenzwerte in der Richtlinie 88/77/EWG festgelegt. Basierend darauf wurden kontinuierlich alle weiteren Gesetzgebungsstufen aufgebaut [6].

- Euro I - Richtlinie 91/542/EWG
- Euro II - Richtlinie 96/1/EG
- Euro III - Richtlinie 99/96/EG und Richtlinie 2001/27/EG
- Euro IV - Richtlinie 99/96/EG, bzw. Richtlinie 2005/55/EG
- Euro V - Richtlinie 99/96/EG, bzw. Richtlinie 2005/55/EG
- Euro VI - Verordnung 595/2009

Tabelle 2.2: EURO VI: Emissionsgrenzwerte für Diesel-Nutzfahrzeuge [6]

Diesel-Nutzfahrzeuge: EURO VI seit 2013						
	CO	HC	NO_x	NH₃	PM Masse	PM Anzahl
	mg/kWh			ppm	mg/kWh	#/kWh
WHSC	1500	130	400	10	10	$8 \cdot 10^{11}$
WHTC	4000	160	460	10	10	$6 \cdot 10^{11}$

Die Grenzwerte für die aktuell gültige EURO VI-Norm sind hier in Tabelle 2.2 zusammengefasst.

Am Motorenprüfstand werden die Motoren in Kombination mit verschiedensten Abgasnachbehandlungssystemen auf die Einhaltung dieser Grenzwerte untersucht. Der Gesetzgeber gibt festgelegte Zyklen aus, die am Motorenprüfstand abgefahren werden müssen. Die Bestandteile der Abgase des Motors werden während dieser Zyklen von, laut Norm [6], geeigneten Abgasmessgeräten erfasst. Um die Norm zu erfüllen, müssen alle Grenzwerte eingehalten werden. Im Gegensatz zu den Normen für PKW, werden NFZ-Motoren durch die verschiedenen Zyklen die durchfahren werden müssen, nahezu im kompletten Motorkennfeld untersucht (siehe Abbildung 2.8). Während PKWs meist so ausgelegt werden, dass sie in den vorgeschriebenen Zyklen, welche meist nur einen kleinen Teil ihres Kennfelds abdecken, problemlos die Anforderungen erfüllen, müssen NFZ-Motoren im gesamten Kennfeld gut abschneiden. Zurzeit werden für Nutzfahrzeuge der WHTC (World Harmonized Transient Cycle) und der WHSC (World Harmonized Stationary Cycle) von der Gesetzgebung vorgeschrieben. In Kombination mit dem WNTE (World Harmonized Not To Exceed) ist nahezu das gesamte Motorkennfeld abgedeckt. Der WHTC ist ein Zyklus der, über eine Dauer von 30 min, eine dynamische Fahrt simuliert. Er setzt sich zusammen aus mehreren Beschleunigungsphasen, Leerlaufphasen aber auch aus einem Überlandteil und Autobahnteil am Ende des Zyklus. Er soll das transiente Fahrverhalten so gut wie möglich abbilden. Das stationäre Betriebsverhalten wird im WHSC gut wiedergegeben. Somit sind sowohl niedriglastige als auch hochlastige Punkte in den Tests vertreten. Mit dem WNTE werden schließlich zusätzlich einzelne Punkte im Kennfeld stationär untersucht. Die Punkte sind zwar nach einem Muster zu vergeben, können aber im Endeffekt fast frei in einem definierten Bereich des Kennfelds verteilt werden. Genaueres dazu wird in einem späteren Kapitel behandelt.

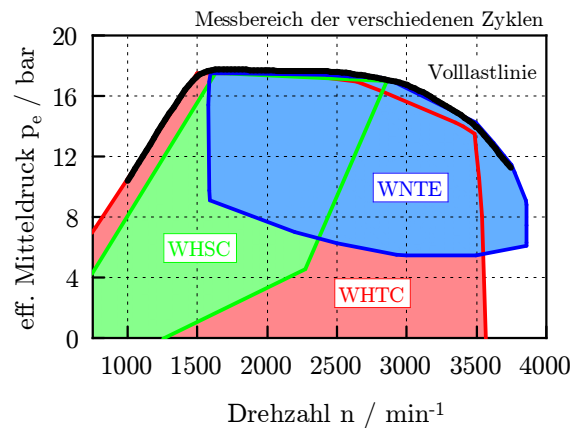


Abbildung 2.8: Abdeckung des Kennfelds eines Nutzfahrzeugmotors durch die verschiedenen Testzyklen

Zukünftig werden alle Zyklen um sogenannte RDE-Zyklen (Real Driving Emissions) ergänzt werden. Diese sollen den realen Fahrbetrieb viel besser und genauer wiedergeben als die heute gültigen Zyklen. In Summe wird das dazu führen, dass die Emissionsgrenzwerte noch schwerer zu erreichen sein werden als sie es heute schon sind. In Kombination mit den ständig sinkenden Grenzwerten, bedeutet das, dass die bestehenden Technologien der Abgasnachbehandlung bzw. Schadstoffminderung immer weiter verbessert werden müssen.

2.4 Maßnahmen zur Schadstoffminderung

Um die heutigen Emissionsstandards einhalten zu können müssen die Schadstoffe im Abgas weitestgehend reduziert werden. Dazu gibt es mehrere Ansätze. Es ist naheliegend, dass Verbesserungen am Motor grundsätzlich zu besseren Abgaswerten führen können. In den letzten Jahrzehnten sind Methoden entwickelt worden, die es erlauben über Eingriffe in das Brennverfahren oder auch in die Gemischbildung, die Zusammensetzung der Abgase positiv zu beeinflussen. Ist dieses Potenzial erschöpft, bleibt noch die Möglichkeit, über zusätzliche Abgasnachbehandlungssysteme die rohen Abgase des Motors nachträglich aufzubereiten. Im Folgenden sollen einige innermotorische Maßnahmen und Abgasnachbehandlungssysteme beschrieben werden. Auch hier soll vorwiegend auf Maßnahmen für den Dieselmotor Wert gelegt werden.

2.4.1 Innermotorische Maßnahmen

Innermotorische Maßnahmen beschreiben, wie der Name schon sagt, alle jene Maßnahmen die durch direkte Eingriffe am Motor die Abgaszusammensetzung beeinflussen.

Abgasrückführung AGR

Die Abgasrückführung gilt seit langem schon als eine der wirksamsten Möglichkeiten, innermotorisch die Bildung von Stickoxiden zu reduzieren. Hierbei wird Abgas der frischen Ansaugluft zugemischt und in den Zylinder eingebracht. Die Abgasrückführung gibt es in verschiedenen Ausführungen. Dabei wird unterschieden, von wo das Abgas entnommen wird und auch wo es wieder zugeführt wird. Betrachtet man einen Motor mit Turboaufladung dann ergeben sich zwei Varianten die Abgasrückführung zu realisieren. Zum Einen kann das Abgas vor der Turbine des Abgasturboladers (ATL) entnommen werden und folglich nach dem Ladeluftkühler der Frischluft zugeführt werden. Da das Abgas mit hohem Druck vor der Turbine anliegt, nennt man diese Ausführung auch Hochdruck-AGR. Wird das Abgas nach der Turbine des ATL entnommen, ist das Druckniveau deutlich niedriger aufgrund der Entspannung in der Turbine. Zugeführt wird das Abgas folglich vor dem Verdichter des ATL. Diese Variante wird Niederdruck-AGR genannt.

Abgas muss aber nicht auf Umwegen wieder in den Zylinder zurückgeführt werden. Über entsprechende Steuerung von Ventilen, kann Abgas direkt im Zylinder beibehalten werden, oder aus dem Abgaskrümmen wieder zurückgesaugt werden. Diese Art der AGR wird als innere AGR bezeichnet. Näheres dazu wird im Kapitel 2.4.1 erläutert.

Der starke Einfluss auf die Bildung der Stickoxide wird durch mehrere Effekte hervorgerufen. Der thermische Effekt wird durch die Wärmekapazitäten der Abgaskomponenten, CO_2 und H_2O hervorgerufen. Die Wärmekapazitäten dieser Verbindungen sind höher als die der Luft. Diese führen zu einer Absenkung der Verdichtungs- und Verbrennungstemperatur. Die stark von der Temperatur abhängige Stickoxidbildung wird somit von den niedrigeren Temperaturen gehemmt. Das mit dem Abgas rückgeführte Wasser hat noch einen weiteren Effekt. Die Wassermoleküle werden im Brennraum durch Dissoziation aufgespalten. Diese Dissoziationsreaktionen sind endotherm, das heißt sie entziehen ihrer Umgebung Wärme. Dadurch wird wiederum eine Temperatursenkung erreicht. Der Vorteil der sich dadurch ergibt ist allerdings recht überschaubar, da die durch Dissoziation entstandenen O- und OH-Radikale die Bildungsreaktionen von Stickoxiden antreiben. In Summe bleibt aber ein kleiner Vorteil durch die Temperaturabsenkung erhalten. Aufgrund der chemischen Reaktionen die hier stattfinden, wird dieser Effekt auch chemischer Effekt genannt.

Den mit Abstand größten Einfluss auf die NO_x -Reduzierung hat jedoch der Verdünnungseffekt. Die NO_x -Emissionen steigen mit zunehmendem Sauerstoffgehalt im Brennraum sehr stark an. Ein großer Anteil an Inertgas reduziert den möglichen Anteil an Sauerstoff im Brennraum. Somit stehen nicht genügend Sauerstoffmoleküle zur Oxidation der Stickstoffmoleküle zur Verfügung [1, 5].

Variable Ventilsteuerung

Die Entstehung von Schadstoffen ist sehr stark von der Zusammensetzung der Ladung im Zylinder, der Ladungsmenge und der Ladungsbewegung abhängig. Mittels variabler Ventilsteuerung ist es möglich, effektiv diese Faktoren zu beeinflussen. Speziell für den Dieselmotor bietet diese Technologie großes Potenzial in Bereich der Schadstoffreduktion.

Durch veränderte Steuerzeiten der Ventile kann die Füllung des Zylinders verändert werden. Vor allem die Reduzierung der Füllung des Zylinders wirkt sich positiv auf die Schadstoffentstehung aus. Die Reduzierung erreicht man entweder durch frühzeitiges Schließen des Einlassventils (Verfahren nach Miller) oder durch längeres Öffnen des Auslassventils (Verfahren nach Atkinson). Da sich nun weniger Ladung in Zylinder befindet, sinkt das reale Verdichtungsverhältnis. Dies hat zur Folge, dass die Temperaturen im Brennraum, vor allem auch während der Verbrennung, herabgesenkt werden. Niedrigere Verbrennungstemperaturen führen zu deutlich niedrigeren NO_x -Bildungsraten [1, 5].

Zur Reduktion von Ruß- und Partikelemissionen ist ganz besonders die Ladungsbewegung ausschlaggebend. Durch Anpassen des Ventilhubes einzelner Einlassventile kann

der Drall spezifisch für jeden Betriebspunkt optimiert werden. Der Drall entsteht dabei direkt am Ventilsitz, daher auch Sitzdrall genannt, und weist deutlich geringere Strömungsverluste als andere Drallformen auf. Der Drall sorgt am Ventil für erhöhte Turbulenz und somit für erhöhte Strömungsgeschwindigkeiten. Das führt zu einer besseren Durchmischung der Ladung. Drall reduziert somit ganz signifikant die Ruß- bzw. Partikelemissionen.

Eine weitere Möglichkeit auf die Emission von NO_x positiv einzugreifen, bietet die ermöglichte interne Abgasrückführung. Das Prinzip der Abgasrückführung wurde bereits im Vorfeld genauer beschrieben, daher sei an dieser Stelle auf Abschnitt 2.4.1 verwiesen. Trotz der fehlenden Kühlung, und der daraus folgenden Anhebung der Ladungstemperatur, bringt die interne AGR beachtliche Vorteile mit sich. Die hohe Dynamik ist dabei ausschlaggebend. Während mit externer AGR der Eingriff auf die Verbrennung eher langsam erfolgt, steht die interne AGR unmittelbar nach der Umstellung der Ventilsteuerzeiten zur Verfügung. Somit sind die Verbrennungstemperaturen von einem Lastspiel zum nächsten anpassbar [1, 5]. Zu erwähnen ist allerdings, dass die hohen AGR-Raten (etwa 60%) heutiger NFZ-Dieselmotoren nicht über eine innere AGR realisierbar sind. Man muss hier auf die äußere AGR zurückgreifen. Die Möglichkeiten, die sich durch den variablen Ventiltrieb ergeben werden allerdings heute bei Dieselmotoren noch selten eingesetzt. Ausnahmen sind Hersteller wie Mazda und Mitsubishi, die Teilvariabilitäten in einigen ihrer Dieselmotoren realisiert haben, mit denen Ladungsbewegung und Abgasrücksaugung realisierbar sind.

Erhöhung des Einspritzdrucks

Ein erhöhter Einspritzdruck wirkt sich ganz stark bei Motoren mit direkter Kraftstoffeinspritzung aus. Ein erhöhter Einspritzdruck ruft dabei zwei bedeutende Effekte hervor. Der höhere Druck hebt die Gemischbildungsenergie an und senkt in weitere Folge den Tropfendurchmesser [1].

Mit dem Druck steigt auch die Austrittsgeschwindigkeit des Brennstoffes aus dem Düsenloch. Dabei passiert ein erhöhter Impulseintrag in die Ladung des Zylinders und generiert eine starke Ladungsbewegung. Der Strahl dringt dabei auch tiefer in den Brennraum ein und erfasst einen deutlich größeren Teil des Brennraumvolumens. Zusätzlich entstehen durch die höheren Relativgeschwindigkeiten zwischen Kraftstofftropfen und Luft im Zylinder, sehr hohe Scherkräfte an den Kraftstofftropfen, wodurch diese in viel feinere Tropfen aufgerissen werden. Die Kombination dieser beiden Effekte führt zu einer erhöhten Homogenisierung der Ladung und somit zu einer Reduzierung der fetten Zonen. Die Folge ist eine Reduktion der Ruß- und Partikelentstehung. Der durch die Homogenisierung hervorgerufene erhöhte Vormischanteil hat allerdings negative Auswirkungen auf die Entstehung von Stickoxiden. Dieser negative Effekt kann aber durch den größten Vorteil des erhöhten Einspritzdrucks, der AGR-Verträglichkeit, aufgewogen werden. Die AGR-Verträglichkeit des Brennverfahrens beschreibt inwieweit die AGR-Rate an einem Lastpunkt eingestellt werden kann, ohne erhöhte Rußemissio-

nen hervorzurufen oder einen unruhigen Lauf zu riskieren. Ein erhöhter Einspritzdruck ermöglicht also erhöhte AGR-Raten und die daraus folgenden Vorteile, ohne Einbußen in den Rußemissionen [1, 5].

Einbringung von Wasser in den Verbrennungsprozess

Die Einbringung von Wasser in die Dieselerbrennung kann ebenfalls zur Reduktion von Schadstoffen verwendet werden. Dabei gibt es die Möglichkeit das Wasser der Ansaugluft beizumengen und dieses bereits im Ansaugsystem zu verdampfen, oder selbiges direkt in den Brennraum einzubringen. Bei der Einbringung in das Ansaugsystem werden Effekte, ähnlich denen, wie bei der Abgasrückführung hervorgerufen. Das verdampfte Wasser reduziert den Sauerstoffgehalt der angesaugten Luft und somit das Maß der thermischen Stickoxidbildung. Bei der direkten Einbringung in den Brennraum wird neben dem bereits erwähnten Verdünnungseffekt auch der Kühlungseffekt durch die Verdampfung ausgenutzt. Durch die Verdampfung wird der Umgebung viel Wärme entzogen, was sich auch in der Flammentemperatur abzeichnet. Die herabgesetzten Flammentemperaturen führen dazu, dass die Bildungstemperaturen von thermischen Stickoxiden gemieden werden. Auch die Rußemissionen können mit Einbringung von Wasser in den Verbrennungsprozess verringert werden. Hier spielen vor allem das angehobene lokale Luftverhältnis im Einspritzstrahl und der längere Zündverzug, durch den das Luftverhältnis im Bereich der Hochtemperaturreaktionen abgesenkt wird, eine entscheidende Rolle [5].

2.4.2 Außermotorische Maßnahmen – Abgasnachbehandlung

Die zuvor besprochenen innermotorischen Maßnahmen zur Reduktion der Schadstoffemissionen gelangen mit der Verschärfung der Gesetzgebung an ihre Grenzen. Während sich für Ottomotoren der 3-Wege-Katalysator bewährt hat, weil er bei der stöchiometrischen Zusammensetzung des Abgases alle relevanten Schadstoffe reduziert, verlangt der Dieselmotor nach Alternativen. Prinzipbedingt ist das Abgas des Dieselmotors mager, weswegen auch die Umsetzung der Schadstoffe im bewehrten 3-Wege-Katalysator versagt. Daher wurden in den letzten Jahrzehnten verschiedene Systeme zur Nachbehandlung von NO_x , HC, CO und Rußemissionen entwickelt und stetig verbessert. Dazu sind verschiedene Katalysatoren notwendig. Katalysatoren beschleunigen chemische Reaktionen indem sie die Aktivierungsenergie herabsetzen, jedoch ohne selber in der Reaktion verbraucht zu werden. Im Fahrzeugbau wird das gesamte Bauteil, welches die katalytischen Substanzen enthält als Katalysator bezeichnet. Einen schematischen Aufbau soll Abbildung 10 darstellen. Ein Katalysator besteht immer aus einem Trägermaterial, einem Washcoat und der katalytischen Beschichtung. Das Trägermaterial besteht entweder aus einem gewickelten Metallblech oder aus einem Keramikkörper, welcher auch Monolith genannt wird. Dieser besteht aus vielen kleinen Zellen, in der Regel mit einer Zelldichte ab 400 cpsi (cells per square inch). In den feinen Kanälen

des Monolithen wird der Washcoat aufgebracht, welcher die Aufgabe hat, die aktive Oberfläche zu Vergrößern. Er besteht aus einer γ - Al_2O_3 -Schicht (γ bezeichnet dabei die kubische Modifikation des Al_2O_3) und erreicht eine Oberfläche von etwa 10 bis 25 m^2 pro Gramm Washcoat.

Auf die vergrößerte Oberfläche des Washcoats wird dann die katalytische Edelmetallbeschichtung aufgebracht [2].

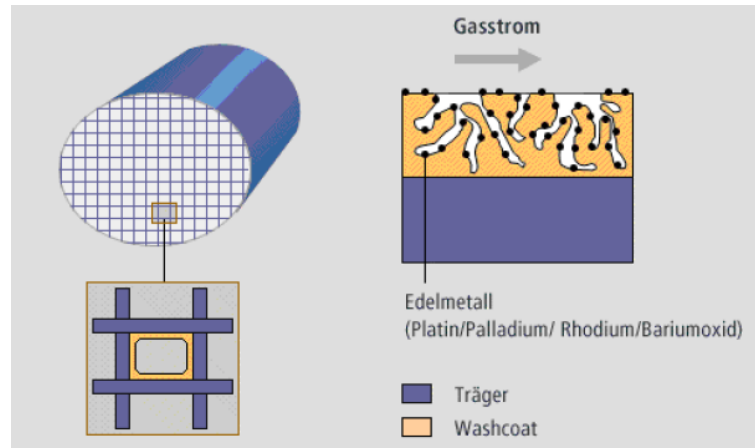


Abbildung 2.9: Aufbau eines Katalysators [4]

In der Regel kommen je nach Anwendungszweck, Metalle wie Platin, Rhodium, Palladium oder Vanadium zum Einsatz. Die Kombination von Träger, Washcoat und Katalyt wird abschließend in ein metallisches Gehäuse eingefasst. Anspringtemperatur, Raumgeschwindigkeit und Durchströmgeschwindigkeit sind einige wichtige Kennzahlen eines Katalysators. Die Anspringtemperatur beschreibt jene Temperatur, bei der 50% Konvertierungsrate erreicht wird. Die Raumgeschwindigkeit ist ein Maß für die Belastung des Katalysators und ist nach Formel 2.22 definiert [2].

$$RG = \frac{\dot{V}_{\text{Abgas}}}{V_R} = \frac{\text{Abgasvolumenstrom}}{\text{Katalysatorvolumen}} \quad (2.22)$$

Die Durchströmgeschwindigkeit heutiger Katalysatoren liegt zwischen 0,5 m/s im Leerlauf und 60 m/s bei Vollastbetrieb.

Oxidationskatalysator

Bei der dieselmotorischen Verbrennung werden nicht alle Kohlenwasserstoffe vollständig oxidiert. Manche reagieren nur zum Teil mit den Sauerstoffatomen wodurch Kohlenmonoxid CO gebildet wird, während andere völlig unberührt von der Verbrennung als HC-Emissionen im Abgas enthalten sind. Der Oxidationskatalysator soll die teilweise abgelaufenen Reaktionen vollenden, das heißt das CO zu CO_2 aufoxidieren und die Kohlenwasserstoffe zur Reaktion mit Sauerstoff bringen und diese zu CO_2 und H_2O

umwandeln. Da Kohlenwasserstoffe häufig an festen Rußpartikeln angelagert sind, reduziert der Oxidationskatalysator auch die Partikelmasse [1, 2, 5].

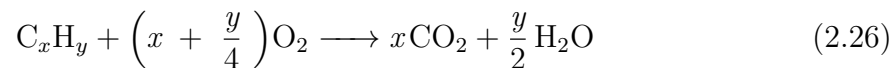
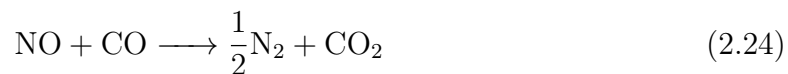
3-Wege-Katalysator

Obwohl der 3-Wege-Katalysator nicht zur Aufbereitung der Dieselaabgase verwendet werden kann, soll hier sein Funktionsprinzip trotzdem kurz beschrieben werden. Die Grundreaktionen des 3-Wege-Katalysators treten nämlich auch in anderen Katalysatoren auf, wie zum Beispiel im NO_x -Speicherkatalysator.

Der 3-Wege-Katalysator arbeitet nur in einem sehr engen Lambdafenster wirklich effektiv. Nur im Bereich $0,99 < \lambda < 1,002$ werden alle Schadstoffe mit einem Konvertierungsgrad von mindestens 90 % umgesetzt. Der Konvertierungsgrad K stellt dabei ein Maß für die Wirksamkeit des Katalysators im Bezug auf die Verminderung der Konzentration c einer Schadstoffkomponente dar [2]. Er ist laut Gleichung 2.23 definiert.

$$K = \frac{C_{i, \text{ Rohabgas}} - C_{i, \text{ nachKat}}}{C_{i, \text{ Rohabgas}}} \quad (2.23)$$

Die Reaktionen die im 3-Wege-Katalysator vorwiegend ablaufen, können mit den nachfolgenden drei einfachen Reaktionsgleichungen dargestellt werden [2].



NO_x -Speicherkatalysator

Der NO_x -Speicherkatalysator entspricht zum Großteil einem 3-Wege-Katalysator und arbeitet bei $\lambda = 1$ auch wie ein solcher. Allerdings enthält er neben den für 3-Wege-Katalysatoren typischen Edelmetallbeschichtungen und Sauerstoffspeicherkomponenten zusätzliche Komponenten, die NO_x speichern können. Gute NO_x -Speichereigenschaften haben sogenannte Alkali- bzw. Erdalkalimetalle wie z. B. Barium. Die Speicherung findet während des mageren Betriebs bei $\lambda > 1$ statt, siehe Schema in Abbildung 2.10. Durch die Edelmetallbeschichtung wird das NO zu NO_2 aufoxidiert. Das ist wichtig für die Speicherung, da nur NO_2 in weiterer Folge als Nitrat am Bariumoxid angelagert werden kann. Die Speicherfähigkeit ist stark temperaturabhängig und am besten zwischen 300 und 400 °C [2, 5].

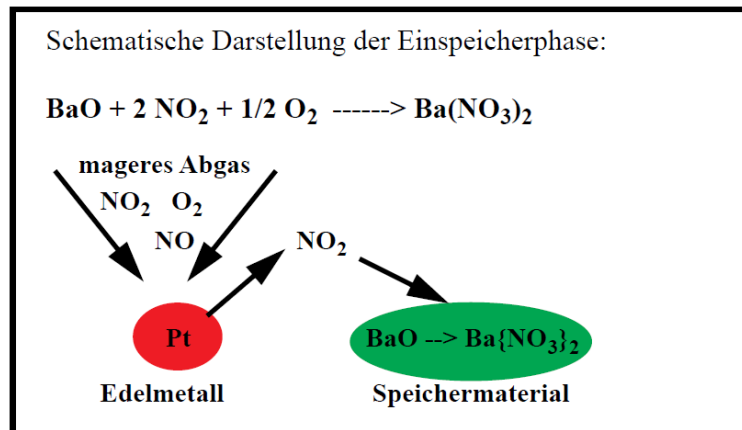


Abbildung 2.10: Einspeicherung der Stickoxide [4]

Ist die Speicherkapazität ausgeschöpft, muss der Katalysator regeneriert werden. Wird keine Regeneration durchgeführt, werden NO_2 frei durch den Katalysator durchgelassen. Um die Regeneration zu starten muss dafür kurzzeitig eine fette Betriebsphase eingestellt werden. Dabei wird das NO_2 wieder ausgelagert und in einen weiteren Schritt in NO umgewandelt, welches dann an der Edelmetallbeschichtung mit den übrigen Komponenten im Abgas desorbiert. Der Sauerstoffmangel durch die fette Verbrennung wird kompensiert indem die Sauerstoffspeicher des Katalysators entleert werden. Im Katalysator herrscht dann wieder nahezu stöchiometrisches Luftverhältnis und die Reaktionen des 3-Wege-Katalysators können ablaufen. Im Idealfall verlassen den Katalysator dann nur CO_2 , H_2O und N_2 [2, 5].

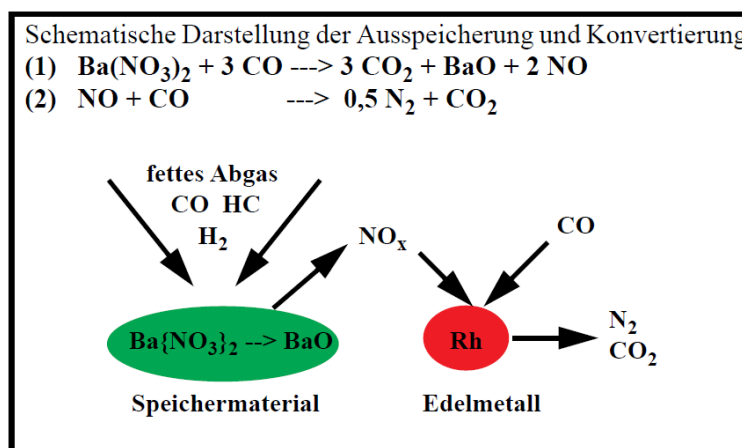
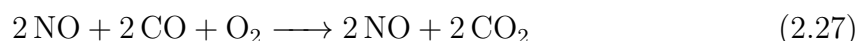


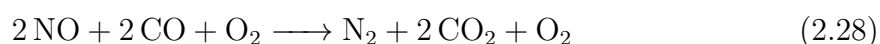
Abbildung 2.11: Auslagerung von Stickoxiden [4]

SCR-Katalysator

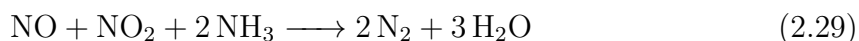
Das Prinzip der selektiven katalytischen Reduktion (Selective Catalytic Reduction) beruht auf dem Hervorrufen einer bestimmten chemischen Reaktion zur Reduktion von Stickoxiden. Aufgrund des hohen Sauerstoffanteils im Dieselaabgas gelingt es nicht die Stickoxide im Abgas mithilfe des ohnehin vorhandenen Kohlenmonoxids zu reduzieren. Reaktion 2.27 verdeutlicht, warum das NO_x in dem sauerstoffreichen Abgas nicht durch das CO reduziert werden kann [2, 5].



Dadurch dass ausreichend Sauerstoff vorhanden ist, reagiert das Kohlenmonoxid damit, anstatt das Stickstoffmonoxid nach Reaktion 2.28 zu reduzieren.



Um nun eine Umsetzung des Stickoxids bevorzugt ablaufen zu lassen, muss ein zusätzliches Reduktionsmittel eingebracht werden, welches selektiv mit den Stickoxidmolekülen in Reaktion geht. Dafür wird Ammoniak NH_3 eingesetzt. Bevorzugt soll dann folgende Reaktion 2.29 („schnelle SCR-Reaktion“) ablaufen [2].



Da Ammoniak als Gefahrenstoff, speziell im Bezug auf die menschliche Gesundheit, eingestuft ist, ist das mitführen des Gases in Fahrzeugen nicht ohne weiteres möglich. Bei Aufnahmen von großen Mengen (1700 ppm) über die Atmung besteht akute Lebensgefahr, da das Gas bei Kontakt mit Feuchtigkeit stark ätzend wirkt und somit die Schleimhäute angreift. Diese Schädigung führt zu Ödemen in Kehlkopf und Lunge bzw. zu akuten Entzündungen in der Lunge, bis hin zum Atemstillstand. Wie man das Reduktionsmittel trotzdem im Fahrzeug bereitstellen kann, ohne den Anwender einer Gefahr auszusetzen, wird in den Kapiteln 2.5 und 3 genauer erklärt.

Diesel-Partikel-Filter

Die festen Bestandteile des Dieselaabgases, vorwiegend Ruß und Aschen, müssen vollständig aus dem Abgas herausgefiltert werden. Die geforderten Filterwirkungsgrade liegen heute bei über 99% bezüglich der Partikelmasse und Partikelanzahl. Diese anspruchsvolle Aufgabe fällt dem DPF zu. Diesel-Partikel-Filter sind sehr hohen thermischen, chemischen als auch mechanischen Beanspruchungen ausgesetzt. Während der Regenerationsphase können zeitweise Temperaturen bis 700 °C auftreten. Diesen starken thermischen Belastungen muss der Monolithfilter über eine relativ lange Lebensdauer unbeschadet standhalten. Das Filtermaterial muss zudem auch noch chemisch aggressiven Stoffen trotzen, welche in Ölaschen auftreten oder aus Kraftstoffadditiven hervorgehen können. Mechanische Beanspruchungen werden meist durch auftretende

Vibrationen hervorgerufen, nehmen jedoch in Summe den geringsten Anteil an der Gesamtbelastung des DPF ein [2, 5].

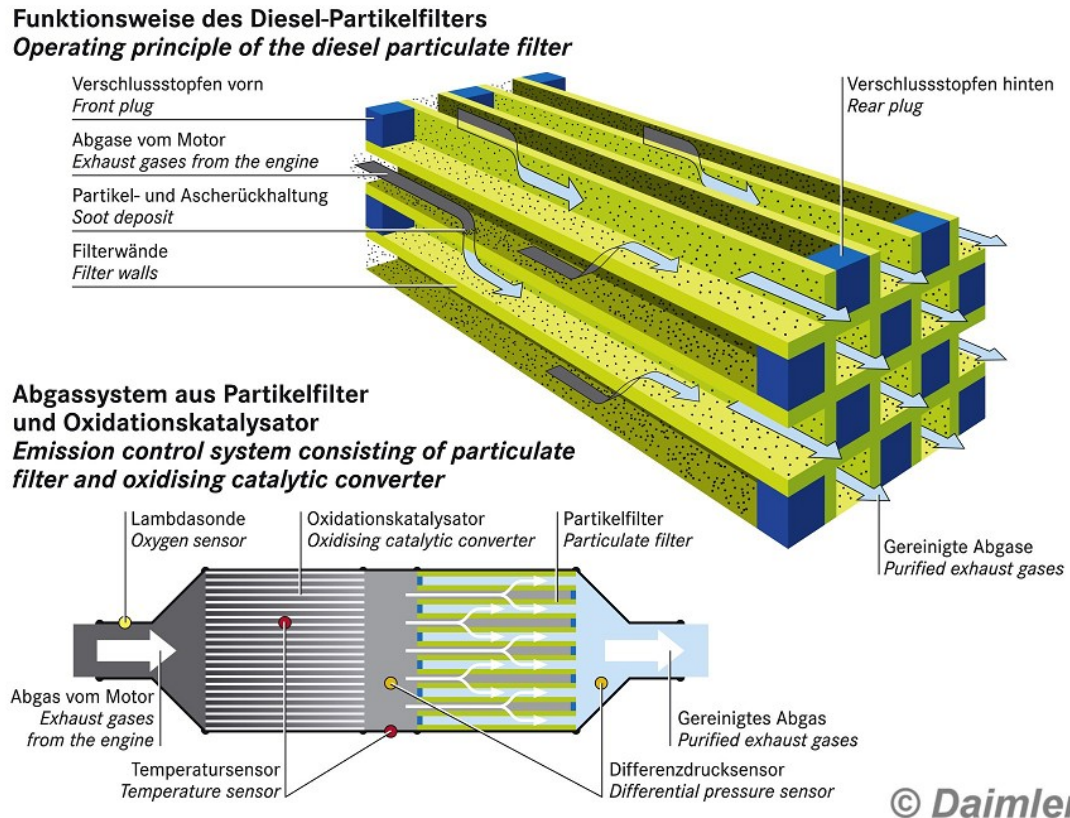


Abbildung 2.12: Schematische Darstellung eines Partikelfilters mit vorgeschalteter Oxidationstufe [Quelle: Daimler]

Am weitesten verbreitet ist der so genannte „Wall-Flow-Filter“. Abbildung 2.12 zeigt eine schematische Darstellung eines solchen Filters. Der DPF ist heutzutage nicht mehr als gesondertes Bauteil vorhanden. Er wird mit dem DOC (Diesel-Oxidationskatalysator) in einem Gehäuse zusammengefasst. Der wichtigste Grund für diese Ausführung liegt im günstigeren Packageing und im besseren Thermomanagement.

Im Gegensatz zu einem Katalysator, sind beim Partikelfilter die einzelnen Kanäle an jeweils einem Ende verschlossen. Dies ist von großer Bedeutung für die Funktionalität des Filters. Durch das Verschließen der Kanäle, wird das Abgas gezwungen, durch die porösen Wände des Monolithen zu strömen. Diese sind für alle gasförmigen Bestandteile kein Hindernis, bilden aber für alle festen Bestandteile eine undurchlässige Barriere. In den einlassseitig offenen Kanälen lagern sich dadurch alle festen Bestandteile ab. Die Aschen sammeln sich vermehrt an den verschlossenen Enden der Einlasskanäle, während sich die Rußpartikel an den Wänden anlagern durch die das Abgas strömt.

Durch das ständige Beladen mit Partikeln wird der Strömungsquerschnitt mit der Zeit immer kleiner. Dadurch entsteht ein erhöhter Widerstand für die Strömung und in weiterer Folge ein erhöhter Abgasgegendruck. Die Beladung des Filters muss daher stets überwacht werden. Über einen Differenzdrucksensor wird der Druckabfall über den Filter bestimmt. Dieser ist ein direktes Maß für den Beladungszustand des Filters. Je höher die Beladung umso höher wird auch der Abgasgegendruck, welcher ab einem bestimmten Maß Schäden am Motor verursachen kann. Aus diesem Grund muss der Filter ab einem festgelegten Beladungszustand regeneriert werden. Der Rußabbrand erfolgt in der Regel erst ab Temperaturen von 500 °C (thermische Regeneration). Solche Abgastemperaturen können nur in Hochlastbetrieb entstehen, welcher im realen Fahrbetrieb selten vorkommt. Deswegen müssen Regenerationsstrategien hinterlegt werden, welche bei Erreichen einer kritischen Beladung eine Regeneration unabhängig vom Betriebszustand auslösen können. Im unteren Kennfeldbereich muss über innermotorische Heizmaßnahmen der Rußabbrand in Gang gesetzt werden. Fette Phasen während der Regeneration heben die Abgastemperaturen auf ein Niveau an, bei dem der Abbrand stattfinden kann. Durch Zusatz von Additiven in den Kraftstoff, können die notwendigen Temperaturen deutlich herabgesetzt werden. Additive haben jedoch den Nachteil, dass sie als Aschen im Filter verbleiben. Da diese nicht abgebrannt werden können, muss der Filter bei zu hoher Beladung mit Aschen ausgetauscht werden [2, 5].

Eine weitere Möglichkeit der Regeneration wäre der kontinuierliche Abbrand durch NO₂. Durch Bereitstellung von NO₂ im vorgeschalteten Oxidationskatalysator oder durch katalytisch beschichtete Filter werden folgende Reaktionen 2.30 und 2.31 im Filter hervorgerufen:



Dabei wird zwar der Ruß abgebrannt, jedoch werden die Stickoxide nicht abgebaut. Es findet lediglich eine Verlagerung der Konzentration von NO₂ zu NO statt. Das macht zwingend eine NO_x-Nachbehandlung nach dem DPF notwendig. Die Regeneration eines Filters muss immer früh genug erfolgen. Einerseits ist ein zu hoher Abgasgegendruck auf Dauer schädlich für den Motor, andererseits führt ein Abbrand von großen Partikelmassen zu hohen thermischen Belastungen im Filter und zur Zerstörung des Filtermaterials. Auch die Aschen können durch Schmelzen, bei Temperaturen über 1100 °C, den Filter zulegen [2, 5].

2.5 Selektive katalytische Reduktion mit Harnstoff

Wie bereits in Unterkapitel 2.4.2 erwähnt, versteht man unter selektiver katalytischer Reduktion eine gezielte Minderung einer Abgaskomponente unter Verwendung eines geeigneten Reduktionsmittels.

Speziell für magere Abgaszusammensetzungen, wie sie bei der dieselmotorischen Verbrennung vorkommen, wird für die Minderung der Stickoxide, Ammoniak als Reduktionsmittel eingesetzt. Da Ammoniak als Gefahrenstoff gilt, ist die Verwendung von reinem Ammoniak und auch das Mitführen im Fahrzeug nicht möglich. Das benötigte Ammoniak wird daher in den heutigen Standardsystemen on-board hergestellt. Als Trägermaterial für das benötigte NH_3 wird vorwiegend Harnstoff $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ verwendet. Dieser wird in Wasser gelöst und steht dann als Harnstoff-Wasser-Lösung (HWL) zur Verfügung. Die Verwendung von Ammoniak zur Reduktion von Stickoxiden stammt ursprünglich aus der Kraftwerksindustrie und hat sich dort aufgrund von Umsatzraten über 99 % bewährt. Diese ursprünglich stationäre SCR-Anlage wurde 2001 erstmals in Nutzfahrzeugen in mobiler Form eingesetzt und findet mittlerweile auch Anwendung im PKW-Segment. Der Umgang mit der HWL ist im Vergleich zum Hantieren mit reinem Ammoniak, gesundheitlich unbedenklich. Jedoch bringt ein zusätzliches Betriebsmedium immer auch zusätzliche Nachteile und Schwierigkeiten mit. Unabhängig von den zusätzlichen Kosten, ergibt sich für die Fahrzeughersteller ein erhöhter Aufwand durch den notwendigen Tank, die aufwendige Dosiertechnik und die notwendige Software zur Steuerung des Systems. Unter anderem sind dabei die Eigenschaften der HWL zu berücksichtigen. Die HWL gefriert z. B. bei -11°C . Dies muss durch Heizmaßnahmen oder etwaige Additive verhindert werden [2, 4, 5].

Der Harnstoff der für die Herstellung der HWL verwendet wird, stammt aus der chemischen Industrie. Er wird in großen Mengen in Form von Pellets hergestellt und dient vorwiegend als Düngemittel in der Landwirtschaft, als Auftausalz oder als Proteinlieferant für Tierfutter. Harnstoff gilt in seiner rohen Form als gesundheitlich unbedenklich und ist in der Herstellung sehr kostengünstig. Gelöst in Wasser entsteht die HWL, die heute weit verbreitet unter dem Namen AdBlue[®] bekannt ist [4].

2.5.1 Prozessschritte des SCR-Verfahrens

Die eigentliche SCR-Reaktion erfordert weitere Reaktionen, die vor und nach der selektiven Reaktion ablaufen müssen. Betrachtet man Reaktion 2.29 so ist ersichtlich welche Komponenten für den Ablauf der SCR-Reaktion notwendig sind. Daher wird in einer Vorstufe, im DOC-Katalysator (Diesel Oxidation Catalyst), eine Oxidation der Abgasbestandteile CO und HC hervorgerufen. Dabei werden diese mit Hilfe von Sauerstoff zu CO_2 und Wasser umgewandelt. In der selben Stufe wird ein Teil des NO zu NO_2 aufoxidiert, welches für die folgende SCR-Reaktion von großer Bedeutung ist. Das benötigte Ammoniak wird im Fahrzeug erzeugt. Dies geschieht durch Freisetzung des Ammoniaks aus Trägermaterialien. Das am weitesten verbreitete Trägermaterial ist

die bereits erwähnte Harnstoff-Wasser-Lösung. Es wäre auch möglich feste Trägerstoffe einzusetzen, jedoch hat sich die HWL flächendeckend durchgesetzt. Nach Ablauf der SCR-Reaktion muss schließlich noch verhindert werden, dass NH_3 als Bestandteil des Abgases emittiert wird [2, 4]. Die Prozesskette des SCR-Verfahrens kann vereinfacht wie in Abbildung 2.13 dargestellt werden.

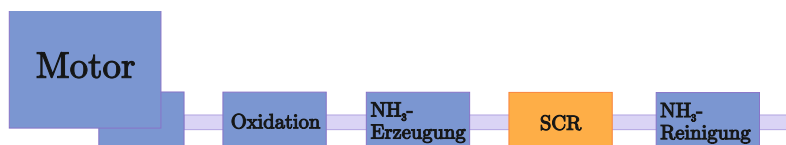


Abbildung 2.13: SCR-Prozesskette [2]

Bei der Erzeugung des Ammoniaks laufen einige Prozesse ab. Diese müssen bedingt durch das relativ geringe Platzangebot auf kleinstem Raum ablaufen. Entsprechend muss dieser Umstand bei der Entwicklung des Systems berücksichtigt werden. Die HWL wird als Spray in den Abgasvolumenstrom eingebracht. Über die Länge des Mischungsweges finden dann neben den Vermischungsvorgängen auch die notwendigen chemischen Reaktionen zur Freisetzung von NH_3 statt. Während der „Thermolyse“ und der „Hydrolyse“ wird der Harnstoff in Ammoniak umgewandelt [2]. Graphisch kann die NH_3 -Erzeugung wie folgt dargestellt werden.

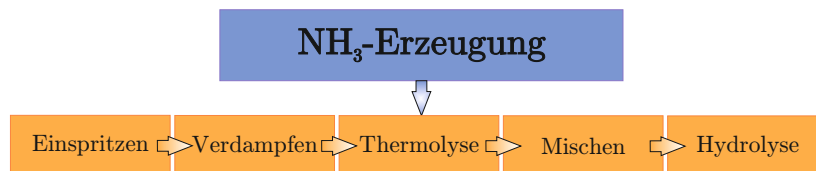


Abbildung 2.14: Einzelschritte zur Freisetzung von NH_3 [2]

2.5.2 Chemische Reaktionen

Eine Reihe chemischer Reaktionen finden während des SCR-Prozesses statt. Da sie bislang nur oberflächlich behandelt wurden, sollen sie im nachfolgenden Abschnitt genauer betrachtet werden.

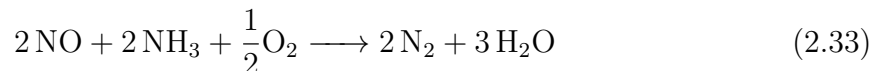
Oxidation und NO_x -Reduktion

Während der Oxidation reagieren die Abgaskomponenten CO , HC und NO mit Sauerstoff. Dies findet typischerweise in einem Oxidationskatalysator statt. Die Oxidation von CO und HC läuft dabei nach der Gesetzmäßigkeit des 3-Wege-Katalysators ab. Die Reaktionen 2.25 und 2.26 veranschaulichen diesen chemischen Prozess. Durch den hohen Sauerstoffgehalt reagiert vorzugsweise das gesamte CO mit O_2 -Molekülen und

steht somit nicht für die Reaktion 2.24 zur Verfügung. Das NO wird stattdessen durch den Sauerstoff oxidiert und bildet NO₂ nach folgender Reaktion [2].



Die Kombination von Reaktion 2.29, welche auch „schnelle SCR-Reaktion“ genannt wird, mit Reaktion 2.32, welche der „schnellen SCR-Reaktion“ vorgeschaltet ist, ergibt die Reaktionsgleichung 2.33 der „Standard-SCR-Reaktion“ [2].



Wie schnell die SCR-Reaktion abläuft wird durch deren Reaktionsgeschwindigkeit bestimmt. Diese hängt von einigen Parametern ab. Einen großen Einfluss hat zum Beispiel die Temperatur über dem SCR-Katalysator. Der SCR-Katalysator arbeitet in einem großen Temperaturfenster mit relativ hohen Umsatzraten von mehr als 90%. Dieser Temperaturbereich liegt für die heutigen Standard-SCR-Anlagen in der Regel zwischen 200 °C und 450 °C. Um sogenannte Kaltzonen und somit die Ablagerung von unerwünschten Zwischenprodukten der NH₃-Erzeugung zu vermeiden wird die Dosierung der HWL erst ab 200 °C eingeschaltet. Näheres dazu ist unter Abschnitt 2.5.2 zu finden. Die Begrenzung des Temperaturbereichs auf der rechten Seite wird ebenfalls von dem Auftreten einer unerwünschten chemischen Reaktion festgelegt. Ab 450 °C wird nämlich das erzeugte NH₃ mit Sauerstoff verbrannt. Dadurch reduziert sich die Menge der NH₃-Moleküle, was folglich zu einer Reduktion der Umsatzrate führt [2]. Die NO_x-Umsatzrate aufgetragen über der Temperatur ist in Abbildung 2.15 in rot dargestellt.

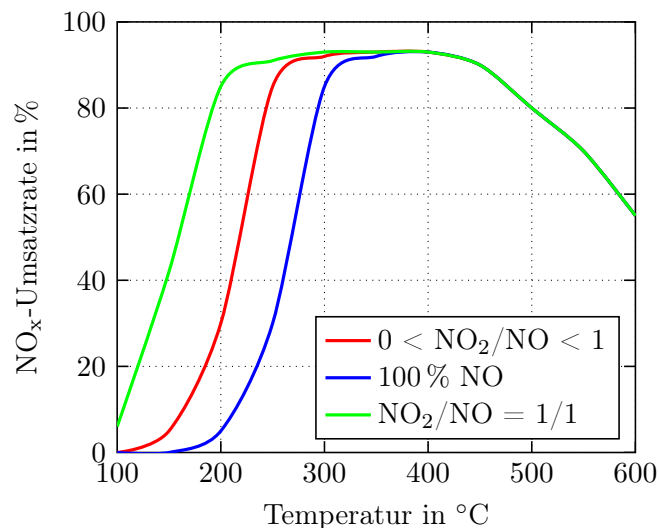


Abbildung 2.15: Einfluss des Konzentrationsverhältnisses NO₂/NO bei SCR-Eintritt [2]

Die Temperatur ist jedoch nicht der einzige Einflussfaktor im Bezug auf die Reaktionsgeschwindigkeit. Die NO_x -Konzentration und vor allem auch das Verhältnis der Konzentrationen von NO und NO_2 haben einen starken Einfluss auf die Geschwindigkeit der Reaktion. Abbildung 2.15 zeigt die NO_x -Umsatzraten für verschiedene Verhältnisse von NO_2 zu NO . Optimal für die Umsetzung ist eine NO_x -Zusammensetzung aus 50 % NO und 50 % NO_2 . In diesem Fall können schon bei recht niedrigen Temperaturen, hohe Umsatzraten erreicht werden. Im Gegensatz dazu sind die Umsatzraten bei 100 % NO relativ niedrig [2].

Als abschließender Einflussfaktor sei noch die Beladung des Katalysators mit Ammoniak erwähnt. Die katalytische Oberfläche des SCR-Katalysators besitzt die Fähigkeit NH_3 zu speichern. Das Einlagerungspotenzial hängt wiederum von der Temperatur ab. Die Speicherfähigkeit ist somit eine Funktion von der Temperatur und nimmt die Form von Abbildung 2.16 an. Je nach Dosierstrategie schwankt auch die tatsächlich eingespeicherte Menge. Die so genannte NH_3 -Bedeckung bewegt sich dabei zwischen Null und dem möglichen, von der Temperatur abhängigen, Höchstwert in Prozent. Als Größenordnung für die maximal einzuspeichernde Menge kann folgender Bezug herangezogen werden: 1 g NH_3 /1 Liter Katalysatorvolumen [2].

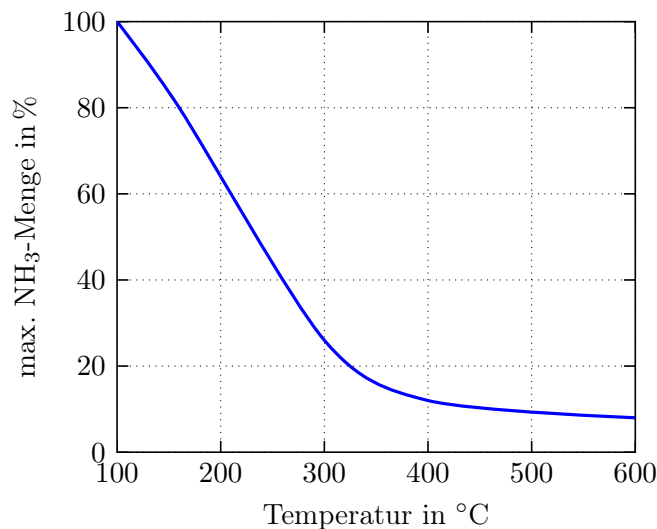


Abbildung 2.16: max. im Katalysator einlagerbare NH_3 -Menge in Abhängigkeit von der Temperatur [2]

NH₃-Erzeugung

Zur Erzeugung von Ammoniak aus der HWL müssen zwei Prozesse ablaufen. Ab einer Temperatur von 150 °C wird aus der Harnstoff-Wasser-Lösung (NH₂)₂CO ein NH₃ Molekül abgespalten („Thermolyse“). Dabei bildet sich ein sehr reaktives Molekül, die Isocyan säure HNCO, welche in weiterer Folge idealerweise mit Wassermolekülen reagiert („Hydrolyse“) und wiederum NH₃ bildet. Die vollständigen chemischen Reaktionen werden wie folgt angeschrieben.



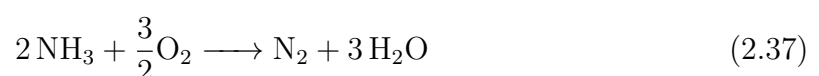
Bei ungünstigen Strömungen oder nicht gut ausgelegten Mischungswegen, neigt die Isocyan säure dazu komplexere Moleküle zu bilden. Ein Beispiel sei in Reaktion 2.36 dargestellt.



Diese komplexen Verbindungen entstehen vorwiegend in Bereichen in denen sich die HWL ansammelt. Solche Stellen bieten günstige Bedingungen für den Ablauf der unerwünschten Reaktion 2.36. Die dabei entstandenen Substanzen lagern sich als Feststoffe im Abgasstrang ab, was prinzipiell zu vermeiden ist. Aus diesem Grund ist dies bereits bei der Gestaltung der Mischungswege und der Dosiereinheit zu berücksichtigen [2]. Wie diese Überlegung in die Auslegung der SCR-Anlage einfließt, soll in einem späteren Abschnitt genauer betrachtet werden.

NH₃-Reinigung

Prinzipiell ist es durchaus möglich, dass während des Betriebs zu viel Ammoniak im Bezug auf die vorhandene NO_x-Konzentration bereitgestellt wird. Da dieses nicht als Bestandteil des Abgases einfach emittiert werden soll und darf, muss es noch vor dem Austritt aus dem Abgasnachbehandlungssystem abgebaut werden. Durch Verbrennung mit Luftsauerstoff kann Ammoniak abgebaut werden. Die Verbrennungsreaktion 2.37 setzt in der SCR-Stufe ab 450 °C ein, ist dort aber nicht erwünscht, weil sie die Menge an Ammoniak reduziert und somit deutlich weniger Stickoxide umgesetzt werden können. Im Gegensatz dazu ist aber genau diese Reaktion zur Reinigung des Abgases von NH₃ bestens geeignet. Die hohen Temperaturen sind allerdings ein Hindernis und müssen daher herabgesetzt werden. Dies kann in geeigneten Platin-Katalysatoren erfolgen, in dem das Ammoniak mit Luftsauerstoff schon bei 150 °C verbrennt.



Nicht nur eine Überdosierung kann einen so genannten NH_3 -Schlupf hervorrufen, sondern auch eine ungleichmäßige Verteilung von Ammoniak an der Eintrittsfläche des SCR-Katalysators. Auch dies kann durch geeignete Auslegung der Komponenten vermieden werden [2].

2.5.3 Bauliche Komponenten

Alle baulichen Bestandteile einer SCR-Anlage sind für den Erfolg der eigentlichen SCR-Reaktion von großer Bedeutung. Die geometrische Ausführung, die gewählten Materialien aber auch die richtige Strategie der Dosierung, haben sehr großen Einfluss auf die erzielbaren Umsatzraten. Aus diesem Grund müssen schon von Beginn an die Auswirkungen der Komponenten auf den SCR-Prozess bekannt sein und in die Entwicklung einfließen.

Repräsentativ sollen hier die Einflüsse der Komponenten Dosiersystem, Mischungskanal und des Katalysators als Bauteil, auf den SCR-Prozess näher gebracht werden. Die genannten Komponenten werden auch beim mechanischen Aufbau in der oben verwendeten Reihenfolge aneinander gereiht und sollen dementsprechend auch in dieser Reihenfolge behandelt werden.

Dosiersystem

Unter dem Begriff des Dosiersystems sind alle Bauteile zusammengefasst, die für die Einbringung der HWL und somit für den Beginn der NH_3 -Freisetzung notwendig sind. Um zu jeder Zeit und zu jeder Betriebssituation die entsprechende Menge an Harnstoff bereitstellen zu können, muss das System einige Aufgaben zuverlässig erfüllen. Unter anderem zählen dazu die Aufnahme der HWL und deren Förderung, der Aufbau des Dosierdrucks, die Dosierung, der Gefrierschutz und alle zur Überwachung der richtigen Arbeitsweise notwendigen Funktionen. Ähnlich wie alle anderen Systeme die neu in ein Fahrzeug implementiert werden, soll auch dieses weitestgehend im Hintergrund agieren. Der Fahrer soll davon möglichst wenig mitbekommen. Aus diesem Grund wurde beim PKW sogar das Betankungsintervall so gewählt, dass es mit dem Serviceintervall zusammenfällt. Bei Nutzfahrzeugen betankt der Fahrer das Fahrzeug mit dem Reduktionsmittel [2, 5].

Ein wesentliches Ziel sollte sein, möglichst gute Umsätze bei geringem Harnstoff-Einsatz zu erreichen. Dies ist nur möglich, wenn eine gute Aufbereitung bzw. Durchmischung gewährleistet werden kann. Dabei muss man mit seinen Überlegungen allerdings schon vor dem Mischungskanal beginnen und zwar bei der Dosiereinheit. Zu Beginn der Entwicklung von SCR-Systemen wurden daher vorwiegend luftunterstützte Dosiereinheiten verwendet. Durch Zuführen von Druckluft konnte der Strahl viel feiner zerstäubt werden, wodurch viel kleinere Tropfengrößen, im Vergleich zu einem luftlosen System, erreicht wurden. Das führte zu einer deutlich besseren Vermischung und begünstigte natürlich auch den Verdampfungsvorgang. Wegen hoher Systemkomplexität

und vor allem auch durch den SCR-Einsatz im PKW, der im Gegensatz zum LKW keine Druckluftversorgung besitzt, kam man von den druckluftunterstützten Systemen ab und fokussierte sich vielmehr auf die Entwicklung von Systemen, die durch einen höheren Dosierdruck, ähnliche Tropfengrößen erreichen können. Neben der Notwendigkeit, das System auf deutlich höhere Drücke auslegen zu müssen, mussten auch die Dosierventile eine Entwicklung in Richtung feinerer Zerstäubung und besserer Sprayentfaltung machen [5]. In folgender Abbildung 2.17 werden zwei Dosierventile mit den dazugehörigen Sprays und der Tropfengröße miteinander verglichen.

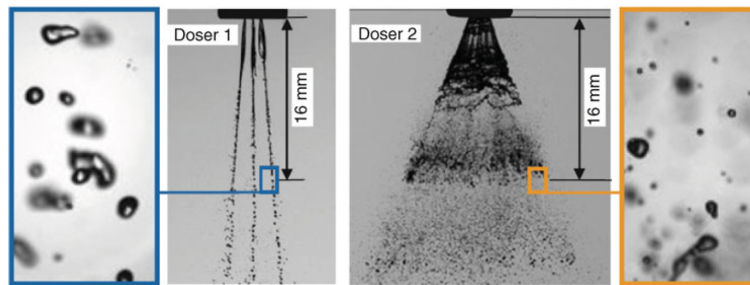


Abbildung 2.17: Sprayentfaltung bei zwei versch. Dosern; links: Dreilochinjektor mit 5 bar Einspritzdruck; rechts: Mehrlochinjektor (60° Öffnungswinkel) mit über 30 bar Einspritzdruck [5]

Ganz wesentlich sind dabei die Unterschiede in der erreichbaren Tropfengröße. Je kleiner die Tropfen umso besser und früher erfolgt die Verdampfung. Damit wird das Auftreffen der Tropfen auf Bauteilwänden oder auch am Katalysator selbst verhindert. Ablagerungen werden somit stark reduziert und auch die notwendige Gleichverteilung des Ammoniaks am Eintritt in die SCR-Stufe ist dadurch realisierbar.

Die Einstellung der benötigten Harnstoff-Menge geschieht ebenfalls über das Dosierventil. Während der Dosierdruck in einem Bereich zwischen 5 und 10 bar annähernd konstant eingestellt wird, geschieht die Mengendosierung lediglich über die Taktung des Dosierventils. Der Massenstrom kann dabei durch einfache Variation der Öffnungsdauer eingestellt werden [2, 5].

Mischungskanal

Mit der Einbringung der HWL in den Abgasstrom wird die NH_3 -Erzeugung eingeleitet. Dabei ist neben der Verdampfung der flüssigen Tropfen, die Vermischung des Harnstoffs mit dem Abgas von großer Bedeutung. Zur Verbesserung der Gemischbildung werden daher verschiedene Mischerelemente eingesetzt. Diese sollen bei der Durchmischung helfen indem sie die Tropfen bei Kollision aufbrechen, sie dürfen aber keinen negativen Einfluss auf die Strömungsverhältnisse haben. Eine falsche Auslegung der Mischerelemente kann unter Umständen einen erhöhten Abgasgedruck erzeugen, der sich sofort als erhöhter Kraftstoffverbrauch widerspiegeln würde. Um von Beginn an unerwünschte Effekte zu vermeiden, werden CFD-Programme (**C**omputational **F**luid **D**ynamics)

zur Simulation von Strömungsvorgängen im Mischungskanal eingesetzt. Auf diese Weise können verschiedenste Mischerelemente auf ihre strömungstechnischen Eigenschaften untersucht werden und die für die Aufgabe am besten geeigneten ausgewählt werden. Die richtige Auslegung des Mischungskanals ermöglicht auch eine gleichmäßigere Verteilung des Ammoniaks am Eintritt in den SCR-Kat [2].

SCR-Katalysator als Bauteil

Die Grundstruktur eines SCR-Katalysators unterscheidet sich eigentlich kaum von der eines anderen Katalysators. Auch hier dient als Trägerstruktur häufig ein extrudierter keramischer Monolith, welcher die katalytischen Schichten aufnimmt. Eine weitere Möglichkeit wäre die Verwendung von metallischen Trägern in unterschiedlichen Formen. Einer der drei gängigsten SCR-Katalysatoren ist der Vanadium-Katalysator. Auf eine Trägerschicht die aus Titandioxid TiO_2 besteht, wird Vanadium-Oxid V_2O_5 in Kombination mit Wolfram-Oxid WO_3 als aktive Komponente aufgetragen. Diese Kombination hat sich im Laufe der Entwicklung besonders aufgrund der hohen Temperaturstabilität und SCR-Aktivität des Systems bewährt. Neben dieser Art von SCR-Katalysatoren existieren Kupfer- und Eisen-Zeolithe. Zeolithe werden in der Regel aus Silizium, Aluminium und Sauerstoff aufgebaut. Aus den genannten Komponenten werden sehr komplexe Gitterstrukturen erzeugt. Durch Einlagerung von edlen Metallen in freie Gitterplätze können die katalytischen Eigenschaften der Zeolithe angepasst werden. Abbildung 2.18 zeigt die Unterschiede der Umsatzraten der verschiedenen Ausführungen über der Temperatur.

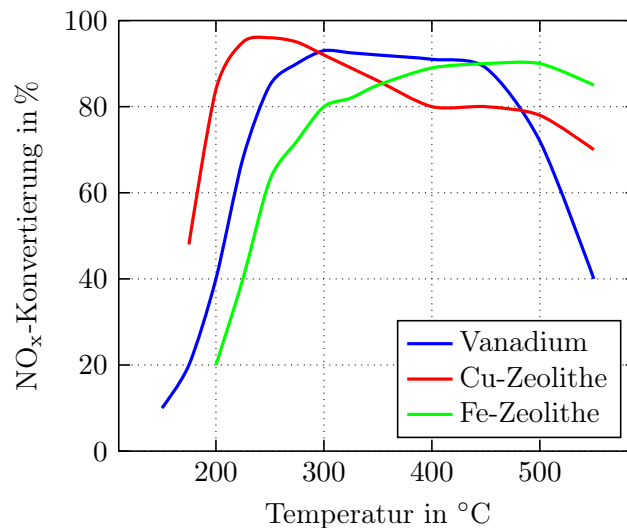


Abbildung 2.18: Einfluss des Katalysatormaterials auf die NO_x -Konvertierung [5]

Man erkennt deutlich den Umsetzungsvorteil des Cu-Zeolithen in Bereichen niedrigerer Temperaturen. Ebenso ist die hohe Temperaturstabilität bzgl. der SCR-Aktivität

des Fe-Zeolithen im Vergleich zu den anderen Varianten deutlich zu sehen. Beide Zeolithe weisen eine weit höhere thermische Bauteilbeständigkeit im Vergleich zum Vanadium-Katalysator auf. Daraus ergibt sich oft eine Einschränkung der Verwendbarkeit von Vanadium-Katalysatoren. Speziell bei der Anordnung des SCR-Katalysators unmittelbar nach einem DPF können die kritischen Temperaturen von über 550 °C vermehrt auftreten. Bei jeder eingeleiteten Regeneration des DPF würde nahezu keine Umsetzung von NO_x stattfinden [5].

Ein anderer Trend führt in Richtung beschichteter DPF, welche auch unter dem Kürzel SCRF (SCR coated DPF) bekannt sind. Der wesentliche Vorteil dieser Ausführung ist die Einsparung von bislang notwendigen Heizstrategien für den, typischerweise weiter vom Motor entfernten, SCR-Katalysator. Jedoch bringt diese neue Variante auch Schwierigkeiten mit sich. Die thermische Stabilität der katalytischen Beschichtung während den Regenerationsphasen des DPF, aber auch die Zusetzung des DPF durch Harnstoff, seien hier als Beispiele angeführt [2].

3 Amminex Ammonia Storage and Dosing System ASDS

Die dänische Firma Amminex beschäftigt sich seit einigen Jahren mit der Entwicklung eines neuen Dosiersystems für SCR-Anlagen. Die Idee ist die Beseitigung aller Nachteile des herkömmlichen Harnstoff-Dosiersystems. In der Theorie sollen damit die Wirkungsgrade von SCR-Anlagen aber auch die Motorwirkungsgrade verbessert werden können. In diesem Kapitel soll ein Überblick über das System von Amminex und dessen Funktionsweise gegeben werden.

3.1 AdAmmine[®] vs. AdBlue[®]

Bei der herkömmlichen SCR-Anlage mit AdBlue hängt der Wirkungsgrad des Systems ganz wesentlich von der Erzeugung des Ammoniaks aus der Harnstoff-Wasser-Lösung ab. Die Umwandlungs- und Erzeugungsreaktionen, die im Vorfeld der eigentlichen SCR-Reaktion ablaufen, bestimmen den möglichen Start der SCR-Reaktion. Wie in Kapitel 2.5 beschrieben, ist der Beginn der SCR-Reaktion stark von der Temperatur abhängig. Die in Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Reaktionen (2.34 und 2.35) benötigen relativ hohe Temperaturen um abzulaufen. Pro Reaktionsschritt wird dabei jeweils ein NH_3 -Molekül erzeugt. In Summe ergibt das für jedes Harnstoffmolekül jeweils zwei Ammoniak-Moleküle.

Um die notwendigen Temperaturen zu erreichen sind relativ lange Zeiten notwendig, in denen ein großer Teil der eingebrachten Kraftstoffenergie für die Heizmaßnahmen verwendet wird. Beginnt man die Dosierung von AdBlue jedoch zu früh, führen unerwünschte Reaktionsabläufe zur Bildung von festen Stoffen, die sich im Abgassystem ablagern, dazu siehe auch Abschnitt 2.5.2. In der Dosierstrategie von AdBlue-SCR-Anlagen wird dieser Effekt dadurch berücksichtigt, dass die Dosierung bei Standardanlagen erst ab 185 °C startet. Eine weitere Tatsache, die die Verwendung von AdBlue insofern ineffizient macht, ist dessen geringe Speicherfähigkeit, bezogen auf NH_3 . Handelsübliches AdBlue, welches als Standardreduktionsmittel momentan in Fahrzeugen eingesetzt wird besteht nur zu einem Drittel ($32,5\%$ (m/m)) aus Harnstoff, der Rest ist Wasser. Durch den großen Wasseranteil im AdBlue ergibt sich effektiv ein nur sehr geringer Massenanteil an Ammoniak in der HWL. Die tatsächlich in AdBlue enthaltene Menge an NH_3 lässt sich entsprechend folgender Formeln berechnen.

$$c_{\text{NH}_3} = \frac{2 \cdot M_{\text{NH}_3}}{M_{(\text{NH}_2)_2\text{CO}}} = \frac{34,06}{60,06} = 56,7\% \text{ (m/m)} \quad (3.1)$$

$$c_{\text{NH}_3} = 56,7\% \text{ (m/m)} \cdot 32,5\% \text{ (m/m)} = 18,4\% \text{ (m/m)} \quad (3.2)$$

Um akzeptable Reichweiten zu erzielen sind daher große Speichervolumen notwendig, welche in weiterer Folge ein entsprechend hohes Zusatzgewicht verursachen. NO_x -Umsatzraten sind aufgrund des oben Genannten vor allem bei Kaltstart und der folgenden Warmlaufphase gar nicht vorhanden. In den Typprüfzyklen von Fahrzeugen entstehen in der Phase des inaktiven SCR-Systems die höchsten NO_x -Emissionen.

Die Überlegung den Schritt der NH_3 -Erzeugung und die damit verbundenen Nachteile zu umgehen war der erste Anreiz zur Entwicklung einer Alternative zum AdBlue. Aufgrund des Gefahrenpotenzials von Ammoniak musste eine neue Methode der Speicherung und Dosierung entwickelt werden, die unter Einhaltung der Sicherheitsanforderungen eine Verwendung von Ammoniak im Fahrzeug möglich macht. Amminex macht mit dem ASDS eine gasförmige NH_3 -Bereitstellung ohne jegliche Umwandlungsprozesse und Sicherheitsrisiken möglich. Schlüsselement dabei ist das so genannte „AdAmmine“.

AdAmmine gehört zur Familie der Metall-Ammine. Metall-Ammine sind keine Neuentdeckung von Amminex. Sie sind schon seit Langem bekannt und deren Eigenschaften und Charakteristiken ausführlich beschrieben. Sie bestehen im Grunde aus wasserfreien Metall-Chloriden welche mit Ammoniak angereichert werden. Für die Herstellung von AdAmmine wird Strontium-Chlorid verwendet. Dieses hat die Eigenschaft, Ammoniak ein- und auszulagern und das nach einer völlig reversiblen chemischen Reaktion laut 3.3.



Der große Vorteil im Vergleich zur HWL ist bereits aus der Reaktionsgleichung zu erkennen. Pro Strontium-Chlorid-Molekül können acht Ammoniak-Moleküle eingespeichert werden. Des Weiteren liegen diese, wie gewollt, unverändert in ihrer ursprünglichen Form vor. Die ersten sieben Ammoniak-Moleküle können bereits ab Temperaturen von 100°C desorbiert werden. Das verbleibende Molekül wird erst ab 200°C ausgelagert. Somit bietet AdAmmine bereits bei 100°C einen NH_3 -Massenanteil von $40,4\%$. Die Berechnung kann wie folgt ausgeführt werden:

$$c_{\text{NH}_3} = \frac{7 \cdot M_{\text{NH}_3}}{M_{\text{Sr}(\text{NH}_3)_8\text{Cl}_2}} = \frac{119,22}{294,78} = 40,4\% \text{ (m/m)} \quad (3.4)$$

Um die maximale Speicherkapazität des Salzes zu erreichen, wird das Pulver in Blöcke gepresst. Die kompakten Blöcke können nach der Komprimierung deutlich mehr Ammoniak aufnehmen als das Pulver in ursprünglicher Form. In den Blöcken bilden sich bei der Desorption von NH_3 kleine Poren im Nanobereich. Diese dienen dann als

Art Tunnel für die NH_3 -Moleküle und die Einlagerung und Auslagerung wird dadurch wesentlich erleichtert. Auf diese Weise haben die geometrischen Abmessungen der Blöcke keinen Einfluss auf die Geschwindigkeiten der Transportprozesse. Diese Tatsache ist gar nicht unwesentlich, wenn man daran denkt, dass auch ein geringer Zeitverzug beim Beginn der SCR-Reaktion immense Auswirkungen auf die Abgaswerte hat.

3.2 ASDS Aufbau

Das ASDS wird für verschiedene Fahrzeugklassen und Fahrzeuggrößen vorgesehen. Die Größe des Systems kann dadurch stark variieren. Der prinzipielle Aufbau ändert sich dadurch jedoch nicht. Das System besteht immer aus fünf wesentlichen Bauteilen:

- zwei Hauptkartuschen (**M**ain **U**nits)
- Startkartusche (**S**Tart-Up **U**nit)
- Dosiereinheit (**D**osing **U**nit)
AFM-CVD (Ammonia Flow Manifold-Constant Volume Dosing)
- Steuergerät mit Software (**E**lectronic **C**ontrol **U**nit)

Die Hauptkartuschen dienen als Speicher für das Ammoniak. Aus ihnen wird, wenn das System auf Betriebstemperatur ist, das notwendige NH_3 freigesetzt. Solange die Temperatur in den Hauptkartuschen nicht auf dem notwendigen Niveau angelangt ist, übernimmt die wesentlich kleinere Startkartusche die Bereitstellung von NH_3 . Die Dosiereinheit regelt, die nach Betriebszustand notwendige, NH_3 -Menge. Im Steuergerät werden die entsprechenden Dosierstrategien hinterlegt und alle wichtigen Funktionen überwacht. In Abbildung 3.1 ist eine Variante des ASDS dargestellt.

Je nach Fahrzeug wird das System so konzipiert, dass es an einem dafür vorgesehenen Ort montiert werden kann. Das Aussehen und die Form des Systems variiert mit den Fahrzeugvarianten. In der dargestellten Ausführung wiegt das gesamte System in voll beladenem Zustand zirka 16 kg. Es enthält dabei etwa 3,1 kg nutzbares NH_3 , was einem AdBlue-äquivalent von etwa 15 Litern entspricht. In dieser Größe ist das ASDS für Fahrzeuge geeignet, die im Serienzustand einen AdBlue-Tank mit etwa 10 bis 15 Litern Fassungsvermögen besitzen. Dabei ist zu beachten, dass das AdBlue-System mit dem gleichen Inhalt an Reduktionsmittel, in jedem Fall ein höheres Eigengewicht als das ASDS hat. Das System wird bei laufendem Motor von der Lichtmaschine des Fahrzeugs, mit Strom versorgt und kann dann die gewünschte Menge an NH_3 bereitstellen. Bei der Einstellung der richtigen Menge, muss das ASDS mehrere Schritte durchlaufen.

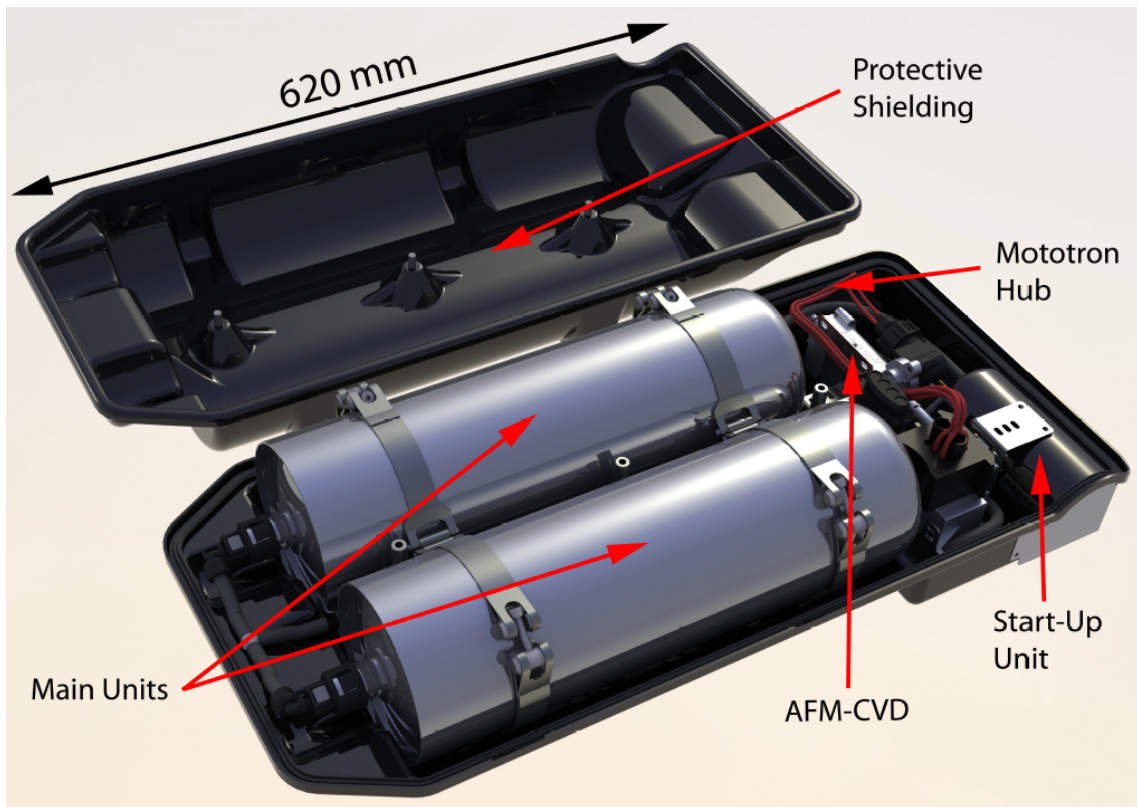


Abbildung 3.1: Aufbau des ASDS mit allen relevanten Komponenten (Version ASDS-1-2012-LD) [Quelle: Amminex]

- (I) Wird die Zündung eingeschaltet, so wird das Steuergerät mit Strom versorgt. Dieses stellt mit Hilfe von Sensoren, an den Kartuschen, die momentanen Temperaturen fest und beginnt wenn notwendig sofort mit der Heizung der STU und der MUs.
- (II) Die Startkartusche hat ein sehr geringes Volumen und reagiert somit sehr schnell auf die Aufheizung. Durch die Freisetzung des Ammoniaks entsteht der notwendige Dosierdruck an der Dosiereinheit AFM-CVD.
- (III) Abhängig von der Motorkonfiguration und dem Betriebszustand wird durch das AFM-CVD die richtige Menge an Ammoniak in das Abgas eingebracht.
- (IV) In der Zwischenzeit haben die Hauptkartuschen (MUs) die Betriebstemperatur erreicht und übernehmen dann den weiteren Betrieb. Auch hier wird der Druck durch die Auslagerung von NH_3 aufgebaut. Während des Betriebs mit den MUs wird auch die aus der STU verbrauchte NH_3 -Menge über eine Verbindung zu den MUs wieder aufgefüllt.

3.3 ASDS-Komponenten und deren Funktionsweise

Die gasförmige Bereitstellung von Ammoniak stellt für mobile Anwendungen eine große Herausforderung dar. Die gesundheitsschädliche bzw. tödliche Wirkung des Ammoniaks erlaubt prinzipiell keine gasförmige Speicherung in Druckbehältern. Die Gefahren der ungewollten Freisetzung von NH_3 durch Leckagen im System, aber auch der Freisetzung großer Mengen bei möglichen Unfällen sollen dadurch eliminiert werden. Der Einsatz von gelöstem Ammoniak erfordert gewisse chemische Reaktionen, welche negative Einflüsse auf den Wirkungsgrad der SCR-Anlage haben. Eine neue Art der Speicherung ist also notwendig um diese Nachteile zu vermeiden. Amminex bietet mit dem ASDS eine völlig neue Möglichkeit in diesem Bereich. Die Erklärung der Komponenten und deren Funktionsweise soll beispielhaft an der Version ASDS-1-2012-LD aus Abbildung 3.1 erfolgen. Die Funktionsweise bleibt für alle Ausführungen des ASDS die selbe, lediglich die geometrischen Abmessungen, die Anordnung der Komponenten und die Form des Komponententrägers werden dem jeweiligen Einsatzbereich angepasst.

3.3.1 Hauptkartuschen (Main Units)

Amminex verwendet für das ASDS spezielle Kartuschen zur Speicherung von NH_3 . Die Kartuschen werden aus 1 mm dickem Stahlblech aufgebaut. Sie enthalten das bereits beschriebene AdAmmine, mit seiner Fähigkeit, Ammoniak chemisch zu binden. In gepresster Form kann AdAmmine ungefähr 450 g Ammoniak pro Liter Volumen aufnehmen. Jede der beiden Kartuschen des ASDS-1-2012-LD hat ein Volumen von 3,6 Liter und wiegt in vollgeladenem Zustand 5,6 Kilogramm. Davon sind 1620 Gramm, eingelagertes NH_3 . Für die chemischen Prozesse mit NO_x können nur 1500 Gramm des gebundenen Ammoniaks verwendet werden, da ab einem gewissen Punkt der notwendige Dosierdruck nicht mehr aufrechtgehalten werden kann.

Das Salz wird in die jeweilige Kartusche gesetzt und diese wird permanent verschlossen. Durch die permanente Verschließung wird die Manipulation am Produkt nicht ermöglicht und auch die Dichtheit gewährleistet. Ein Zugang zum Innenleben der Kartuschen ist aufgrund der nahezu unbegrenzten Lebensdauer auch nicht notwendig. Die Funktion des AdAmmine ist völlig unabhängig von der Einsatzzeit und der Anzahl der Entladungs- und Beladungszyklen. Über eine Schnellverschlusskupplung können die Kartuschen somit mehrere hundert Mal befüllt und entleert werden. Die Schnellverschlusskupplung beinhaltet gleichzeitig ein Sicherheitsventil. Dieses sperrt den Massenfluss aus der Kartusche, wenn keine Leitung mit dem passenden Gegenstück angeschlossen ist. Die Kartuschen werden zur Beladung, unter Druck, mit NH_3 beaufschlagt.

Das Salz bindet Ammoniak bei Umgebungstemperatur ohne dieses chemisch zu verändern. Unter normalen Temperaturbedingungen bleibt das Ammoniak im Salz gebunden und kann nicht mehr aus den Kartuschen entweichen. Das bedeutet dass auch bei einer Zerstörung der Kartuschen, kein Ammoniak entweichen würde. Aus diesem

Grund wurden die Kartuschen von den United Nations als ungefährlich eingestuft und gelten als eine sichere Transportmöglichkeit für NH_3 .

Um das chemisch gebundene Ammoniak wieder frei zu setzen, sind Temperaturen ab 80°C notwendig. Die Kartuschen werden zu diesem Zweck elektrisch, über den Kontakt mit zwei Heizmatten und einer Heizleistung von 250 Watt, geheizt. Die Wärmeleiteigenschaften des Salzes sind leider sehr schlecht. Um dennoch einen guten Wärmeeintrag in das Material zu erreichen, müssen Materialien mit guten Wärmeleiteigenschaften in den Salzblock eingebracht werden. In den aktuellen ASDS-Varianten wird dazu eine dünne Aluminiumfolie verwendet. Die Alufolie wird um kugelförmige AdAmmine-Pakete, in der Regel mit einem Durchmesser von 110 mm, gewickelt. Diese sogenannten Pre-Packs werden folglich mit einem Druck von ungefähr 120 Tonnen in die Kartuschen gepresst und füllen somit alle vorhandenen Freiräume aus. Eine volle Kartusche bei zirka 20°C kann innerhalb von 600 Sekunden voll aufgeheizt werden und dadurch den notwendigen Dosierdruck von 3 bar bereitstellen. Bei einer halbvollen Kartusche ist dafür bereits eine Zeit von ungefähr 1300 Sekunden notwendig.

3.3.2 Startkartusche (Start-Up Unit)

Die STU ist im Grunde ebenfalls eine Kartusche, jedoch in deutlich kleinerer Ausführung. Sie besteht aus einem 2 mm dicken Stahlmantel, welcher das Strontiumchlorid umgibt. Auch diese Einheit verfügt über einen Schnellverschlusskupplung mit Sicherheitsventil. Der wesentliche Unterschied, abgesehen von der Größe, ist die Art der Heizung. Die STU wird nicht von außen geheizt wie die MUs sondern enthält ein zylindrisches Heizelement, welches durch die Mitte der Kartusche verläuft. Als Heizelement wird ein PTC-Widerstand (**p**ositive **t**emperature **c**oefficient) eingesetzt mit einer Heizleistung von 200 Watt bei 12 Volt Versorgungsspannung. PTC-Materialien haben die Eigenschaft, dass deren elektrischer Widerstandswert mit der Temperatur steigt. Für die STU ist genau dieses Verhalten von großer Bedeutung. Durch das PTC-Prinzip kann das verwendete Heizelement in der STU keine Überhitzung verursachen. Dadurch, dass der Widerstand des Heizelements überproportional mit der Temperatur ansteigt, wird der Widerstand ab einer bestimmten Temperatur zu groß für eine weitere Temperaturerhöhung.

Die STU hat ein Volumen von 270 ml, kann 130 g NH_3 aufnehmen, von dem 115 g effektiv nutzbar sind. Insgesamt wiegt die Starteinheit ungefähr 1,23 kg. Durch das deutlich kleinere Volumen der STU im Vergleich zu der MU, resultiert eine viel geringere thermische Trägheit. Durch das schnelle Aufheizen ist das Erreichen des Dosierdrucks bereits nach 100 Sekunden möglich, wenn eine volle STU und 20°C Starttemperatur vorherrschen.

Da auch hier das selbe Salz wie in den MUs zum Einsatz kommt, herrschen auch hier schlechte Wärmeleiteigenschaften. Zu deren Verbesserung wird erneut Aluminium eingesetzt. Hier werden kleine Aluschalen mit reinem, dehydriertem, ungesättigtem Salz gefüllt und vorsichtig um das Heizelement positioniert. Danach wird das Gehäuse

verschweißt und eine Sättigung des Salzes mit Ammoniak kann beginnen. Das Salz dehnt sich dabei aus, füllt nahezu alle freien Räume aus und entfaltet dabei sein volles Speicherpotenzial. Abbildung 3.2 zeigt die STU, wie sie im ASDS-1-2012-LD eingesetzt wird.

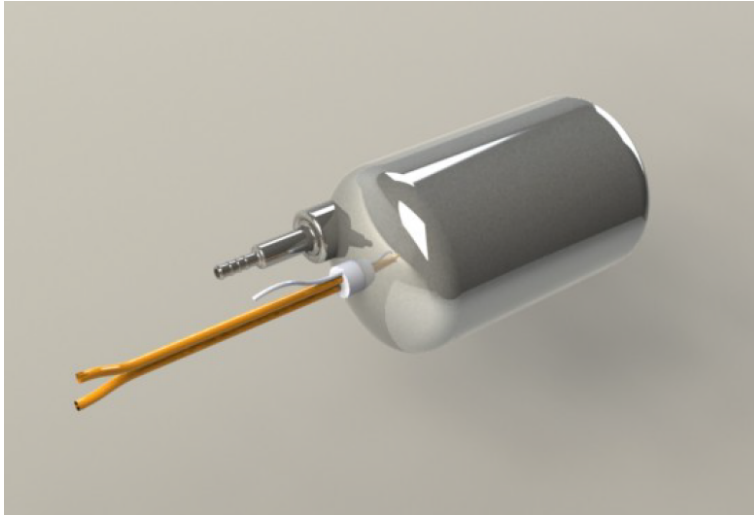


Abbildung 3.2: Aktuell im Einsatz befindliche Start-Up-Unit [Quelle: Amminex]

3.3.3 Dosiereinheit (DU) AFM-CVD

Die Dosiereinheit ist eine patentierte Schlüsselkomponente des ASDS. Sie dient als Verbindung zwischen den MUs, der STU und dem SCR-System im Abgasstrang. Das in Abbildung 3.3 dargestellte Bauteil ist primär zuständig für die korrekte und zuverlässige Bestimmung der Menge von Ammoniak, welche aus dem ASDS herausströmt. Mittels eines aufwendigen Algorithmus, welcher in dem Steuergerät des ASDS hinterlegt ist, regelt das AFM-CVD den Ammoniakfluss entsprechend der benötigten Menge, welche auf Basis von Signalen aus der Motorsteuerung und aus der Abgasanlage bestimmt wird. Der genaue Mengendurchfluss wird durch das Prinzip der konstanten Volumendosierung (CVD) geregelt.

Das AFM-CVD besteht aus einem definierten Volumen, zwei sehr schnellen elektrischen Ventilen, einem Temperatursensor und einem Drucksensor welche sich in dem definierten Volumen befinden. Durch kurzzeitiges Öffnen des Einlassventils findet ein Druckausgleich zwischen der aktiven Kartusche und dem definierten Volumen in der DU statt. Der Drucksensor gibt dann ein Signal entsprechend dem herrschenden Druck aus. Zugleich wird die Temperatur im Volumen bestimmt. In Kombination mit der bekannten Volumengröße dienen diese Signale als Berechnungsgrundlage für die im Volumen befindliche Menge an Ammoniak. Wenn das Auslassventil öffnet kann nur diese definierte Menge in das Abgassystem gelangen. Das AFM-CVD arbeitet sehr schnell und

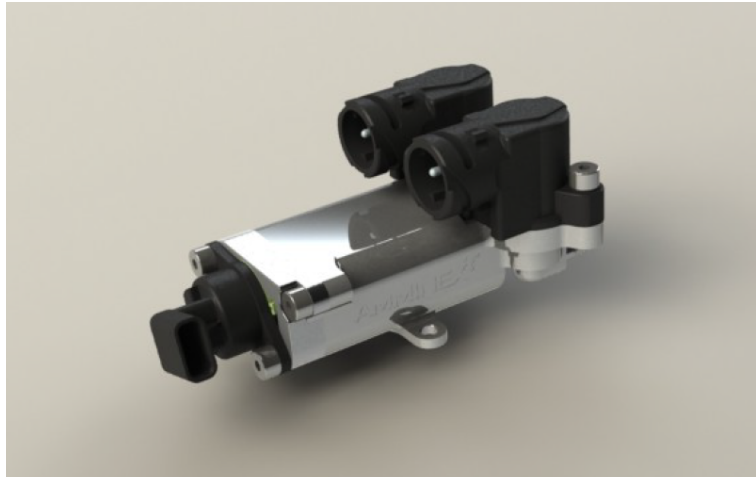


Abbildung 3.3: Aktuelle Version des AFM-CVD 1000 [Quelle: Amminex]

kann diesen Vorgang mehrmals pro Sekunde wiederholen. Auf diese Weise wird, passend zum Betriebszustand des Motors und den daraus resultierenden NO_x -Emissionen, immer die exakt passende Menge an NH_3 in den Abgasstrang eingebracht.

3.3.4 Steuergerät (ECU) und Software

Da sich das ASDS noch in der Entwicklungsphase befindet, besitzt es zur Zeit noch ein eigenes Steuergerät, welches einen autarken Betrieb des Systems erlaubt. Eingesetzt wird ein Mototron-Modell. Bei der Implementierung des ASDS in ein Fahrzeug ergeben sich mehrere Möglichkeiten dieses zu steuern. In der Regel würde dabei die Software auf ein bereits vorhandenes Steuergerät des Fahrzeugs installiert (vorzugsweise Motorsteuergerät). In den aktuellen Ausführungen des ASDS dient die ECU zur Übersetzung der Signale aus der Motorsteuerung auf ASDS-Signale. Die ECU ist in der Lage mit dem Motorsteuergerät zu kommunizieren. Dadurch kann sie alle für das ASDS notwendigen Signale, die im Motorsteuergerät ankommen, interpretieren und für die Steuerung des Systems verwenden. Wichtige Parameter sind unter Anderem, Temperaturen von Motor, Umgebung und Abgassystem, Klappenstellungen, Informationen über Kraftstoffeinspritzung, Turbolader und ganz besonders die NO_x -Konzentration im Abgas. Die gewonnenen Informationen dienen für die Steuerung der Heizstrategien und somit den Druckaufbau in den Kartuschen, aber auch für die Ansteuerung der Ventile des AFM-CVD.

4 Experimenteller Aufbau

4.1 Prüfstands-aufbau

Abbildung 4.1 zeigt den Aufbau des Versuchsträgers am Prüfstand. Motor und Asynchronmaschine wurden auf entsprechenden Stehern exakt auf einander ausgerichtet und über eine elastische Zwischenwelle verbunden. Die Konditionierung der Ladeluft erfolgte über die Haustechnik mit einem geeigneten Wärmeübertrager. Ebenso wurden der Kühlwasserkreislauf und der Kraftstoffkreislauf über die Haustechnik konditioniert. Mit einer Leitung vom Zuluftschacht zum Luftfilterkasten des Motors sollte verhindert werden, dass der Motor die zeitweise sehr warme Luft in der Motorumgebung ansaugt. So wurden über den Tag und die Dauer des Projekts annähernd die selben Randbedingungen geboten.

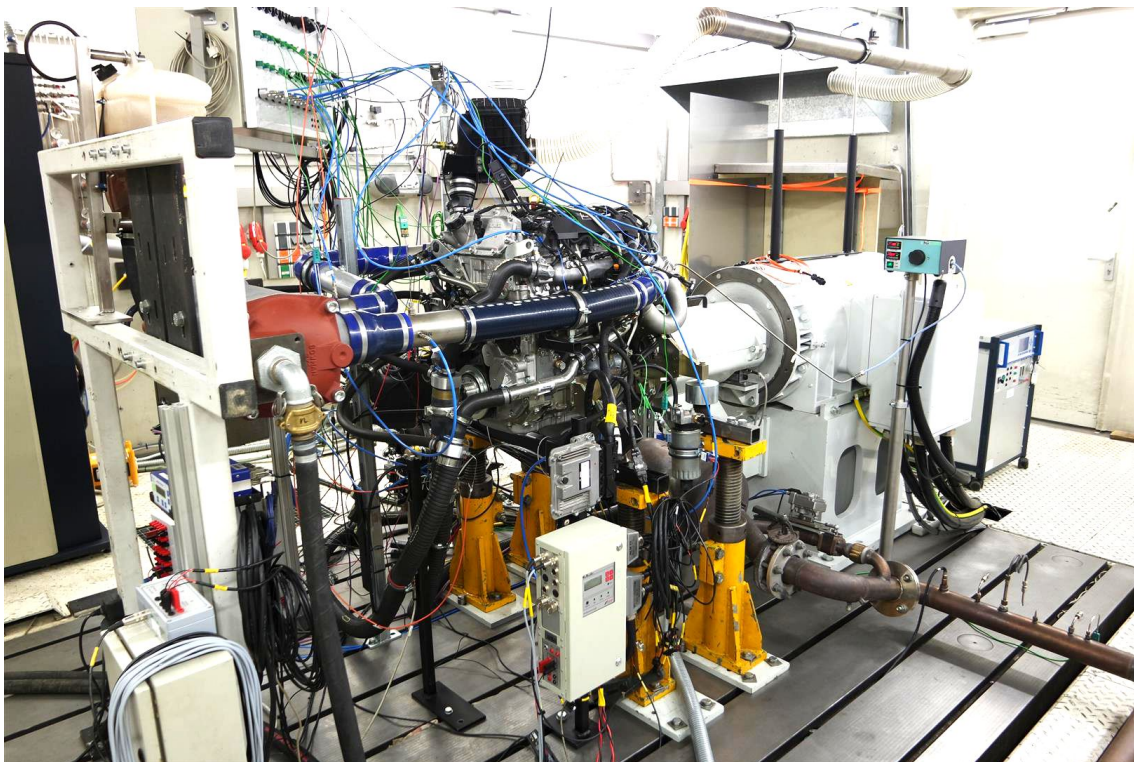


Abbildung 4.1: Motor und Belastungsmaschine

4.1.1 Motordaten

Der für die Experimente verwendete Motor wurde von Fiat Powertrain zur Verfügung gestellt. Dabei handelt es sich um einen Dieselmotor, der seine Anwendung in leichten Nutzfahrzeugen findet. Unter der Motorbezeichnung F1C wird der Motor in den Fahrzeugen verschiedener Hersteller wie Mitsubishi, IVECO und natürlich Fiat eingesetzt.

Der Motor ist als Reihen-4-Zylinder ausgeführt und besitzt einen Hubraum von insgesamt 2998,6 Kubikzentimetern. Dieser kommt durch die Kombination von 95,8 mm Bohrungsdurchmesser mit einem Hub von 104 mm zustande. Aus den geometrischen Abmessungen ergibt sich ein Verdichtungsverhältnis von 17,6. Der Motor wird in zwei Leistungsstufen ausgeliefert, einmal mit 129 kW und einmal mit 81 kW maximaler Leistung. Tabelle 4.1 zeigt einen kleinen Überblick über die wichtigsten Daten des Motors. Beide Varianten erfüllen die Emissionsstandards der Euro-VI-Norm.

Tabelle 4.1: Motordaten

Parameter	Einheit	Leistungs- stufe 1	Leistungs- stufe 2
Allgemeine Daten			
Abgasnorm	–	EURO VI	
Bauform	–	Reihe	
Zylinderanzahl	–	4	
Ventile pro Zylinder	–	4	
Bohrung	mm	95.8	
Hub	mm	104	
Hubraum ges.	ccm	2998.6	
Verdichtungsverhältnis	–	17.6	
Einspritzsystem	–	Common Rail	
Turbolader	–	Variable Turbinengeometrie	
Leistungsdaten			
max. Leistung	kW/PS	81/110	129/175
bei	min ⁻¹	3500	3500
max. Drehmoment	Nm	260	430
bei	min ⁻¹	1200	1600
Spitzendruck	bar	160	140

Im Rahmen dieses Projekts dient der Motor in erster Linie als „Emissionsspender“. Dabei ist vor allem die Emission von Stickoxiden von Bedeutung. Der Motor verwendet serienmäßig zur Einhaltung der NO_x-Emissionen die Kombination aus gekühlter Abgasrückführung und selektiver katalytischer Reduktion. Als Reduktionsmittel wird AdBlue verwendet.

4.1.2 Abgasanlage

Die Abgasanlage des Motors ist nach dem Schema in Abbildung 4.2 aufgebaut.

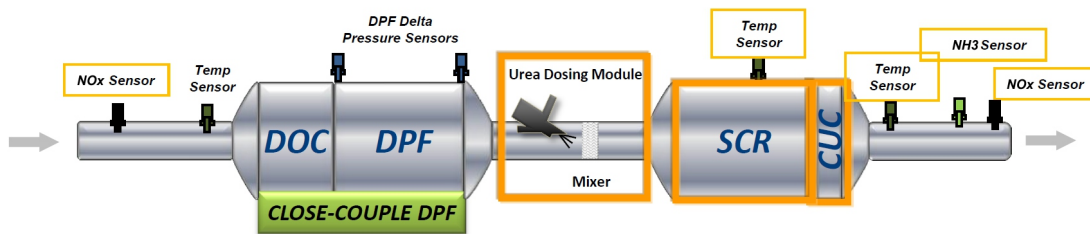


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung des Standard-SCR-Systems des F1C von FPT [Quelle: FPT]

DOC und DPF sind, entsprechend dem Serienstand, baulich in einer Einheit zusammengefasst. Unmittelbar darauf folgt die Dosierstelle für die HWL und das Mischungsrohr mit integrierten Mischereinheiten. Das HWL-Abgasgemisch gelangt in weiterer Folge in den SCR-Katalysator. Dem Katalysator ist ein weiterer Katalysator (CUC) zur Reinigung des Abgases von NH_3 nachgeschaltet. Eine Reihe von Sensoren dient der Erfassung aller, für den Betrieb, relevanten Informationen. Die Temperatursensoren vor und nach SCR-Kat werden z. B. zur Bestimmung des richtigen Startzeitpunktes für die Dosierung von AdBlue herangezogen. NO_x -Sensoren dienen der Überwachung der Konvertierungsrate der Stickoxide, während der NH_3 -Sensor einen NH_3 -Schlupf erkennen soll. Basierend auf den Signalen der Sensoren kann die Dosierstrategie und die Dosiermenge entsprechend angepasst werden.

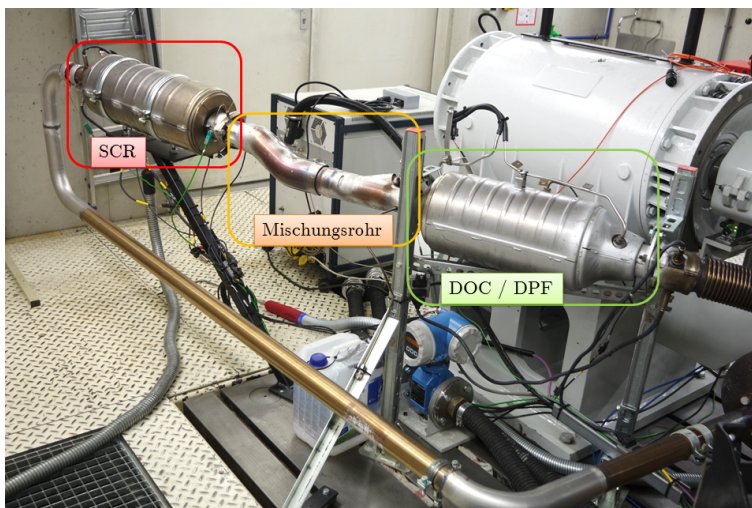


Abbildung 4.3: Abgasanlage am Prüfstand

Am Prüfstand sah der Aufbau, wie in Abbildung 4.3 dargestellt, aus. Die Länge der Abgasanlage ist typisch für Nutzfahrzeuge. Durch den Einbau entlang des Unterbodens des Fahrzeugs ist auch im Fahrzeug genügend Platz geboten. Um die Vibrationen des Motors nicht in vollem Umfang auf die Abgasanlage zu übertragen, wurde das Verbindungsstück flexibel ausgeführt. Daran wurde der DOC/DPF befestigt. An diesen wurden anschließend das Mischungsrohr und dann der SCR-Katalysator angebracht. Die Dosierstellen für AdBlue und NH_3 befinden sich zwischen DOC/DPF und dem Mischungsrohr. Diese werden in späteren Abbildungen näher gezeigt. Die Verbindung zur Abgasanlage der Haustechnik fiel aufgrund der weit über das Fundament hinausragenden Abgasanlage des Motors, sehr lang aus. Allerdings hat dies auf die Durchführung und die Ergebnisse keine Auswirkungen.

4.1.3 Motorprüfstand

Nutzfahrzeugmotoren werden bei der gesetzlichen Zulassungsprüfung immer unabhängig vom Fahrzeug untersucht. Der betrachtete Motor muss dabei innerhalb der Grenzwerte für die gesetzlich limitierten Abgaskomponenten liegen. Diese werden für verschiedenen Prüfzyklen festgelegt. Die Zyklen umfassen sowohl stationäre als auch instationäre Fahrbetriebe, weshalb ein dynamisch betreibbarer Motorenprüfstand notwendig ist.

Ein solcher Prüfstand wurde auch für die experimentellen Untersuchungen im Rahmen dieses Projekts verwendet. Der Prüfstand besteht im Grunde aus vier Komponentengruppen. Die baulichen Komponenten beinhalten die einzelnen Räume, und mechanischen Aufbauten, die jeder Motorenprüfstand besitzen muss. Der Motorprüfstand ist immer in zwei Räume aufgeteilt, den Beobachtungsraum und die Prüfzelle. In der Prüfzelle werden Motor und Belastungsmaschine auf einem vom Gebäude entkoppelten Fundament aufgebaut. Ein solches Fundament ist notwendig, damit die erzeugten Schwingungen während dem Betrieb nicht auf das Gebäude übertragen werden. Die Abgase des Motors müssen natürlich aus der Prüfzelle abgeführt werden, was über eine geeignete Abgasanlage bewerkstelligt wird. Der Prüfraum muss während dem Betrieb be- und entlüftet werden. Dadurch werden Wärme oder unerwünschte Gase, die durch Leckagen entstehen könnten, aus der Prüfzelle abgeführt und frische Luft zugeführt. Motor und Leistungsbremse werden über eine elastische Zwischenwelle miteinander verbunden. Dabei müssen sie zueinander so ausgerichtet werden, dass die Wellen beider Aggregate keinen Achsversatz zueinander haben. Zur leichteren Einstellung werden Montagerahmen verwendet, die diese genaue Justierung ermöglichen.

Die vom Motor benötigten Betriebsmedien müssen über die Haustechnik konditioniert werden können. Im Prüfbetrieb hat man so einen viel größeren Spielraum bei der Einstellung und Regelung von Temperaturen. Konditioniert werden typischerweise Kühlmittel und Kraftstoff sowie ggf. Motoröl. Alle relevanten Daten die in der Prüfzelle erfasst werden, werden in Echtzeit vom Prüfstandsautomatisierungssystem dargestellt. Die verbauten Sensoren werden am Messgalgen angeschlossen welcher die Signale direkt zur Prüfstandssoftware weiterleitet. Sind im Messgalgen auch Ausgänge implementiert,

können auch Steuerungssignale von der Prüfstandssoftware zum Motor gesendet werden. Ein Beispiel dafür ist die Einspeisung des Fahrpedalsignals in das Steuergerät des Motors.

Die Dynamik des Motorenprüfstands hängt von der Belastungsmaschine ab. Dynamische Fahrprofile lassen sich am besten mit Asynchronmaschinen nachbilden. Solche Maschinen müssen sehr robust und passend für die Motorleistung ausgelegt sein. Im dynamischen Betrieb werden Fahrzeugmasse, Fahrwiderstände und Drehzahlanhebungen bei Schaltvorgängen von der Belastungsmaschine nachgebildet.

4.1.4 SCR-Anlagen

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Anlagen war das veränderte Speicher-Dosier-System. Da die Funktionsweisen der Anlagen schon im Vorfeld in den Abschnitten 2.5 und 3 besprochen wurden, soll hier nicht weiter darauf eingegangen werden. An dieser Stelle soll lediglich der reale Aufbau am Prüfstand in Form von Bildern gezeigt werden. Abbildung 4.4 zeigt den SCR-Katalysator im Abgasstrang. Dieser wurde für beide Anlagen verwendet. Auf diese Weise sollte sichergestellt werden, dass die Unterschiede zwischen den Systemen nicht durch den Katalysator selbst verursacht werden. Etwaige Vor- bzw. Nachteile sollten somit rein auf die Speicher-Dosier-Einheit zurückgeführt werden können.



Abbildung 4.4: SCR-Katalysator im Abgasstrang

Die nachstehende Abbildung 4.5 zeigt die Dosierstellen der beiden Systeme. Diese entstanden während gerade das ASDS in Verwendung war. Aus diesem Grund ist hier kein AdBlue-Dosierventil zu sehen, stattdessen ist die Dosierstelle verschlossen. Der Einbaubereich des AdBlue-Dosers ist rot markiert. Der Umbau zwischen den Systemen gestaltete sich relativ einfach. Da alles bereits für das AdBlue-System vorbereitet war,

musste lediglich noch ein Platz für die Dosierleitung des ASDS gefunden werden. Um für beide Systeme ähnliche Verhältnisse zu gewährleisten, wurde versucht die Dosierstelle in der Nähe jener, des AdBlue-Systems zu positionieren. Auf diese Weise sollten für beide Anlagen die gleichen Mischungslängen realisiert werden.

Das ASDS besitzt an der Dosierstelle kein Ventil und hat somit an dieser Stelle auch deutlich geringere geometrische Abmessungen im Vergleich zum AdBlue-System. In Abbildung 4.6 sind AdBlue-Dosierventil und ASDS-Dosierleitung im Vergleich dargestellt.

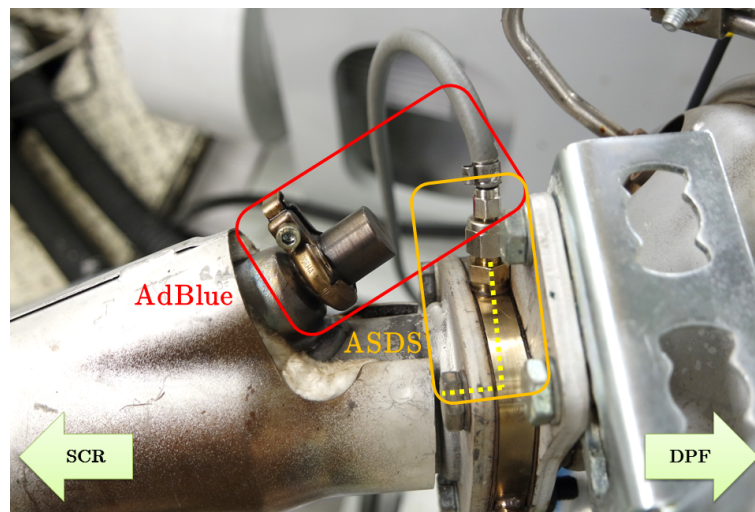


Abbildung 4.5: Dosierventil für AdBlue und ASDS

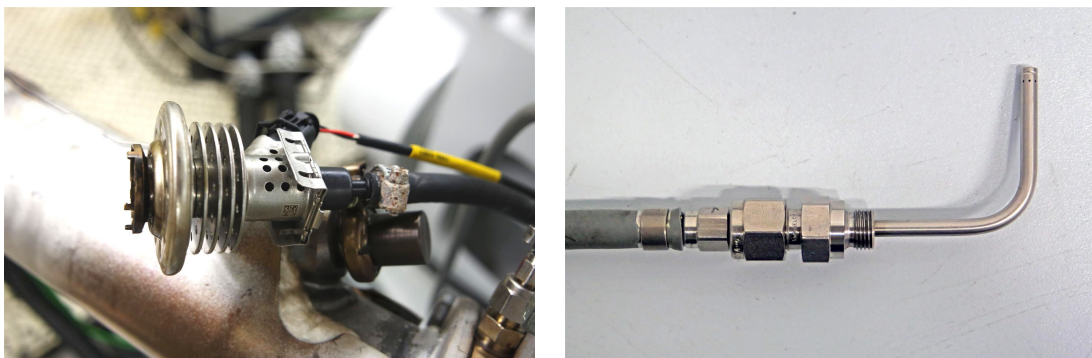


Abbildung 4.6: AdBlue-Dosierventil links; ASDS-Dosierleitung rechts

Das Dosierventil der AdBlue-Anlage muss im Betrieb mit Strom versorgt und gekühlt werden. Das führt unweigerlich zu einer eher sperrigen Ausführung. Für die Eindosierung des gasförmigen NH_3 mit dem ASDS, reicht ein kurzes, am freien Ende verschlossenes, Röhrchen mit einigen Bohrungen am verschlossenen Ende.

Wegen der geringen Abmessungen der ASDS-Dosierleitung, konnte sie nahezu direkt an der selben Stelle positioniert werden, wie der AdBlue-Doser. Zu diesem Zweck wurde eine passende Verschraubung an einem Zwischenflansch angebracht und dieser am Beginn des Mischungskanals montiert. Die L-Form (in Abbildung 4.6 rechts ersichtlich) und die feinen Bohrungen der Dosierleitung haben den Zweck, das NH_3 möglichst gleichmäßig und in Stromrichtung in das Abgas einzubringen. Der Einbau erfolgt daher so, dass das verschlossene Ende mit den feinen Bohrungen in Richtung des SCR-Katalysators zeigt.

4.1.5 Messtechnik

Zur Überwachung und auch zur späteren Auswertung der Zyklen, wurden am aufgebauten Motor und Abgassystem einige Messstellen appliziert. Größtenteils wurden an ausgewählten Positionen, Druck und Temperatur erfasst. Um die Bewertung der Abgase durchführen zu können, sind des Weiteren Abgasentnahmestellen vorbereitet worden, wo die Entnahmeleitungen der Abgasanalyseeinheit angebracht wurden. Abbildung 4.7 zeigt die gewählten Messstellen für den F1C.

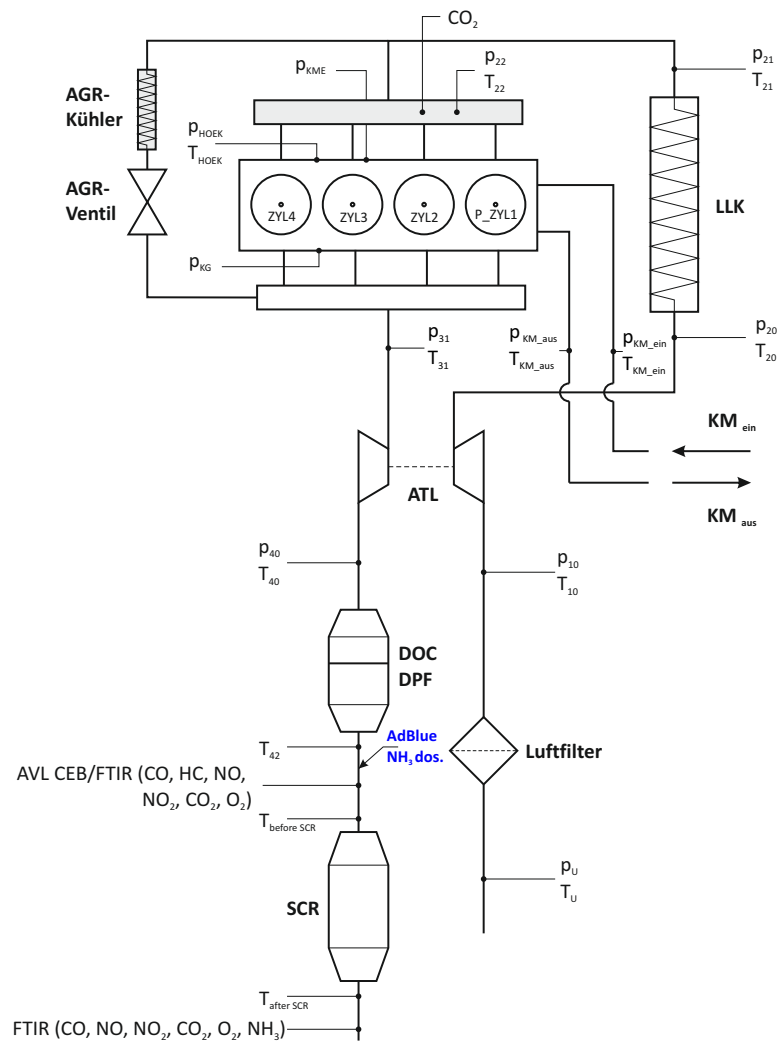


Abbildung 4.7: Messstellen im Aufbau

Die abgekürzten Bezeichnungen der gemessenen Größen sollen in Tabelle 4.2 genauer beschrieben werden.

Tabelle 4.2: Beschreibung der Messstellen

Bezeichnung	Messgröße
M_e	effektives Drehmoment
n	Drehzahl
m_B	Brennstoffmasse
m_L	Luftmasse
λ	Luftverhältnis
T_U	Temperatur der angesaugten Umgebungsluft
T_{10}	Temperatur vor Verdichter
T_{20}	Temperatur vor Ladeluftkühler
T_{21}	Temperatur nach Ladeluftkühler
T_{22}	Temperatur im Saugrohr
T_{31}	Temperatur vor Turbine
T_{40}	Temperatur nach Turbine
T_{42}	Temperatur nach DPF
T_{HOEK}	Temperatur im Hauptölkanal
$T_{\text{before SCR}}$	Temperatur vor SCR-Kat
$T_{\text{after SCR}}$	Temperatur nach SCR-Kat
T_{KM_ein}	Temperatur des Kühlmittels am Motoreintritt
T_{KM_aus}	Temperatur des Kühlmittels am Motoraustritt
p_U	Druck der angesaugten Umgebungsluft
p_{10}	Druck vor Verdichter
p_{20}	Druck vor Ladeluftkühler
p_{21}	Druck nach Ladeluftkühler
p_{22}	Druck im Saugrohr
p_{31}	Druck vor Turbine
p_{40}	Druck nach Turbine
p_{KME}	Kühlmitteldruck direkt am Motoreintritt
p_{HOEK}	Druck im Hauptölkanal
p_{KG}	Druck im Kurbelgehäuse
p_{KM_ein}	Kühlmitteldruck am Motoreintritt
p_{KM_aus}	Kühlmitteldruck am Motoraustritt
O_2	Sauerstoff
CO	Kohlenmonoxid
CO_2	Kohlendioxid
HC	Kohlenwasserstoffe
NO	Stickstoffmonoxid
NO_2	Stickstoffdioxid
NH_3	Ammoniak

Unabhängig von den speziellen Anforderungen des Projektes, ist es immer von Vorteil, möglichst viele Messgrößen, an möglichst vielen Stellen zu erfassen. Dabei sollte allerdings der notwendige Aufwand der Applikation einer Messstelle, in einem günstigen Verhältnis zum Nutzen der gemessenen Größe stehen. Ebenfalls darf die Veränderung des Versuchsträgers durch das Einbringen einer Messstelle nicht den realen Betrieb stören.

Temperaturen und Drücke

Drücke und Temperaturen im Luft- und Abgaspfad des Motors, werden hauptsächlich zur Einstellung und Kontrolle von geforderten Randbedingungen herangezogen. Besonders Temperaturen sind für die Regelung der Konditioniersysteme von großer Bedeutung und werden daher an sehr vielen Stellen im Aufbau erfasst. Als Beispiel sei hier eine, oft vom Hersteller vorgeschriebene, lastpunktabhängige Temperatur nach dem Ladeluftkühler, angeführt. Hierzu wird oftmals ein gegebenes Temperaturkennfeld hinterlegt, welches dann von der Prüfstandssoftware automatisch, bei der Regelung dieser Temperatur, berücksichtigt wird. Natürlich muss für die erfolgreiche Regelung die momentane Temperatur immer bekannt sein. Wenn es möglich ist, wird zu jeder Temperaturmessstelle, auch immer eine Druckmessstelle appliziert. Über Druck und Temperatur lässt sich somit immer der momentane Zustand des Mediums bestimmen. Temperatur- und Drucksensoren an unterschiedlichsten Stellen, ermöglichen auch die ständige Überwachung der Funktion von Prüfstandskomponenten. Zum Beispiel wird die Konditionierung von Betriebsmedien fast immer von prüfstandseigenen Konditioniereinrichtungen übernommen. Die Reproduzierbarkeit von Ergebnissen ist daher auch nur dann gegeben, wenn diese einwandfrei funktionieren. Abgesehen von der Überwachung sind Drücke und Temperaturen auch wichtig für nachträgliche Auswertungen von Daten. Viele Berechnungen stützen sich auf Temperatur- bzw. Druckwerte. Damit ein Verbrennungsmotor überhaupt so arbeitet wie er soll, benötigt er serienmäßig eine Vielzahl an Messwerten. Die von den Herstellern verbauten Sensoren sollen den richtigen Betrieb sicherstellen. Diese im Steuergerät des Motors ankommenden Signale können natürlich auch am Prüfstand, als Messdaten herangezogen werden. Allerdings ist die Genauigkeit solcher Sensoren ggf. nicht so hoch, da sie oftmals nur der Überwachung dienen. Deshalb sollten, wenn möglich, auch an schon vergebenen Stellen, prüfstandsseitige Sensoren appliziert werden.

Für die Temperaturmessung kommen grundsätzlich zwei Sensortypen in Frage. Je nach Temperaturbereich und Genauigkeitsanforderung werden Thermoelemente oder Widerstandstemperatursensoren (Pt100) eingesetzt. Thermoelemente sind dabei bis zu Temperaturen jenseits der 1000 °C einsetzbar und sind somit die beste Wahl für die heiße Abgasseite eines Motors. Aufgrund ihrer geringeren Masse im Vergleich zu Widerstandstemperatursensoren, sprechen sie auch schneller auf Temperaturänderungen an.

Drücke werden in der Regel durch direkte Aufbringung auf eine Membran mit Dehnmessstreifen (DMS) gemessen. Über Druckleitungen wird der an der Messstelle herrschende Druck auf den Druckaufnehmer übertragen, welcher in weiterer Folge ein, dem anliegenden Druck entsprechendes Stromsignal, üblicherweise 4 bis 20 mA liefert. Die verwendeten Druckaufnehmer sind sehr robust. Sie sind mit allen gängigen Betriebsmedien beaufschlagbar, stoßunempfindlich und arbeiten in einem sehr breiten Temperaturbereich. Deren Berstdruck liegt üblicherweise bei dreifachem Nenndruck.

Bestimmung von NO_x-Emissionen

Die Untersuchung der Abgaszusammensetzung wurde hier nach den Vorgaben der Gesetzgebung durchgeführt. Dazu wurden die von der Gesetzgebung vorgeschriebenen Verfahren verwendet. Die verwendeten Anlagen und deren Funktionsprinzip sollen im Folgenden kurz beschrieben werden. Der Schwerpunkt wird dabei auf die Messung der NO_x-Emissionen gelegt.

Die Messung von Abgaskomponenten an Motoren- oder Fahrzeugprüfständen wird von aufwendigen Analysesystemen durchgeführt. Solche Analysesysteme enthalten in der Regel mehrere Analysatoren, die nach unterschiedlichen Prinzipien, die verschiedene Komponentenkonzentrationen im Abgas bestimmen können. Somit sind sie in der Lage alle wichtigen Bestandteile des Abgases eines Verbrennungsmotors, wie CO, CO₂, HC und NO_x, in Echtzeit zu messen. Da für dieses Projekt hauptsächlich die Stickoxidemissionen von Bedeutung sind, sollen nur die verschiedenen Prinzipien der Stickoxid-Messung genauer erläutert werden.

Zur Messung der NO_x-Emissionen eignet sich das Prinzip der Chemolumineszenz. Chemolumineszenz ist eine Form der Lichtstrahlung, die emittiert wird, wenn ein Atom, oder ein Molekül aus einem energiereichen Zustand in den Grundzustand zurück fällt. In einer Reaktionskammer wird eine Abgasprobe mit Ozon O₃ zusammengeführt. Das Ozon wird für diese Zwecke in einem O₃-Generator aus Sauerstoffmolekülen erzeugt. Die im Abgas enthaltenen NO-Moleküle reagieren mit dem Ozon zu NO₂. Etwa 10 % der entstandenen NO₂-Moleküle befinden sich nach der Reaktion in einem angeregten Zustand, höherer Energie. Beim Zurückfallen in den Grundzustand senden die angeregten Moleküle Licht aus. Dieses kann von geeigneten Photodetektoren erfasst werden. Das Ausmaß der elektromagnetischen Strahlung ist ein direktes Maß für die NO-Konzentration. Der Anteil der Stickoxide, der bereits in Form von NO₂ vorliegt, geht unbeeinflusst aus dem Prozess hervor und kann somit nicht ohne weiteres erfasst werden. Um die gesamte NO_x-Konzentration erfassen zu können, müssen insgesamt zwei Messungen erfolgen. Dabei müssen einmal vor dem **Chemolumineszenz-Detektor (CLD)** alle NO₂-Moleküle zuerst in NO-Moleküle umgewandelt werden. In der Regel passiert dies in einem geeigneten Katalysator. Aus dieser Messung erhält man direkt die Konzentration aller Stickoxide. Die zweite Messung wird ohne Umwandlung von NO₂-Molekülen durchgeführt. Das Resultat ist die Konzentration von NO. Bildet man

num die Differenz zwischen den gemessenen Konzentrationen, so erhält man die Konzentration von NO_2 als Ergebnis [5, 8]. Eine visuelle Darstellung der Vorgänge im CLD soll Abbildung 4.8 zeigen. Für die gesetzliche Typfreigabe eines Motors bzw. eines Fahrzeugs nach EURO VI ist der CLD der einzige Analysator, der für die Bestimmung von NO_x -Emissionen verwendet werden darf [6].

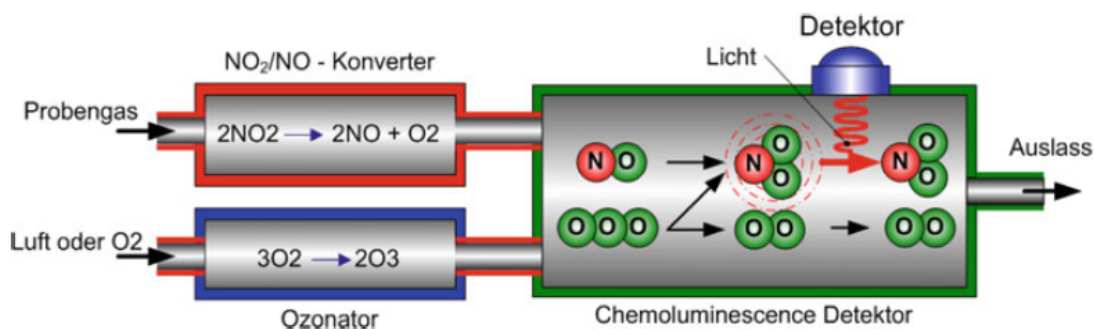


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der Vorgänge im CLD [5]

Ist die Typenfreigabe nicht von Bedeutung so kann für wissenschaftliche Untersuchungen auch das Verfahren der **Fourier Transform Infrarot Spektroskopie (FTIR)** für die Messung von NO_x -Konzentrationen verwendet werden. Der FTIR-Analysator ist prinzipiell in der Lage alle Abgaskomponenten zu messen.

Die Funktionsweise des FTIR basiert auf der Absorption von infrarotem Licht durch die Abgaskomponenten. Ein Interferometer verändert kontinuierlich die Intensität der einzelnen Wellenlängen. Ein Strahlenteiler erzeugt aus einem Infrarotstrahl zwei einzelne Strahlen. Jeder dieser beiden Strahlen fällt auf einen Spiegel. Davon ist einer fest, der andere in Längsrichtung beweglich. Die von den Spiegeln reflektierten Strahlen werden wieder zusammengeführt und erzeugen aufgrund der Längsverschiebung Wellenlängenunterschiede und Interferenzmuster. Je nach Position des beweglichen Spiegels werden gewisse Wellenlängen verstärkt bzw. ausgelöscht. Wird dieser Strahl nun durch die Abgasprobe geschickt, absorbieren die unterschiedlichen Gaskomponenten unterschiedliche Wellenlängen des infraroten Lichts. Ein Infrarotdetektor erfasst die Signale während der Bewegung des Spiegels. Aus den aufgezeichneten Signalen lassen sich Interferogramme ableiten. Das sind zeitlich aufgelöste Infrarotintensitäten [5, 8].

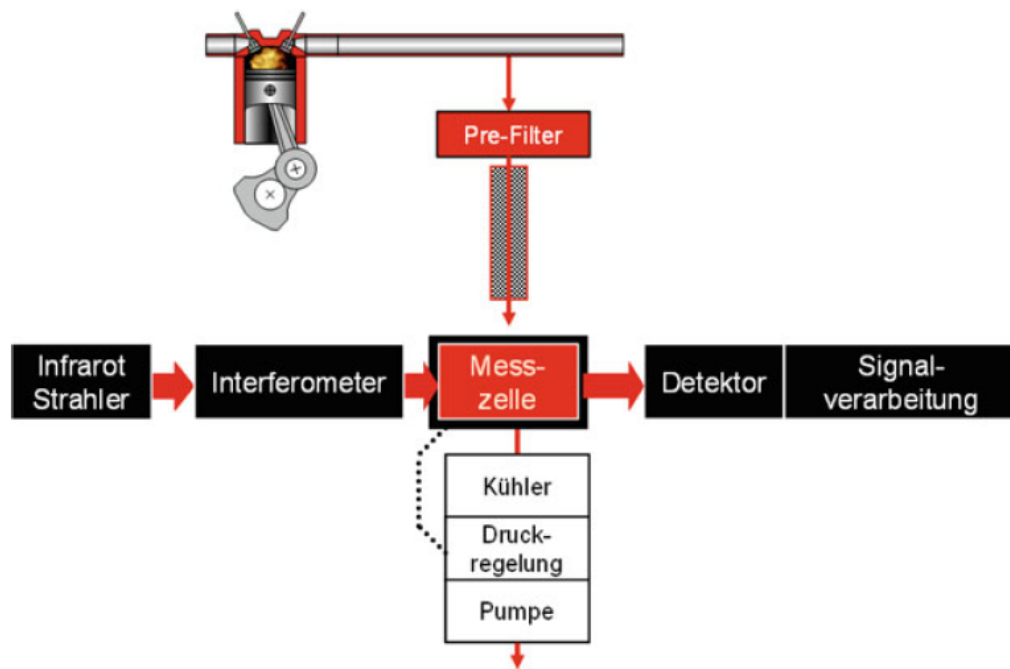


Abbildung 4.9: Schematische Darstellung des FTIR-Systems [5]

Mit Hilfe der Fourier-Transformation lassen sich aus den Interferogrammen, Infrarot-Spektren berechnen. Als Resultat der Berechnung entstehen aus den ursprünglichen Diagrammen, viele Sinuskurven. Frequenzen und Amplituden der Sinuskurven sind ein Maß dafür, welche Komponenten in welchen Konzentrationen vorkommen [5, 8].

5 Messungen am Prüfstand

5.1 Typprüfzyklen

Das verwendete Messprogramm wurde entsprechend der Richtlinien nach UN/ECE R49 aufgebaut. Der gesamte Ablauf der Typprüfung ist dabei fest vom Gesetzgeber vorgegeben. Im Bereich des Nutzfahrzeugs setzt sich die Prüfung aus instationären und stationären Zyklen zusammen, die im Grunde den kompletten Kennfeldbereich des Nutzfahrzeugmotors abdecken (siehe dazu auch Abbildung 2.8).

5.1.1 WHTC

Der World Harmonized Transient Cycle (WHTC) stellt den transienten Teil der Typprüfung eines Nutzfahrzeugmotors dar. Er entsteht aus der sekundlichen Aneinanderreihung von normalisierten Drehzahl- und Drehmomentwerten und nimmt eine Länge von 1800 Sekunden ein. Mit Hilfe der normalisierten Werte wird der Zyklus an das Kennfeld des untersuchten Motors angepasst. Nach einem vorgegebenen Rechenschema bekommt man die tatsächlichen Werte für Drehmoment und Drehzahl und kann diese als Sollwerte für den Zyklus vorgeben. Abbildung 5.1 zeigt die typischen Verläufe von normalisiertem Drehmoment und normalisierter Drehzahl für einen WHTC [6].

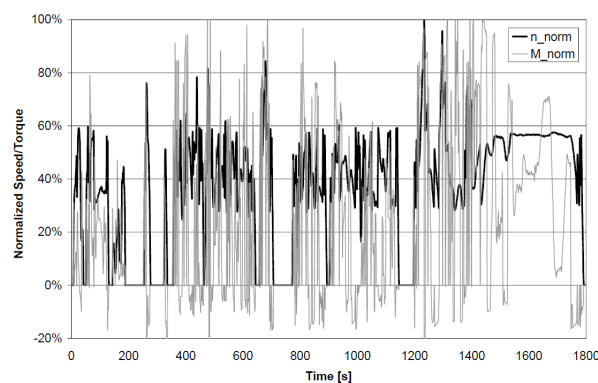


Abbildung 5.1: Normalisiertes Drehmoment und normalisierte Drehzahl aufgetragen über der Zeit für den WHTC [6]

5.1.2 WHSC

Der World Harmonized Stationary Cycle (WHSC) bildet den stationären Teil der Typprüfung eines NFZ-Motors. Er besteht aus 13 Betriebspunkten die wiederum über normalisierte Werte für Drehmoment und Drehzahl an das Leistungskennfeld des untersuchten Motors angepasst werden. Für jeden dieser 13 Betriebspunkte wird eine bestimmte Dauer vorgeschrieben. Tabelle 5.1 zeigt den Aufbau eines WHSC. Der Wechsel von einem „Mode“ zum nächsten soll linear erfolgen und innerhalb von 20 ± 1 Sekunden abgeschlossen sein [6].

Tabelle 5.1: Die 13 Stufen des WHSC [6]

Mode	normalized speed %	normalized torque %	Mode lenght incl. 20 s ramp s
1	0	0	210
2	55	100	50
3	55	25	250
4	55	70	75
5	35	100	50
6	25	25	200
7	45	70	75
8	45	25	150
9	55	50	125
10	75	100	50
11	35	50	200
12	35	25	250
13	0	0	210
Sum			1895

5.1.3 WNTE

Im World Harmonized Not To Exceed (WNTE) Prüfablauf, werden einzelne Punkte aus dem Kennfeld des untersuchten Motors nach bestimmten Kriterien ausgewählt und vermessen. Der zu untersuchende Kennfeldbereich ist dabei exakt definiert. Abbildung 5.2 veranschaulicht den abgegrenzten Bereich (links) des Kennfeldes. Die Abgrenzung des Bereichs ist genau vom Gesetzgeber vorgegeben. Da die genaue Erläuterung des Vorgehens zur Bestimmung des WNTE-Bereichs über den Rahmen dieser Arbeit hinaus gehen würde, sei an dieser Stelle auf [6] verwiesen. Der gezeigte Bereich wird in weiterer Folge in 9 bzw. 12 Zellen unterteilt (siehe Abbildung 5.2 rechts). Jeder dieser Zellen werden dann 5 zufällige Punkte zugewiesen, die zu untersuchen sind. Für jeden Punkt stehen insgesamt 2 Minuten zur Verfügung. Davon sind 20 Sekunden für das Anfahren

des Punktes vorgesehen und die restliche Zeit für die Messung. Die letzten 30 Sekunden jeder Messung werden schließlich für die Auswertung herangezogen [6].

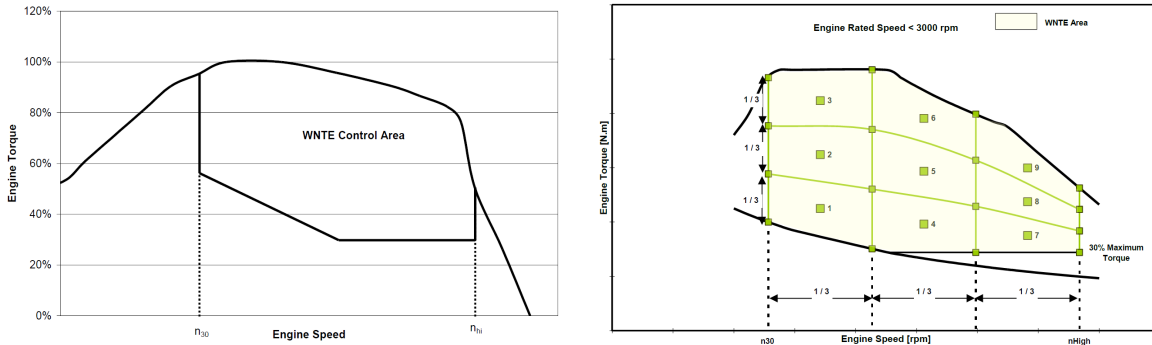


Abbildung 5.2: Ausgewählter Bereich für die Kontrollpunkte des WNTe (links); Unterteilung des Bereichs in Zellen (rechts) [6]

Abbildung 5.3 zeigt die Zeitskala für die Punkte des WNTe, welche für die korrekte Auswertung genau befolgt werden muss.

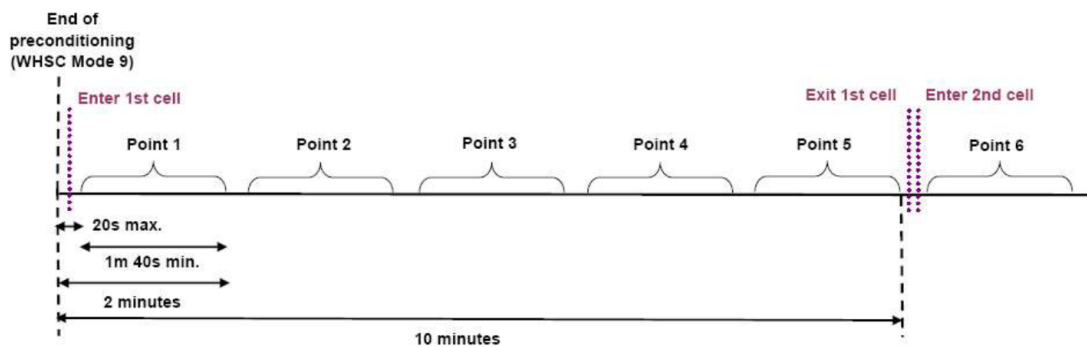


Abbildung 5.3: Zeitskala für die Vermessung der WNTe-Punkte [6]

5.1.4 Prüfablauf nach UN/ECE R49

Bevor die eigentlichen Tests durchgeführt werden, ist es sinnvoll alle Komponenten auf ihre Funktion zu testen. Dazu werden im Vorfeld der Hauptmessungen zuerst einige Testläufe durchgeführt. Es bietet sich auch an ein schnelles, grob aufgelöstes Kennfeld zu erstellen um einen Überblick über das Betriebsverhalten des Motors zu bekommen. Hat man bereits fertige Prüfzyklen zur Verfügung, so können auch diese für erste Probedurchläufe verwendet werden. Sinn und Zweck dieser Probezyklen ist das Aufdecken von Fehlern in der Funktion einzelner Komponenten am Prüfstand. Ein falsches Betriebsverhalten des Motors, falsche Kalibrierung der Abgasmessgeräte und Sensoren aber auch Unstimmigkeiten im Aufbau werden so sofort erkannt. Dabei kann ein

fehlendes Relais bereits einen Notbetrieb des Motors hervorrufen, oder eine defekte Sicherung in der Ladeluft-Konditionieranlage zu erhöhten Temperaturen im Saugrohr führen, was sich in weiterer Folge auf die Emissionen negativ auswirkt.

Nachdem solche Schwierigkeiten behoben sind, wird in der Regel ein vollständiges Motorkennfeld erfasst. Dazu muss der Motor in den jeweiligen Punkten eine gewisse Zeit lang betrieben werden, damit sich die Temperaturen der Betriebsmedien stabilisieren können. Es bietet sich an, das Kennfeld im unteren Betriebsbereich feiner aufzulösen, da hier für den realen Betrieb der wichtigste Bereich liegt und bei vielen Messwerten hier die größten Gradienten auftreten (spezifischer Verbrauch, Reibung, AGR, etc.). Für jedem Punkt werden Drehmoment und Drehzahl vorgegeben. Passend dazu sind dann alle möglichen Messwerte, ob Temperaturen, Drücke oder Abgaskonzentrationen einem bestimmten Punkt im Kennfeld zuordenbar. Falls nicht vorhanden, werden aus dem gewonnenen Kennfeld mit der Anleitung der Gesetzgebung, die zum Motor passenden Typprüfzyklen erstellt. Details zur Gesetzgebung sind in [6] nachzulesen.

Da die Gesetzgebung für Nutzfahrzeugmotoren die Grenzwerte der limitierten Komponenten in g/kWh angibt, ist es notwendig, während jedem Zyklus, den Abgasmassestrom sowie die Konzentrationen der Abgaskomponenten und die vom Motor abgegebene Leistung zu erfassen. Zur Bestimmung der Abgaskomponenten sind mehrere Varianten zulässig. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Emissionen ausschließlich kontinuierlich erfasst. Bei der kontinuierlichen Messung werden die Konzentrationen der relevanten Komponenten gemessen, indem ein Teil des Abgases über eine Entnahmeleitung, direkt zur Abgasanalyse gefördert wird. Aus den Konzentrationen werden mittels molarer Masse und Abgasmassenstrom die Massenströme der einzelnen Komponenten berechnet.

Die Abgasanalyseeinheit ermöglicht erst nach dem Warmlauf eine zuverlässige Messung der einzelnen Abgaskomponenten. Im Warmlauf werden die Analysatoren und Leitungen auf Temperatur gebracht. Heutige Anlagen verfügen in der Regel über eine automatische Kalibrierung, die bei jedem Start der Abgasanalyseanlage durchzuführen ist. Dabei werden die Analysatoren mit Hilfe von Kalibriergasen abgeglichen.

Im Anschluss an die Kennfeldvermessung wurden die Typprüfzyklen gestartet. Begonnen wurde immer mit einem kalten WHTC. Wenn man keine Möglichkeit hat, den Motor aktiv herunter zu kühlen, ist pro Messtag nur ein kalter WHTC fahrbar, da der Motor über Nacht erst wieder voll abkühlen kann. Aus diesem Grund ist es von großer Bedeutung, dass dieser ungestört durchlaufen kann und alle Messsysteme einwandfreie Messdaten liefern. Ein Start gilt nur dann als kalt, wenn in allen Bereichen des Motors und Abgassystems, Temperaturen zwischen 20 und 30 °C herrschen. Nachdem der kalt gestartete WHTC vollständig durchlaufen wurde, muss der Motor unmittelbar für den folgenden heißen WHTC vorbereitet werden. Dafür wird der Motor 10 Minuten lang direkt nach Beendigung des ersten Durchlaufs abgestellt. In dieser Zeit beruhigen sich die Medien im Motor, verlieren aber nicht viel an Temperatur. Im Anschluss wird der Motor wieder gestartet und durchläuft erneut den WHTC.

Die Erfassung der Messdaten beginnt automatisch mit dem Start des jeweiligen Zyklus und endet nach der festgelegten Länge des Zyklus, im Fall des WHTC nach 1800 Sekunden. Die Messungen erfolgten mit einer Frequenz von 5 Hz was 9000 Messpunkte pro Zyklus ergibt. Tritt während dem Prüfzyklus ein Fehler auf und der Motor befindet sich nicht mehr im normalen Betriebsmodus, so gilt der Test als ungültig und muss wiederholt werden. Dasselbe gilt auch, wenn aufgrund eines Fehlers der Messeinrichtungen, wichtige Messdaten fehlen. Im Anschluss an den WHTC wird der Motor für den WHSC vorbereitet. Dabei muss er nach „Mode 9“ des WHSC mindestens 10 Minuten lang vorkonditioniert werden. Nach dieser Zeit sollten sich alle Temperaturen weitestgehend stabilisiert haben. Auf diese Weise werden immer identische Startbedingungen vor jedem WHSC eingestellt und die Vergleichbarkeit der Zyklen untereinander wird dadurch verbessert.

Zusätzlich zu den genannten Tests, fordert der Gesetzgeber die Untersuchung einzelner Punkte im oberen Kennfeldbereich. Der Bereich in dem die Punkte gelegt werden, wird in den Vorschriften des WNTE festgelegt. Die Abgrenzung des Bereichs und die Wahl der Punkte, ist im vorangegangenen Abschnitt zu finden. Um auch für dieses Szenario einen Vergleich der beiden Systeme zu haben, wurde ein automatisierter Prüfablauf nach den Anforderungen des WNTE erstellt. Mit der entsprechenden Vorkonditionierung, die ebenfalls fest vorgegeben ist, ist dieser Ablauf unabhängig vom vorangegangenen Betrieb des Motors.

Jeder Zyklus läuft voll automatisiert ab. Die Daten werden als Parametertabellen in die Prüfstandssoftware geladen. Indem man zu Fahrpedalstellung, Drehzahl- und Drehmomentwert einen weiteren Regelwert hinzufügt, erkennt die Prüfstandssoftware in welchen Regelmodus sie schalten muss, um den jeweiligen Punkt einzustellen. Dabei unterscheidet sie grundsätzlich die drei Regelmodi, Leerlauf, Drehzahl/Drehmoment und Drehzahl/Fahrpedalstellung. In der Regel werden die Betriebspunkte über Drehmoment und Drehzahl eingestellt. Grund dafür ist unter anderem, dass im Fahrzeug die Fahrpedalstellung in einen Drehmomentwunsch umgerechnet wird. Eine Vorgabe der Fahrpedalstellung wäre nur ein unnötiger Zwischenschritt und eine zusätzliche Fehlerquelle. Außerdem würde sich auch eine Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen ergeben, speziell von Druck und Temperatur, die sich in weiterer Folge auf den Kraftstoff auswirken. Der Regelmodus Drehzahl/Fahrpedalstellung macht allerdings Sinn, wenn man Punkte an der Vollastlinie anfährt. In diesem Fall ist der Punkt über $\alpha = 100\%$ ($\alpha =$ Fahrpedalstellung in %) viel einfacher und genauer einzustellen.

Der automatisierte Ablauf der Zyklen ermöglicht auch einen automatisierten Ablauf der Messungen. Alle relevanten Abgasmessungen werden automatisch mit dem Beginn eines Zyklus gestartet und enden auch mit dessen Ende. Indem man eine geeignete Messfrequenz wählt, kann man die Emissionswerte mit entsprechender Genauigkeit den einzelnen Betriebspunkten zuordnen. Die zeitliche Zuordnung ist von großer Bedeutung für die spätere Auswertung der Messungen.

5.1.5 Konfigurationen

Der bisher beschriebene Ablauf wurde am Prüfstand für beide Leistungsstufen des Motors durchgeführt. Der Motor benötigte dabei keine mechanische Modifikation. Da sich die mechanischen Komponenten der beiden Motoren kaum unterscheiden, genügte eine Programmierung des Steuergeräts. Mit einem Schreibzugriff auf das Steuergerät des Motors und den passenden Datensätzen, konnte über das Prüfstandsprogramm INCA, der Wechsel zwischen den Konfiguration des Motors, also zwischen 81 und 129 kW, ohne großen Aufwand bewerkstelligt werden. Die Datensätze wurden von FPT zur Verfügung gestellt. Um die Vorteile des ASDS bei früherem Dosierbeginn des NH_3 darstellen zu können, wurden die Datensätze von FPT entsprechend bearbeitet und die, für die Dosierung relevante Temperatur herabgesetzt. In der Standardkonfiguration sind für den Beginn der Dosierung 185 bis 195 °C über den SCR-Katalysator eingestellt. Diese Temperatur orientiert sich maßgeblich an der Erzeugung von NH_3 aus AdBlue. Da das ASDS Ammoniak in gasförmiger Form einbringt, kann diese Temperatur theoretisch deutlich reduziert werden. Um diese Annahme zu untersuchen, wurden zwei weitere Konfigurationen mit den Temperaturen 170 °C und 150 °C verwendet. Um den direkten Vergleich von AdBlue und ASDS auch für diese Temperaturen zu ermöglichen, wurden beide Systeme in Kombination mit den verschiedenen Konfigurationen betrieben.

Unabhängig von der Konfiguration der Motorsteuerung, konnte das ASDS in zwei verschiedenen Betriebsmodi verwendet werden. Mit Hilfe von INCA wurde zwischen „slave mode“ und „auto mode“ des ASDS umgestellt. Im „slave mode“ wird die Dosierstrategie des Motorsteuergeräts übernommen. Sowohl die Zeitpunkte als auch die Mengen von NH_3 werden direkt aus den Signalen für das AdBlue-System bestimmt. Die Ausgangssignale werden dabei über die Messwerte der NO_x -Sensoren des AdBlue-Systems beeinflusst, welche vor und nach dem Katalysator angeordnet sind. Diese Anordnung erlaubt die Überwachung der Umsatzraten und einen schnellen Eingriff bei schnellen Lastwechseln. Die Dosierzeitpunkte können direkt übernommen werden, während die NH_3 -Mengen aus den jeweiligen AdBlue-Mengen berechnet werden müssen. Amminex gibt für die Umrechnung von AdBlue-Menge auf NH_3 -Menge einen Faktor von ungefähr 5,4 an, welcher dem Kehrwert des Anteils von NH_3 in AdBlue entspricht (siehe Gleichung 3.2).

Im „auto mode“ operiert das ASDS mit einem eigenen Modell. In diesem Betrieb ist das ASDS vollkommen unabhängig von den Konfigurationen der Motorsteuerung. Das System beginnt die Dosierung von Ammoniak bereits bei Temperaturen unter 150 °C am Eintritt in dem SCR-Katalysator. Die Menge wird dabei mit den Signalen der NO_x -Sensoren des Systems berechnet. Einen weiteren Einfluss auf die anfangs dosierte Menge hat auch der aktuelle Beladungszustand des SCR-Katalysators. Des Weiteren wird die zudosierte Ammoniakmenge durch einen NH_3 -Sensor nach dem Katalysator mitbestimmt. Im Falle einer Überdosierung wird dadurch der NH_3 -Schlupf erkannt und die Dosiermenge kann entsprechend angepasst werden.

Im realen Fahrzeug müssen die Sensoren nicht doppelt ausgeführt werden, da nur eines

der beiden Systeme verbaut wäre. Am Prüfstand wurde oft zwischen den Systemen gewechselt, weshalb es einfacher war die notwendigen Informationen mit separaten Sensoren zu erfassen, als die Systeme miteinander zu verknüpfen. Außerdem wäre der Betrieb im „auto mode“ nicht möglich, da das ASDS in diesem Fall nicht auf die motoreigenen Sensoren zurückgreift. Die oben besprochenen Konfigurationen werden zur besseren Übersicht noch einmal in einer kurzen Tabelle 5.2 zusammengefasst.

Tabelle 5.2: Variation der Konfigurationen

Leistung kW	SCR-System	Dosierstart °C
81	AdBlue	std. ^a
		170
		150
	ASDS slave	std.
		170
		150
	ASDS auto	–
129	AdBlue	std.
		170
		150
	ASDS slave	std.
		170
		150
	ASDS auto	–

^a zwischen 185 und 195 °C vor SCR-Kat

6 Auswertung und Ergebnisse

Die während des Prüfstandbetriebs gesammelten Daten müssen nachträglich ausgewertet werden. Bei der Berechnung sind einige Punkte zu beachten, um die Ergebnisse nicht zu verfälschen. Passend zum Thema wird im Folgenden genau auf die Berechnung der Stickoxidemissionen für die verschiedenen Zyklen eingegangen. Anschließend sollen die Ergebnisse der relevanten Zyklen aufgezeigt und diskutiert werden.

6.1 Auswertung

Die Auswertung der Zyklen, insbesondere die Berechnung der Emissionen wird in der Abgasgesetzgebung genau vorgegeben. Für Nutzfahrzeuge werden die Grenzwerte der limitierten Komponenten in g/kWh angegeben. Aus den gemessenen Rohdaten müssen über Berechnungen die Werte in den passenden Einheiten ermittelt werden.

Zu Beginn der Auswertung ist ein Blick auf den zeitlichen Ablauf der Rohdaten empfehlenswert. Für jede Berechnung ist es notwendig, dass die verwendeten Werte auch zeitlich aufeinander abgestimmt sind. Vor allem bei instationären Messungen kommt es oft vor, dass aufgrund von Totzeiten der Messgeräte und langen Leitungen, zeitliche Verschiebungen von mehreren Sekunden zwischen zueinander gehörenden Messwerten auftreten. Diese Zeitverzögerungen müssen vor der Durchführung von Berechnungen unbedingt beseitigt werden.

Geht man von einer konstanten Drehzahl aus, so kann man jeden zeitlichen Versatz durch Aufprägung eines Drehmomentsprungs ermitteln. Ein Sprung im Drehmoment zieht immer einen Sprung der gemessenen Werte nach sich. Abbildung 6.1 zeigt einige Messgrößen aus einem WHTC, dargestellt über der Zeit. Mit der Drehmomentkurve als Basis, können die Zeitverzögerungen der Messwerte bestimmt werden. Man sieht links deutlich den Versatz der Sprünge der einzelnen Signale. Je nachdem, wo sich die Messstelle befindet und welches Medium gemessen wird, ist der Zeitverzug anders ausgeprägt. Besonders groß fällt er bei der Konzentrationsmessung von Abgaskomponenten aus. Der Grund dafür ist nicht nur die lange Leitung von Entnahmestelle zur Abgasanalyse, sondern auch die Totzeit des jeweiligen Analysators.

Die Korrektur erfolgt nun indem man die Sprünge der Signale bestmöglich über einander schiebt. Im einfachsten Fall werden einige Werte zu Beginn des Zyklus gelöscht und die restlichen Werte passend verschoben. Nach der erfolgten zeitlichen Korrektur sehen die anfänglichen Verläufe wie in Abbildung 6.1 (rechts) dargestellt aus.

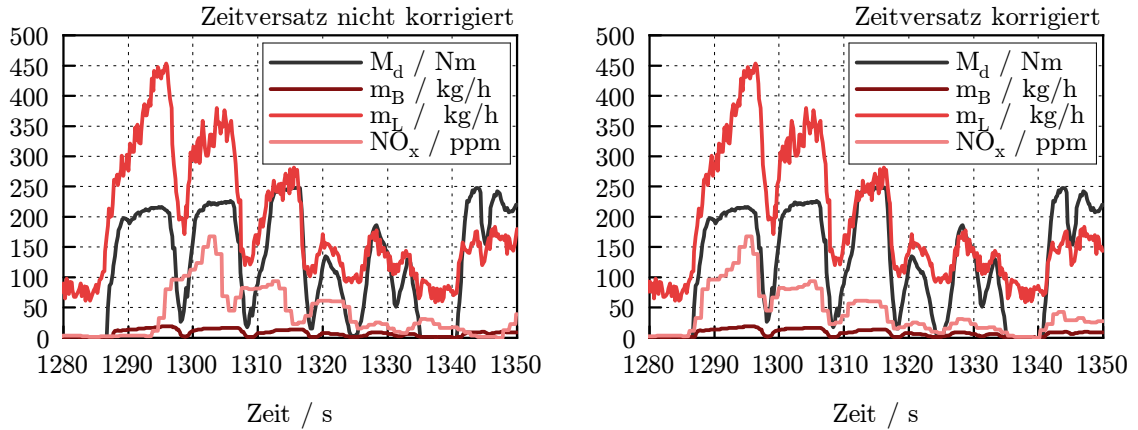


Abbildung 6.1: Zeitversatz von Messsignalen (links) vor und (rechts) nach der Korrektur

Die Berechnung der emittierten Masse einer Abgaskomponente ist für jeden Messpunkt einzeln auszuführen, bevor die Summe über den Zyklus gebildet werden darf. Diese erfolgt nach Formel 6.1.

$$m_{\text{Gas}} = \sum_{i=1}^n u_{\text{Gas},i} \cdot c_{\text{Gas},i} \cdot q_{\text{mew},i} \cdot \frac{1}{f} \quad (6.1)$$

Der Faktor $u_{\text{Gas},i}$ wird aus den molaren Massen der berechneten Abgaskomponente und der molaren Masse des Abgases, zum Zeitpunkt der Messung, bestimmt.

$$u_{\text{Gas},i} = \frac{M_{\text{Gas}}}{M_{\text{E},i} \cdot 1000} \quad (6.2)$$

m_{Gas} ... Masse der Abgaskomponente in g/test

M_{Gas} ... molare Masse der Abgaskomponente in g/mol

$M_{\text{E},i}$... momentane molare Masse des Abgases in g/mol

$q_{\text{mew},i}$... momentaner Abgasmassenstrom in kg/s

$c_{\text{Gas},i}$... Konzentration der Abgaskomponente in ppm

f ... Messfrequenz in Hz

n ... Anzahl der Messpunkte

Speziell bei der Berechnung der NO_x -Emissionen ist darauf zu achten, dass die Emissionen von dem Zustand der Umgebungsluft abhängig sind. Dabei spielt besonders die Luftfeuchtigkeit eine große Rolle. Dieser Einfluss wird über den in Formel 6.3 (vergleiche [6]) dargestellten Korrekturfaktor $k_{h,D}$ berücksichtigt. Die Luftfeuchtigkeit H_a der angesaugten Luft, kann aus der relativen Feuchte RH , welche in der Regel am Prüfstand mitgemessen wird, hergeleitet werden. Die hier abgebildete Formel 6.3 gilt ausschließlich für selbstzündende Motoren.

$$k_{h,D} = \frac{15,698 \cdot H_a}{1000} \cdot 0,832 \quad (6.3)$$

Die oben angeführte Korrektur muss in jedem Fall durchgeführt werden und darf nicht mit der Trocken/Feucht-Korrektur verwechselt werden. Diese ist nur dann durchzuführen, wenn die Abgasmessung auf trockener Basis stattgefunden hat. Für die Umrechnung von trockener c_d , auf feuchte Konzentration c_w wird Formel 6.4 (siehe ebenfalls [6]) herangezogen.

$$c_w = k_w \cdot c_d \quad (6.4)$$

Für die Bestimmung des Feuchtekorrekturfaktors k_w sind relativ komplizierte Formeln gegeben, weshalb an dieser Stelle auf [6] verwiesen sei. Nachdem die Masse der Stickoxide pro Test berechnet wurde, muss die effektiv vom Motor abgegebene Arbeit über die Dauer des betrachteten Zyklus bestimmt werden. Dazu kann Formel 6.5 herangezogen werden.

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{f} \quad (6.5)$$

Um W in der Einheit kWh zu erhalten ist die obenstehende Formel 6.5 durch 3600 zu dividieren. Bei der Berechnung der Arbeit ist darauf zu achten, dass besonders in instationären Zyklen, der Motor oft in den Schleppebetrieb gelangt. Hier liefert die Drehmomentmessung negative Werte, woraus folglich auch negative Leistungen resultieren. Diese machen natürlich keinen Sinn und verfälschen auch das Summenergebnis, weshalb sie vor Berechnung der Arbeit am besten „0“ gesetzt werden sollten. Abschließend müssen die beiden berechneten Werte noch durch einander dividiert werden. Der erhaltene Wert hat dann die Einheit g/kWh und kann im Grunde mit dem vorgeschriebenen Grenzwert verglichen werden.

Für den WHTC ist vor dem Vergleich noch eine Gewichtung durchzuführen. Der zu vergleichende Wert setzt sich hier nämlich immer aus bestimmten Anteilen des kalt bzw. warm gestarteten Zyklus zusammen. Die Gewichtung erfolgt nach Gleichung 6.6.

$$e_{\text{NO}_x} = \frac{0,14 \cdot e_{\text{NO}_x}^{\text{kalt}} + 0,86 \cdot e_{\text{NO}_x}^{\text{warm}}}{W} \quad (6.6)$$

Der WHSC wird ausschließlich warm gestartet und bedarf daher keiner Gewichtung. Die Summe aller emittierten NO_x wird auch hier nach dem oben beschriebenen Schema durchgeführt. Der erhaltene Summenwert sollte dabei den vorgeschriebenen Grenzwert von $0,4 \text{ g/kWh}$ nicht überschreiten.

Die Auswertung des WNTTE hängt immer davon ab, wie der Ablauf der Messung gestaltet wurde. Im hier zugrundeliegenden Fall lief die Messung von Beginn des Zyklus bis zu dessen Ende ununterbrochen mit. Das bedeutet, dass alle Vorgänge aufgezeichnet wurden. Damit sind unter anderem die Anfahr- und Einschwingzeiten der einzelnen Punkte gemeint, welche für die Auswertung jedoch uninteressant sind. Diese müssen vor der Auswertung folglich entfernt, oder einfach aus der Auswertung ausgeschlossen werden, um das Ergebnis nicht zu verfälschen. Aus den 9 bzw. 12 Zellen sind per Zufallsprinzip drei Zellen auszuwählen. Für jede Zelle sind Mittelwerte für die emittierten gasförmigen Komponenten zu berechnen. Die Berechnung erfolgt dabei nach dem selben Ablauf wie oben beschrieben. Die errechneten Werte jeder dieser ausgewählten Zellen, müssen unter dem gegebenen Grenzwert liegen, um den Test erfolgreich zu bestehen. Für NO_x ist der Grenzwert mit $0,6 \text{ g/kWh}$ angesetzt.

6.2 Ergebnisse

6.2.1 Kennfeldbetrachtungen

Das stationäre Kennfeld bietet einen perfekten Überblick über alle relevanten Größen unter Ausschluss von dynamischen Effekten. Die folgenden Kennfeldbetrachtungen sollen die Reproduzierbarkeit geforderter Randbedingungen und den direkten Vergleich von relevanten Größen beider Systeme im stationären Betrieb aufzeigen.

Die grundlegende Basis eines Systemvergleichs ist die Reproduzierbarkeit von Randbedingungen. Somit ist auch der Vergleich der beiden SCR-Methoden nur dann möglich, wenn sichergestellt werden kann, dass alle geforderten Randbedingungen für beide Systeme identisch sind. Identische Randbedingungen sind in Realität jedoch sehr schwer zu reproduzieren. Neben der Vielzahl von Faktoren die sich anpassen lassen, gibt es auch immer Faktoren, die nicht beeinflussbar sind. Als Beispiel seien alle wetterbedingten Faktoren, wie Außentemperatur, Luftfeuchtigkeit und Umgebungsdruck genannt. Solche Größen sind dafür verantwortlich, dass identische Randbedingungen am Prüfstand nicht realisierbar sind. Nichts desto trotz, ist es mit Hilfe der Prüfstandstechnik möglich, die notwendigen Randbedingungen mit einer sehr geringen Abweichung über die Dauer eines Projekts einzustellen. Als wichtige Randbedingung kann bei diesem Vergleich die Temperatur am SCR-Eintritt herangezogen werden. Die Temperatur am Eintritt in den Katalysator ist ausschlaggebend für die Vorgänge, die später im Katalysator ablaufen. Damit die temperaturbedingten Vorgänge in beiden Fällen gleich ablaufen und somit keine Einflüsse auf die Messungen haben, war es von großer Bedeutung, die Zustände vor dem Katalysator für beide Dosiersysteme annähernd gleich einzustellen. Die Betrachtung des gemessenen stationären Kennfelds in Abbildung 6.2, lässt erkennen, dass hier die Einstellung dieser Randbedingung durchaus gut gelungen ist.

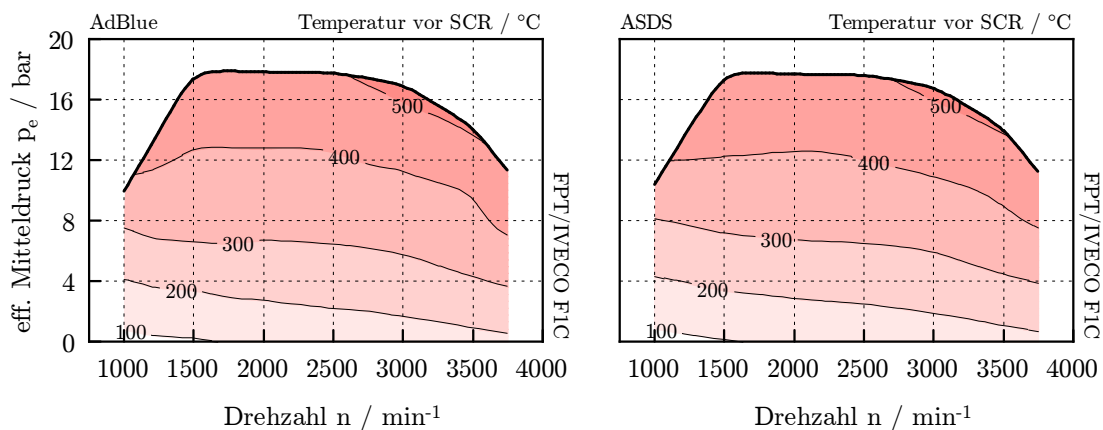


Abbildung 6.2: Darstellung der Temperatur am Eintritt in den SCR

Dank dieser genauen Wiederherstellung der Zustände vor dem Katalysator, können unerwünschte Auswirkung auf die Messergebnisse, bedingt durch unterschiedliche Temperaturniveaus, auf ein Minimum reduziert werden. Alle aus den Messungen hervorgehenden Unterschiede zwischen den Systemen, sind somit nur auf deren Betriebsweise zurückzuführen. Natürlich ist es nicht ausreichend, nur diese eine Größe als Randbedingung zu definieren. Sie wurde aus einer Vielzahl von wichtigen Größen zu anschaulichen Zwecken ausgewählt. Als weiteres Beispiel sei hier nur noch die vom Motor emittierte Menge an NO_x erwähnt, welche in weiterer Folge hauptsächlich von AGR-Rate und Ladelufttemperatur nach Ladeluftkühler abhängt. Diese Größen müssen für beide Systeme reproduzierbar sein, ansonsten kann nie ein direkter Vergleich angestellt werden. Bei Prüfstandsmessungen muss man immer damit rechnen, dass verwendete Sensoren und Analysatoren während dem Betrieb ausfallen können. Speziell für NO_x -Emissionen existieren Sensoren, die bei SCR-Systemen zur Überwachung der Funktion standardmäßig eingesetzt werden. An dieser Stelle soll daher ein Vergleich der Messwerte der verwendeten Abgasanalysen und der NO_x -Sensoren der SCR-Anlage gezeigt werden. Grund für diesen Vergleich ist eben genau ein Ausfall einer Abgasanalyseeinheit während des Messungen. Da folglich nur eine Abgasanalyseeinheit zur Verfügung stand und diese natürlich für die Messungen der NO_x -Emissionen nach dem SCR-Kat eingesetzt wurde, mussten für die fehlenden Werte der Rohemissionsmessung, die Messwerte des Sensors als Ersatz dienen. Abbildung 6.3 zeigt den Vergleich der Messwerte im Fall der Messungen mit dem ASDS.

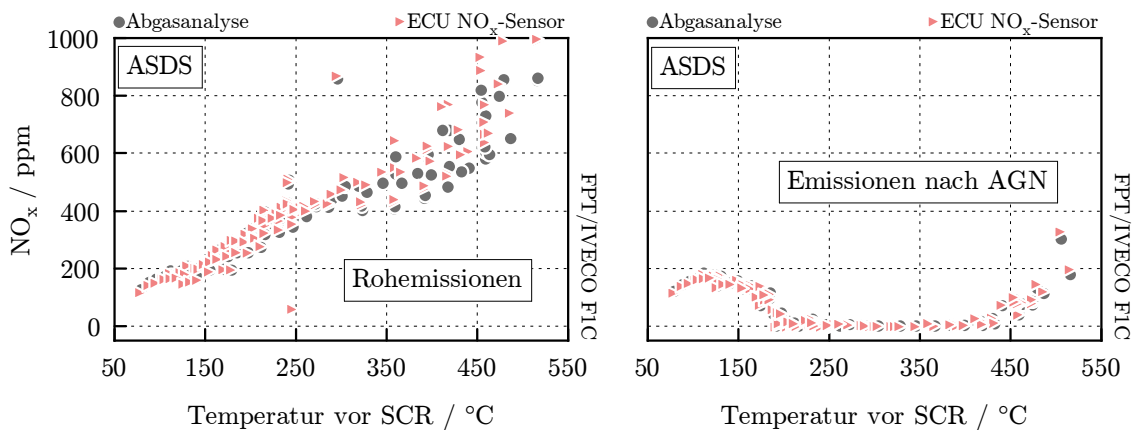


Abbildung 6.3: Vergleich der Messung von Abgasanalyse und NO_x -Sensoren

Die Übereinstimmung der Messwerte im Temperaturbereich von 200 °C bis 400 °C ist sehr gut. Bei Temperaturen außerhalb dieses Bereichs gehen die gemessenen Werte jedoch leicht auseinander. Da die Rohemissionen vor allem für die Berechnung der Konvertierungsrate notwendig sind, wirkt sich dieser Fehler in erster Linie dort aus. Der absolute Fehler nimmt dabei bei Temperaturen unter 150 °C einem max. Wert von 5 % ein, bei Temperaturen jenseits der 400 °C sind es weniger als 2 % (siehe Abbildung 6.4). Im Falle von fehlenden Daten der Abgasanalyse können also die Messwerte der Sensoren durchaus als Ersatz herangezogen werden.

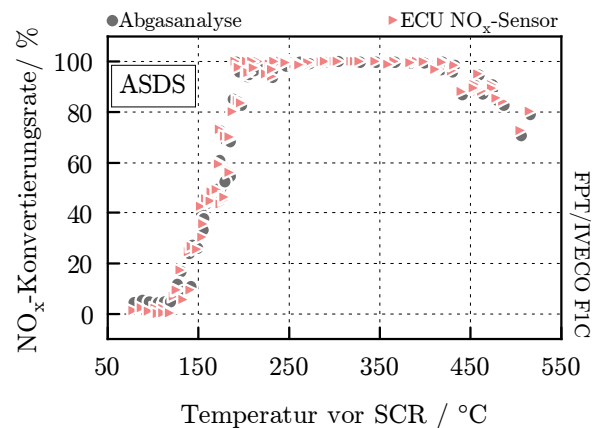


Abbildung 6.4: Konvertierungsraten aus Abgasanalyse und NO_x-Sensoren im Vergleich

Als Basis aller weiteren Betrachtungen dienen die Ergebnisse der Messungen mit dem standardmäßigen AdBlue-SCR-System. Diese Ergebnisse sind immer links in den Abbildungen dargestellt. Vergleichend dazu sind die Resultate des ASDS-SCR-Systems jeweils rechts in den Abbildungen zu finden.

Die anfängliche Annahme, dass das ASDS deutlich effizienter arbeitet, bestätigt sich schon bei der Betrachtung des Konvertierungsgrades im Motorkennfeld. Der große Vorteil wurde im unteren Lastbereich erwartet, in dem die Temperaturen relativ niedrig sind und das AdBlue-System somit an Effizienz verliert. Tatsächlich erreicht das ASDS aber generell in einem viel größeren Kennfeldbereich deutlich höhere Umsatzraten als das AdBlue-System (siehe Abbildung 6.5).

Im Bereich niedriger Lastpunkte rührt der Vorteil des ASDS daher, dass der Umsatz von NO_x aufgrund der fehlenden Vorreaktionen der NH₃-Erzeugung, viel schneller und effizienter stattfinden kann. Für den ausgewählten Lastpunkt bei einer Drehzahl von 1500 min⁻¹ und 2 bar effektiven Mitteldruck, bedeutet das bereits eine Umsatzrate von ca. 50 % für das ASDS, während mit AdBlue eine Umsatzrate von weniger als 25 % realisierbar ist. Wählt man einen Punkt im höheren Last- bzw. Drehzahlbereich, ergibt sich dort der Vorteil des ASDS in der untersuchten Konfiguration (mit langer Mischstrecke) vermutlich aus der besseren Verteilung des NH₃ am Katalysatoreintritt. Diese wird vor allem durch die gasförmige Bereitstellung des NH₃ und die Anordnung der

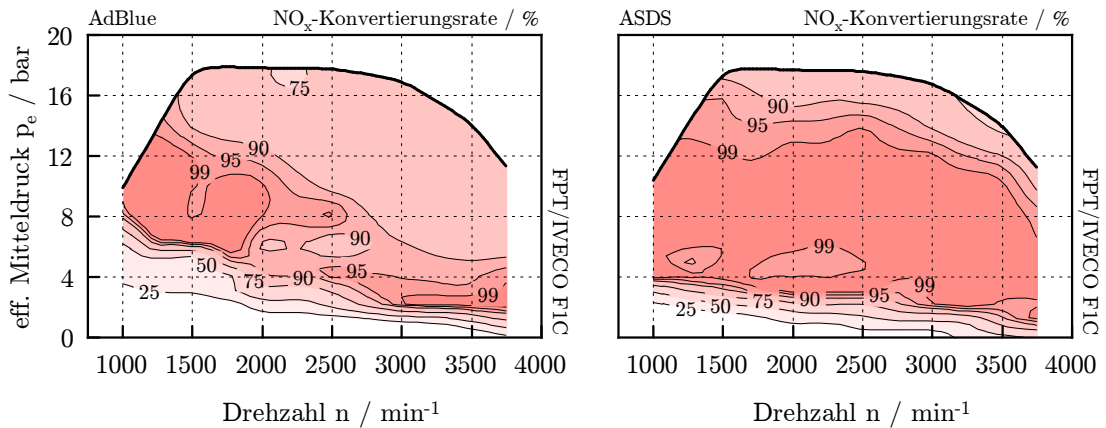


Abbildung 6.5: Vergleich der berechneten NO_x -Konvertierungsraten im Motorkennfeld

Dosierlöcher am Umfang der Dosierleitung erreicht. Hohe Drehzahlen und somit hohe Strömungsgeschwindigkeiten reduzieren ebenfalls die Effizienz von AdBlue-Systemen. Die Mischungswege und Reaktionszeiten sind zu gering, um die benötigten Abläufe vor Auftreffen auf den Monolithen zu beenden. Daraus resultiert wiederum eine Ungleichverteilung an der Eintrittsfläche des Katalysators und eine geringere NH_3 -Konzentration im Katalysator. Zudem stellte sich heraus, dass im Falle des ASDS die stöchiometrische (sogar überstöchiometrische) Dosierung von Ammoniak ($\alpha \approx 1$) ab etwa 250°C vor SCR-Kat durchgehend realisiert wurde. Das bedeutet, dass hier entsprechend der NO_x -Emissionen immer jene Menge an NH_3 bereitgestellt wurde, die für eine vollständige Konvertierung notwendig ist. Das AdBlue-System hingegen dosierte im selben Bereich stets eine geringere Menge AdBlue ($\alpha \approx 0,9$), als benötigt (siehe Abbildung 6.6).

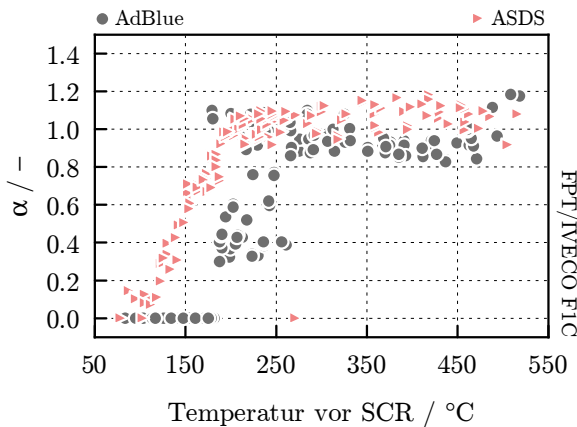


Abbildung 6.6: Alpha aufgetragen über der Temperatur vor SCR-Kat

Somit lassen sich die großen Unterschiede in den Konvertierungsraten im höherlastigen Kennfeldbereich zum Teil auch darauf zurückführen. Eine mögliche Begründung dieser reduzierten Dosierung könnten Reduktionsmittelsparstrategien sein. Die dosierten Mengen werden hier so gewählt, dass der gesetzliche Grenzwert, inklusive leichtem Puffer, eingehalten werden kann. Der zuvor erwähnte Effekt lässt sich auch in der Darstellung der Reduktionsmittelverbräuche im Kennfeld erkennen (Abbildung 6.7). Für das ASDS ist hier ein, der AdBlue-Menge äquivalenter Wert dargestellt (Faktor 5,4). Anhand der Isolinien ist zu erkennen, dass die dosierten Mengen nicht vollkommen gleich sind. Abgesehen vom Unterschied im mittleren Kennfeldbereich, kann man erkennen, dass das ASDS nahezu überall etwas mehr Reduktionsmittel einbringt. Es ist jedoch zu beachten, dass die hier verglichenen Werte nicht direkt gemessen wurden, sondern aus Berechnungsmodellen der beiden Systeme stammen. So können auftretende Abweichungen teilweise auch auf die Genauigkeiten und den Algorithmus der Berechnungsmethoden zurückgeführt werden.

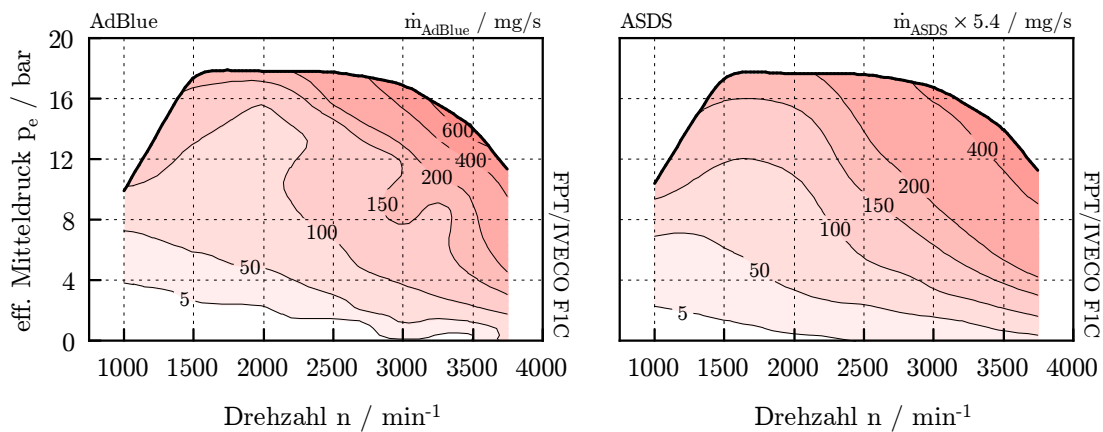


Abbildung 6.7: Massenstrom von AdBlue bzw. NH_3 (AdBlue-Äquivalent) dargestellt im Motorkennfeld

Ebenfalls interessant ist der Verbrauch des Reduktionsmittels im Bezug auf die verbrauchte Kraftstoffmenge. Die Berechnung der in Abbildung 6.8 dargestellten Werte wurde nach Gleichung 6.7 ausgeführt.

$$x_{\text{RM}} = \frac{\dot{m}_{\text{RM}}}{\dot{m}_{\text{Diesel}}} \quad (6.7)$$

Aus den Muscheldiagrammen geht hervor, dass sich der Verbrauch des Reduktionsmittels im Großteil des Kennfeldes zwischen 2 % und 6 %, bezogen auf den verbrauchten Kraftstoff, bewegt. Natürlich ist auch hier im Fall des ASDS wieder der Faktor 5,4 für die Umrechnung auf eine äquivalente AdBlue-Menge zu verwenden. Der somit errechnete Verbrauch von Reduktionsmittel, entspricht ganz gut den Erfahrungswerten für

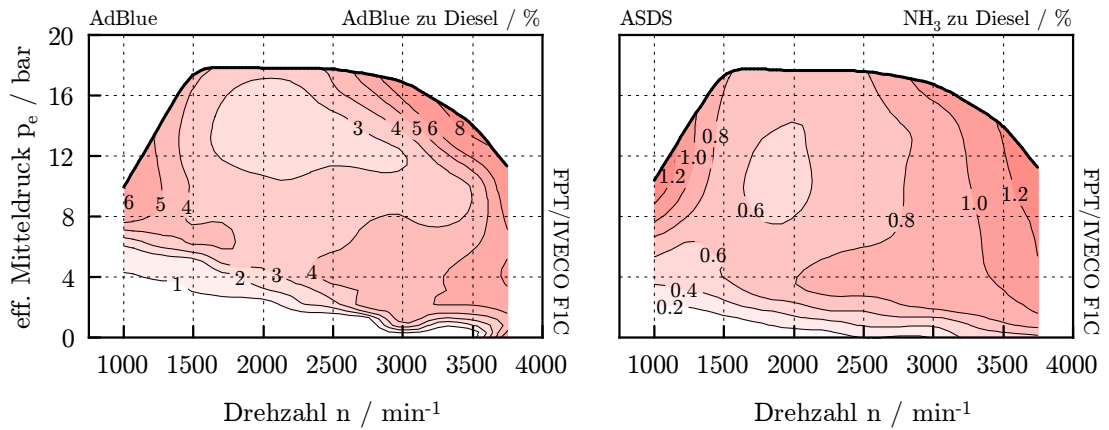


Abbildung 6.8: Reduktionsmittelverbrauch in Relation zum Dieserverbrauch

Nutzfahrzeugmotoren. Im ASDS-Betrieb zeichnet sich ein leichter Mehrverbrauch des Reduktionsmittels ab, welcher auf die zuvor besprochenen Effekte zurückzuführen ist.

Entsprechend der deutlich höheren Umsatzraten, resultieren deutlich niedrigere NO_x-Emissionen am Auspuffaustritt, was auch aus Abbildung 6.9 hervorgeht.

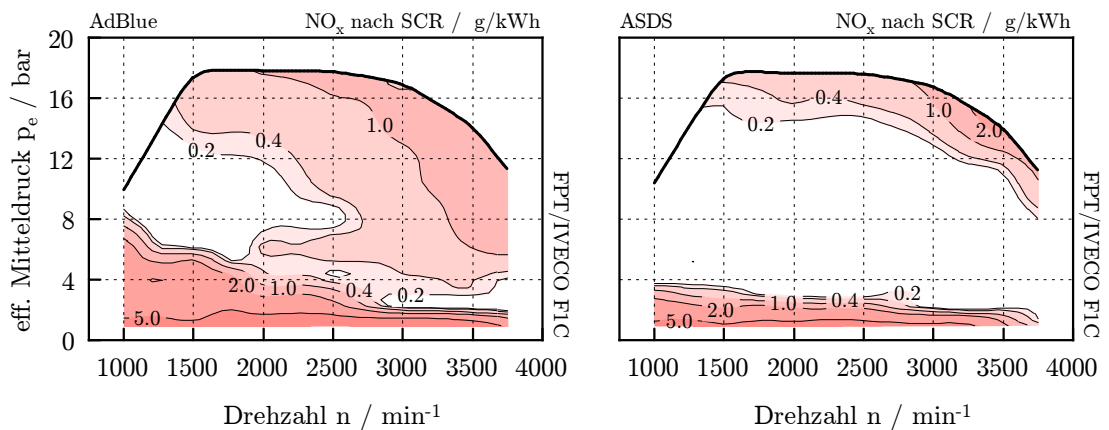


Abbildung 6.9: NO_x-Emissionen nach Abgasnachbehandlung

6.2.2 Messergebnisse der Typprüfzyklen

Im stationären Kennfeld erreicht das ASDS in der untersuchten Konfiguration deutlich niedrigere NO_x -Emissionen als das Standardsystem. Für die gesetzliche Typprüfung reicht allerdings ein gutes stationäres Verhalten nicht aus. Die Kennfeldebetrachtungen lassen darauf schließen, dass in den stationären Zyklen der Typprüfung, also WHSC und WNTE, die gesetzlichen Limits auf jeden Fall einzuhalten sind. Wie sich aber die dynamischen Einflüsse des WHTC auf das Betriebsverhalten des System auswirken, kann aus den Kennfeldern nicht vorhergesagt werden.

Die folgenden Ergebnisse ausgewählter WHTC-Messungen sollen die Eignung des ASDS für den Einsatz im dynamischen Betrieb und dessen Vorteile im Vergleich zum Standardsystem zeigen. Da der dynamische Betrieb viel komplexer ist und auch die Grenzwerte hier viel schwieriger einzuhalten sind, wird in den folgenden Betrachtungen größtenteils auf den WHTC eingegangen. Darauf folgend werden Ergebnisse der WHSC- und WNTE-Messungen aufgelistet.

Der Motor ist mit dem Standard-AdBlue-System in Serie vorhanden, und nach der Abgasnorm EURO VI auch zugelassen. Das bedeutet, dass bei richtigem Aufbau am Prüfstand und bei Einhaltung der gegebenen Randbedingungen, das Standard-AdBlue-System auch alle Grenzwerte der Prüfzyklen einhalten muss. Wie erwartet zeigten auch die Messungen am Prüfstand, dass das Standardsystem die vorgeschriebenen Grenzwerte einhält. Diese Messungen werden im Folgenden immer als Basis für den Vergleich herangezogen.

WHTC

Die WHTC-Messungen sollten im Grunde eine wesentliche Frage beantworten: „Ist das ASDS in der Lage die Norm zu erfüllen und wenn ja, was spricht für dessen Verwendung an Stelle des derzeitigen Standardsystems?“.

Da beim ASDS die chemischen Reaktionen der NH_3 -Erzeugung, welche relativ hohe Abgastemperaturen (etwa 200 °C) bei Dosierstart fordern, grundsätzlich wegfallen, ergibt sich die Möglichkeit, durch herabsetzen dieser Temperatur, die Dosierung des Ammoniaks vorzuverlegen. Besonders in den kalt gestarteten Zyklen hat die Vorverlegung des Dosierstartpunktes große Auswirkungen auf die Stickoxidemissionen. Die Variationsbetrachtungen werden im Folgenden für die 129-kW-Kalibrierung angestellt. Aus Gründen der besseren Übersicht werden nicht alle Variationen aus Tabelle 5.2 gezeigt. Es werden einige repräsentative Fälle ausgewählt, welche die wesentlichen Aussagen und Ergebnisse bildlich zeigen sollen. Wie bereits erwähnt dient die Vermessung des AdBlue-Systems als Basis. Für den Vergleich werden für das ASDS sowohl die Ergebnisse im „slave mode“ als auch im „auto mode“ dargestellt.

Die Darstellung des Dosiersignals über der Zeit (Abbildung 6.10), zeigt den früheren Beginn der Dosierung im Fall des ASDS.

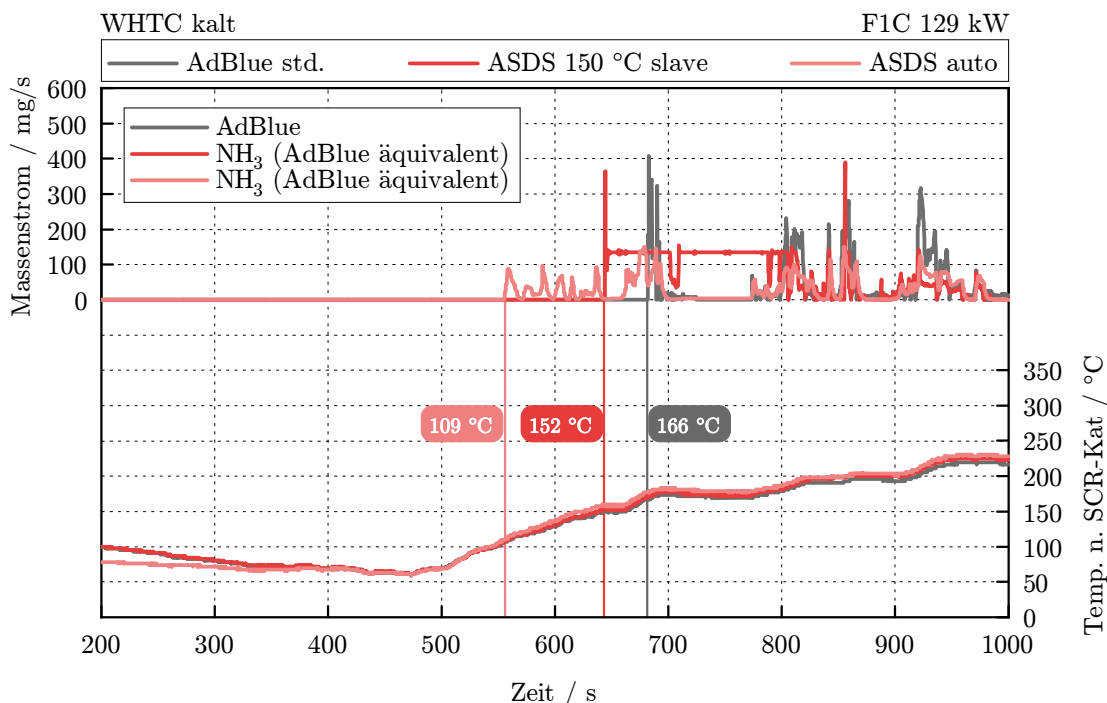


Abbildung 6.10: Beginn der Dosierung des Reduktionsmittels (WHTC kalt gestartet)

Um diese zeitliche Vorverlegung zu realisieren, wird die Temperaturschwelle für den Dosibeginn herabgesetzt. Diese wird für beide Systeme vom zuständigen Steuergerät aus mehreren Werten berechnet und basiert nicht auf einem reinen Messwert. Dargestellt in Abbildung 6.10 sind die Temperaturverläufe an der Temperaturmessstelle nach dem SCR-Katalysator. Im „auto mode“ beginnt die Dosierung von NH_3 knapp 130 Sekunden vor dem Dosierstart des Standardsystems. Das Dosiersignal wird dabei direkt vom Steuergerät des ASDS berechnet und vorgegeben. Im „slave mode“ bekommt das ASDS das Dosiersignal vom Motorsteuergerät. Aus dem Dosiersignal für die AdBlue-Dosiermenge wird die notwendige NH_3 -Menge berechnet. Um einen Dosibeginn bei ca. 150 °C realisieren zu können musste natürlich die Software des Motorsteuergeräts angepasst werden. Das wurde für alle „slave mode“-Kalibrierungen von FPT durchgeführt. Betrachtet man den Fall im „auto mode“, so erkennt man, dass die dosierten Mengen zu Beginn recht gering sind. Der Grund für diese eher konservative Dosierung liegt darin, dass man auf keinen Fall NH_3 -Schlupf erzeugen wollte, da dieser vom Gesetzgeber ebenfalls auf 10 ppm begrenzt wird. Die Auswertungen der NH_3 -Messungen zeigten, dass in keinem der betrachteten Fälle, übermäßiger Schlupf aufgetreten ist. Die Dosiermengen im „auto mode“ könnten demnach, unter Einbeziehung des Beladungszustands des SCR-Katalysators mit NH_3 , durchaus auf das Niveau der anderen

beiden Varianten angehoben werden. Das würde zur Folge haben, dass die Umsetzung von NO_x noch höher ausfiele.

Die Darstellung der zeitlichen Verläufe der NO_x -Emissionen hätte hier keinen Aussagewert. Kumulierte Größen zu vergleichen macht hier deutlich mehr Sinn, da die endgültige Summe an emittierten NO_x ausschlaggebend ist. Abbildung 6.11 zeigt folglich die resultierenden kumulierten Größen über die Dauer des Zyklus. Als Basis sind die gemessenen Werte des AdBlue-Systems dargestellt.

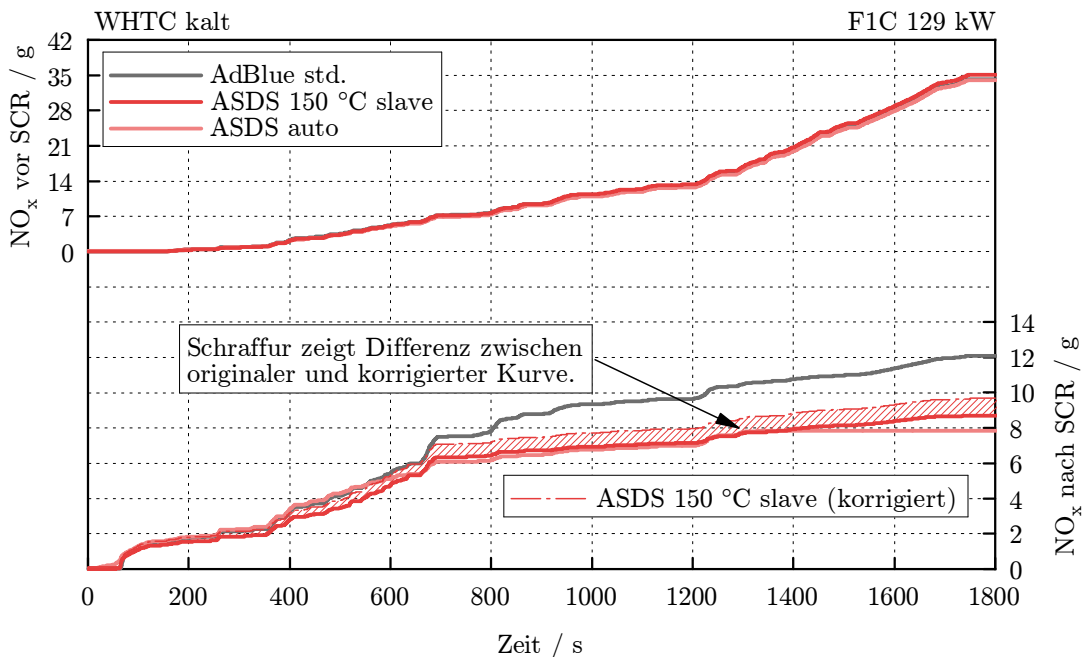


Abbildung 6.11: Kumulierte NO_x -Emissionen vor und nach SCR-Kat (WHTC kalt gestartet)

Die Randbedingungen waren für alle Messungen nahezu identisch. Das verdeutlicht den Verlauf der kumulierten Rohemissionen im oberen Teil des Diagramms. Bei gleicher Ausgangsbasis erreicht das ASDS in Summe deutlich niedrigere NO_x -Werte. Im kalten WHTC werden bei Verwendung des ASDS, 3 bis 4 Gramm weniger NO_x pro Zyklus emittiert. Das entspricht einem Einsparungspotenzial von ca. 25 % bis 35 % im Bezug auf die erzielbaren Werte mit dem Standardsystem.

Bei genauerer Betrachtung des Bereichs von 0 bis ca. 600 Sekunden (Abbildung 6.12) ist zu erkennen, dass hier Unterschiede zwischen dem dargestellten „slave mode“ und den anderen beiden Fällen auftreten. Diese ergeben theoretisch betrachtet keinen Sinn, da die Kurven vor Beginn der Dosierung eigentlich deckungsgleich sein müssten.

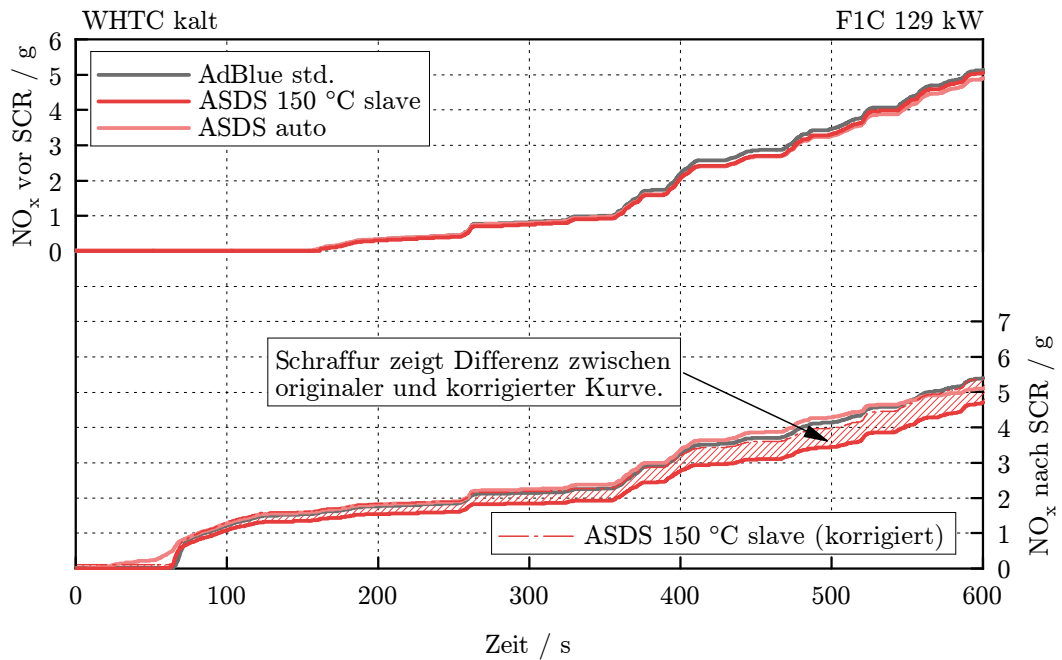


Abbildung 6.12: Detaillierte Betrachtung der NO_x-Emissionen vor Dosierbeginn

Der Unterschied geht auf die Verwendung verschiedener Abgasanalysatoren zurück. Der zu Beginn des Kapitels erwähnte Ausfall einer Abgasanalyseeinheit, führte dazu, dass die noch betriebsfähige Abgasanalyse in weiterer Folge für die Messung der Stickoxide nach dem SCR-Katalysator eingesetzt wurde.

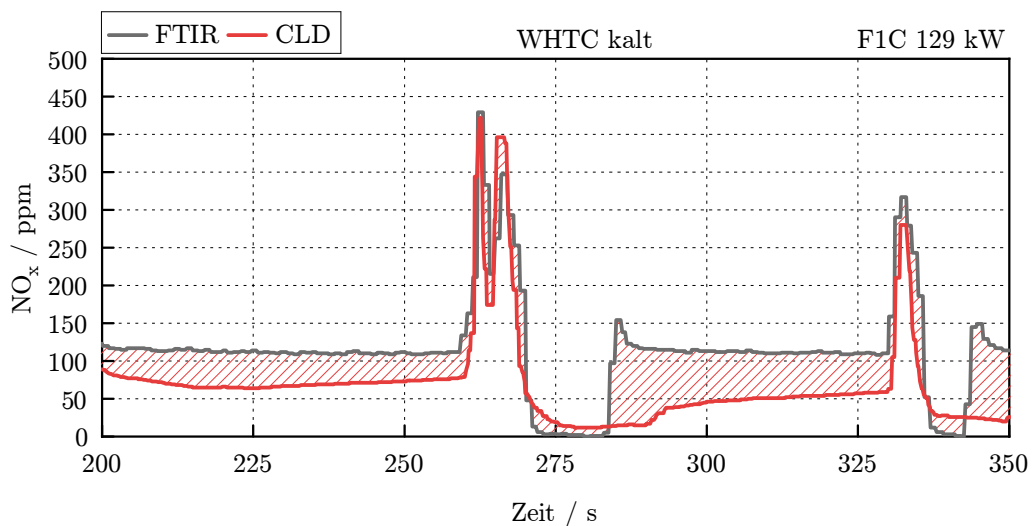


Abbildung 6.13: Zeitlicher Verlauf der NO_x-Emissionen für versch. Messsysteme

Anstelle des zuvor verwendeten FTIR-Analysators, kam nun ein CLD-Analysator für die Messung der NO_x -Emissionen nach der Abgasnachbehandlung zum Einsatz. Trotz angepasster Korrektur der Zeitverschiebung, gelingt es nicht das Ansprechverhalten der Analysatoren aneinander abzugleichen. Die Analyse der Daten zeigte, dass der CLD-Analysator viel schneller reagiert und dessen NO_x -Niveau im Leerlauf (z. B. Sekunde 300 bis 325) durchgehend niedriger ist (siehe Abbildung 6.13). In Summe ergibt dies ein niedrigeres Niveau der kumulierten Werte. Hätte man im Fall der „slave mode“-Messung ebenfalls den FTIR-Analysator zur Verfügung gehabt, so wäre das Niveau in etwa um den schraffierten Bereich höher und auf der unterbrochenen Linie in Abbildung 6.11 bzw. 6.12 anzunehmen. In Summe bliebe der kumulierte NO_x -Wert über den Zyklus jedoch weiterhin unter dem der Basiskurve.

Offensichtlich ist, dass der „auto mode“ die beste Betriebsstrategie des ASDS ist. Der direkte Vergleich beider Systeme in Abbildung 6.14 zeigt das Potential des ASDS somit am besten auf. Die Vergleichbarkeit ist speziell in diesem Fall sehr gut. Kraftstoffverbrauch und Roh- NO_x sind nahezu identisch. Das ASDS erreicht bei gleichen Bedingungen einen um 34 % niedrigeren Endwert.

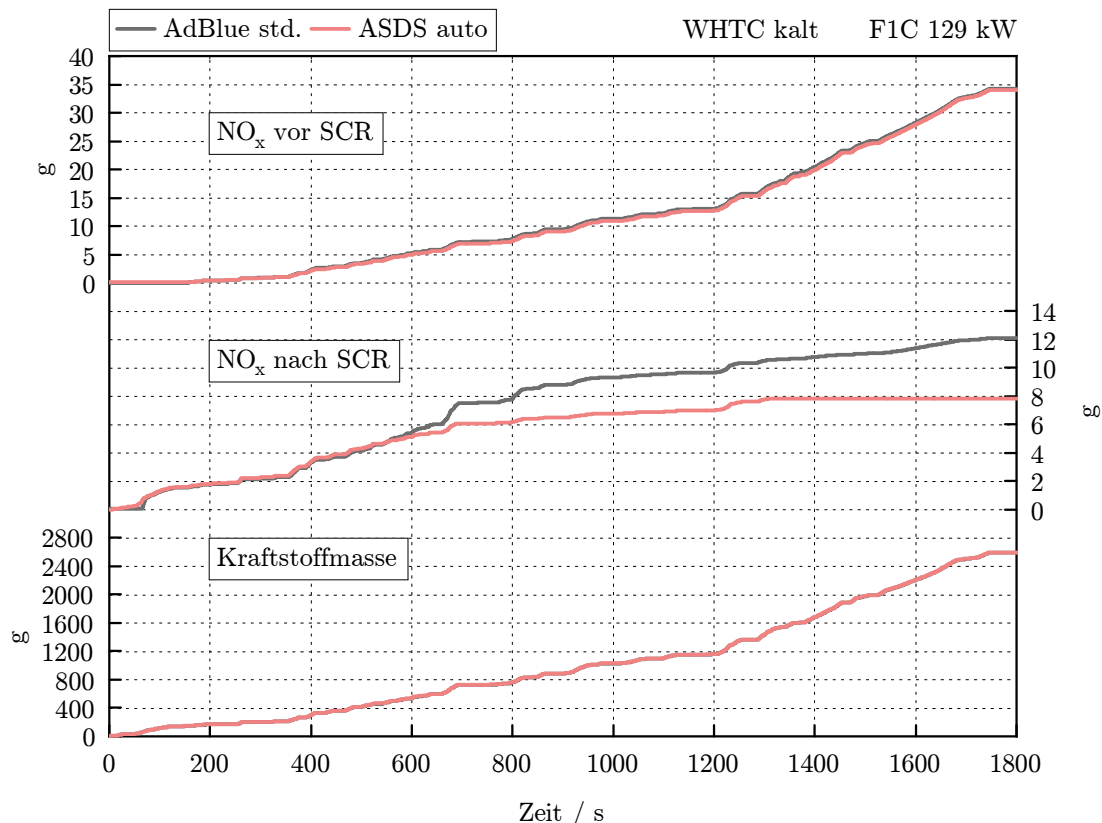


Abbildung 6.14: Vergleich von AdBlue und ASDS (auto mode) anhand NO_x -Emissionen und Kraftstoffverbrauch (WHTC kalt gestartet)

Betrachtet man nun den warm gestarteten WHTC in Abbildung 6.15 sieht man sofort, dass auch hier das ASDS deutlich bessere Werte erzielt. Das Niveau der emittierten Stickoxide ist klarerweise für alle drei betrachteten Fälle niedriger, da die Konvertierung der rohen NO_x schon mit Beginn des Zyklus startet. Im „auto mode“ schafft es das ASDS die NO_x -Menge im Bezug auf die Basismessung sogar zu halbieren. Bei der Betrachtung der „slave mode“-Kalibrierung ist wiederum ein etwas auffälliger Verlauf zu erkennen. Besonders nach Sekunde 1300 erscheint der starke Anstieg der NO_x -Emissionen unplausibel. Nach genauerer Analyse der Messdaten konnte festgestellt werden, dass in allen „slave mode“-Konfigurationen, ein unvorhersehbarer Effekt aufgetreten ist. Dabei wurde die vom Motorsteuergerät vorgegebene Dosiermenge immer auf einen bestimmten Wert begrenzt. Diese Begrenzung auf 133,3 mg/s tritt besonders in den Bereichen höherer Temperaturen auf, weshalb sich die Auswirkungen auch erst in den warmen Zyklen bemerkbar machten. Woher die Limitierung schlussendlich stammt, konnte nicht genau geklärt werden. Nach Absprache mit FPT, die für die Kalibrierungen zuständig waren, wurde aber bestätigt, dass es durchaus möglich ist, dass die Limitierung im Hintergrund der Motor-ECU-Software zu finden sein könnte. In Summe lässt sich aber sagen, dass mit Behebung dieser Limitierung, die NO_x -Emissionen im „slave mode“ verbessert werden würden.

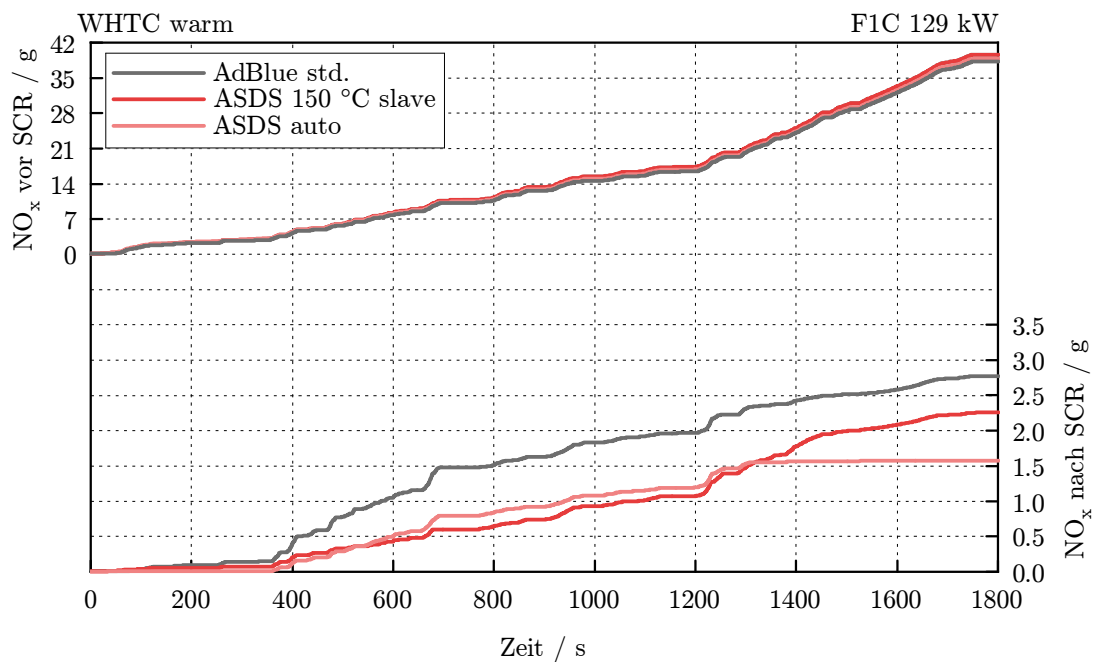


Abbildung 6.15: Kumulierte NO_x -Emissionen vor und nach SCR-Kat (WHTC warm gestartet)

Der abschließende Vergleich wird hier zwischen dem besten erzielbaren Ergebnis für ASDS, das heißt im „auto mode“ zum Standard-AdBlue-System gemacht. Entsprechend Abbildung 6.16 wurden wiederum ganz klar identische Bedingungen eingestellt. Dennoch ergibt sich auch im warmen Zyklus ein absoluter Vorteil des ASDS in einer Höhe von ca. 46 %. Kombiniert und gewichtet nach den Vorgaben der Norm resultiert aus den Werten für den kalten und den warmen WHTC ein spezifischer NO_x -Ausstoß von etwa $0,22 \text{ g/kWh}$ im „auto mode“. Im Vergleich dazu erreicht das AdBlue-System bestenfalls einen Wert von $0,38 \text{ g/kWh}$. Beide Werte liegen klar unter dem geforderten Limit von $0,46 \text{ g/kWh}$, jedoch hat man bei Verwendung des ASDS rund 50 % mehr Abstand zum Grenzwert.

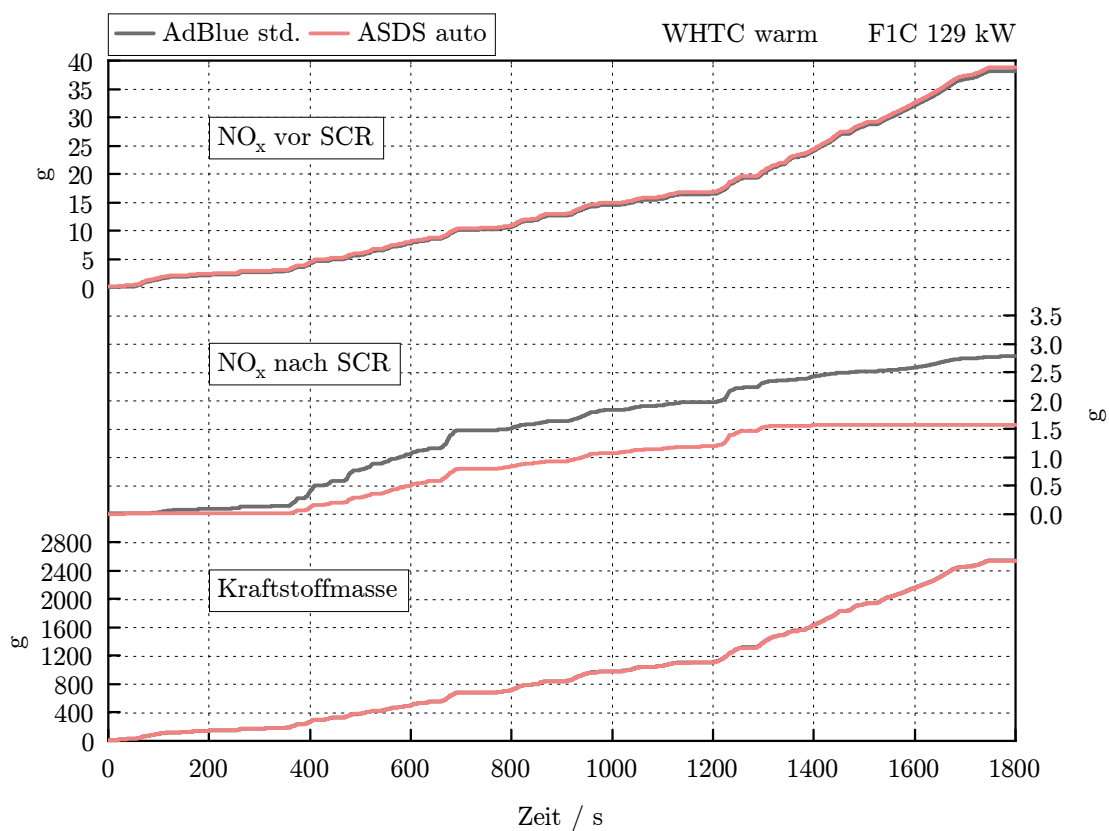


Abbildung 6.16: Vergleich von AdBlue und ASDS (auto mode) anhand NO_x -Emissionen und Kraftstoffverbrauch (WHTC warm gestartet)

In den folgenden Tabellen 6.1 und 6.2 sollen zur besseren Vergleichbarkeit, die wichtigsten Werte aus den obigen Diagrammen noch einmal zusammengefasst werden. In der zweiten Spalte von Tabelle 6.1 sind die spezifischen Werte der Basismessung angeführt. Dazu im Vergleich, sind die Werte der ASDS-Messungen für die beiden Betriebsmodi direkt daneben angeführt. Aus Basiswert und Vergleichswert lässt sich der jeweilige Vorteil des ASDS in Prozent berechnen.

Tabelle 6.1: Wichtigste Werte im Vergleich für den WHTC

Zyklus Start	NO _x AdBlue g/kWh	NO _x ASDS g/kWh	NO _x Vorteil %	ASDS Betrieb
–				–
kalt	1.12	0.80	29	150 °C salve
warm	0.26	0.21	19	150 °C salve
→ gewichtet	0.38	0.28	26	
kalt	1.12	0.72	36	auto
warm	0.26	0.14	46	auto
→ gewichtet	0.38	0.22	42	

EURO VI: WHTC-Grenzwert = 0.46 g/kWh

Ergänzend zu den Verbrauchsbetrachtungen im Kennfeld, kann auch der Verbrauch des Reduktionsmittels im Zyklus dargestellt werden. Tabelle 6.2 zeigt, dass der Verbrauch der Systeme nicht identisch ist. Aus den selben Gründen wie auch in den Kennfeldbetrachtungen (α -Betrachtung) und natürlich entsprechend der Vorverlegung des Dosierstarts, ergibt sich ein höherer Reduktionsmittelverbrauch im Fall des ASDS.

Tabelle 6.2: Reduktionsmittelverbrauch für den WHTC

Zyklus Start	HWL AdBlue g	NH ₃ ASDS g	HWL -Äquivalent (NH ₃ · 5.4) g	ASDS Betrieb
–				–
kalt	50.6	0	0	–
	–	10.71	57.82	150 °C salve
	–	11.21	60.52	auto
warm	72.74	0	0	–
	–	14.02	75.70	150 °C salve
	–	14.59	78.76	auto

Ein guter NO_x -Umsatz im SCR-Katalysator, wie er mit dem ASDS erreichbar ist, bietet die Möglichkeit, andere Maßnahmen zur NO_x -Reduktion zurückzunehmen. Im zweiten Teil der Messungen sollte daher untersucht werden, bis zu welchem Maß die innermotorischen Maßnahmen zur NO_x -Reduktion verringert werden können. Besonders die Reduktion der AGR-Rate stand dabei im Fokus. Des Weiteren können evtl. Katalysator-Heizstrategien aufgrund der ermöglichten niedrigeren Dosiertemperaturen reduziert werden. Eine Reduktion dieser beiden Faktoren hat direkten Einfluss auf den Wirkungsgrad des Motors und somit auf dessen Verbrauch. Ein weiterer positiver Nebeneffekt ist die geringere Rußbelastung von Saugrohr und AGR-System bei Zurücknahme der AGR. Nach dem Ruß- NO_x -Tradeoff steigen dabei die NO_x -Emissionen des Motors an, während die Rußemissionen reduziert werden. Die Modifizierung von AGR-Rate und Einspritzbeginn ergab eine neue Konfiguration der Motorsoftware, die einen geringeren Kraftstoffverbrauch um rund 2% bewirken sollte.

Für diese Untersuchungen wurde wiederum das Standard-AdBlue-System als Basis verwendet, jedoch hier für die 81-kW-Variante des Motors. Das ASDS wurde ausschließlich im „slave mode“ mit früherem Dosierzeitpunkt betrieben.

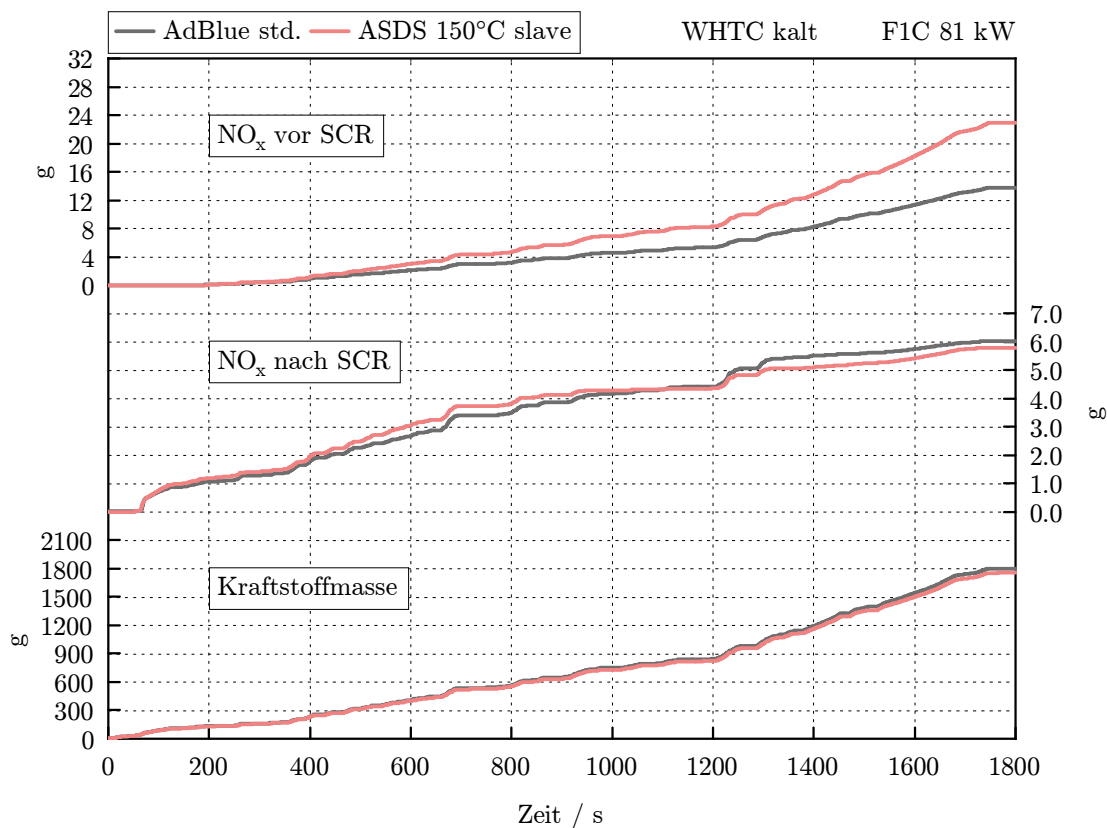


Abbildung 6.17: Kumulierte Werte für NO_x -Emissionen und Verbrauch bei Betriebsstrategie mit reduziertem Kraftstoffverbrauch (WHTC kalt gestartet)

Die Modifikation der zuvor genannten Parameter ist sofort in den vom Motor emittierten Stickoxiden in Abbildung 6.17 und 6.18 zu erkennen. Die gute Performance des ASDS führt dennoch zu NO_x -Emissionen auf Niveau der Basismessung, zumindest im kalt gestarteten WHTC (Abbildung 6.17). Ist das Abgassystem aber auf Betriebstemperatur, so schneidet das ASDS etwas schlechter ab als das AdBlue-System, was in Abbildung 6.18 dargestellt ist. Sowohl im kalten als auch im warmen Zyklus ist aber ein geringerer Verbrauch zu verzeichnen, wie zu erwarten war.

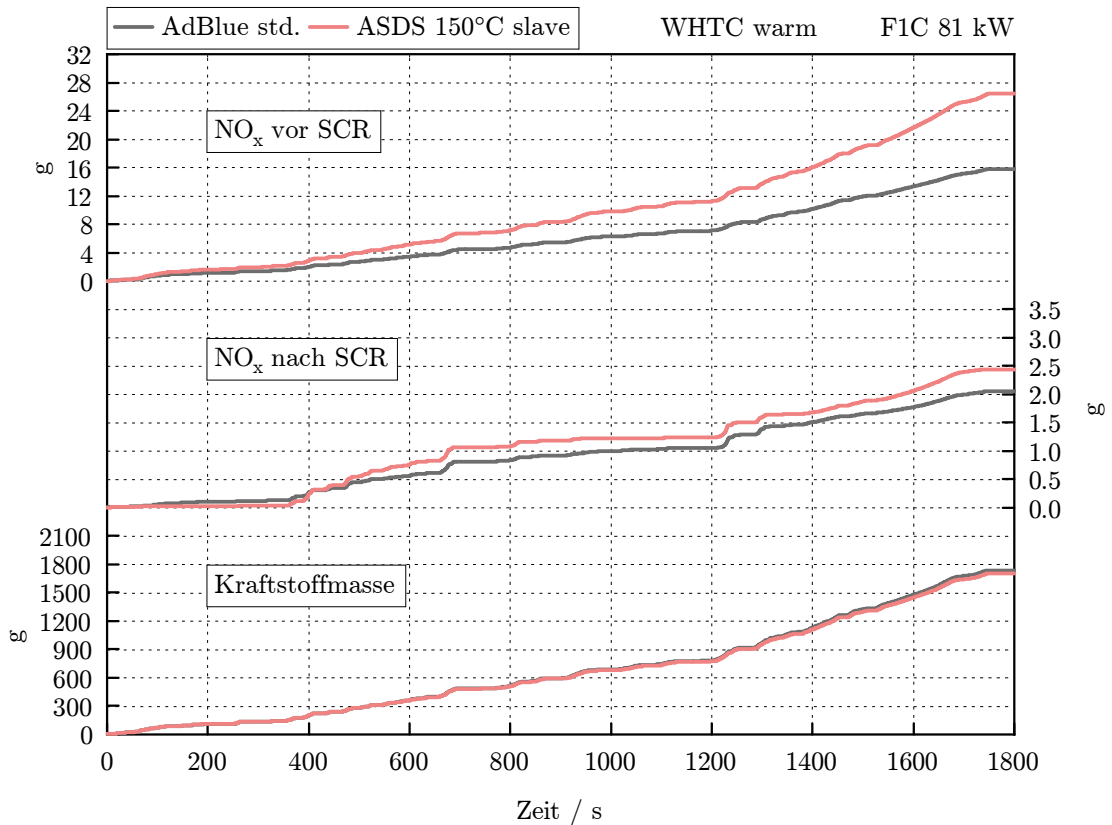


Abbildung 6.18: Kumulierte Werte für NO_x -Emissionen und Verbrauch bei Betriebsstrategie mit reduziertem Kraftstoffverbrauch (WHTC warm gestartet)

Die höheren Emissionen im warmen Zyklus sind nicht mit einer schlechten Funktion des ASDS gleichzusetzen. Entscheidend für die Bewertung ist nämlich auch hier die gewichtete Menge an ausgestoßenen NO_x . Das Ziel war es hier weniger den Basiswert des Standardsystems zu unterbieten, sondern viel mehr, das gesetzte Limit der Gesetzgebung nicht zu überschreiten. Tabelle 6.3 zeigt auch für diesen Fall die wichtigsten Werte im direkten Vergleich.

Tabelle 6.3: Ergebnisse bei ECU-Kalibrierung für reduzierten Kraftstoffverbrauch für den WHTC

Zyklus	NO_x AdBlue	NO_x ASDS	NO_x Vorteil	Kraftstoff- einsparung	ASDS 150 °C slave
Start	g/kWh	g/kWh	%	%	
–					
kalt	0.91	0.71	22	0	normal
warm	0.31	0.22	29	0	normal
gewichtet	0.39	0.28	28	0	
kalt	0.91	0.87	4	2.0	red. Verbrauch
warm	0.31	0.37	–19	2.6	red. Verbrauch
gewichtet	0.39	0.43	–9	2.1	

EURO VI: WHTC-Grenzwert = 0.46 g/kWh

Bei Betrachtung der Werte wird klar, dass das ASDS auch hier sehr gute Arbeit leistet. Der Motor produziert aufgrund der angepassten Steuergerätesoftware rund 67% mehr NO_x als in der Standardkalibrierung. Dennoch ist das ASDS in der Lage den erhöhten Ausstoß an NO_x so weit zu senken, dass der Grenzwert nach EURO VI eingehalten werden kann. Der Einsatz des ASDS führt in diesem Fall zu einer Reduktion des Kraftstoffverbrauchs um 2%.

Zusammengefasst können die Anfangs angenommenen Vorteile des ASDS im WHTC in allen dargestellten Zyklen bestätigt werden. Die höheren Umsatzraten sowohl im kalten als auch im warmen transienten Zyklus bewirken einen größeren Abstand zum aktuellen gesetzlichen Grenzwert. Dieser Puffer kann folglich zur Überarbeitung der Motorbetriebsstrategie herangezogen werden. Maßnahmen die den Wirkungsgrad des Motors, zugunsten besserer Abgaswerte verschlechtern, können um einen großen Teil reduziert werden. Der Motorwirkungsgrad wird angehoben und der Kraftstoffverbrauch sinkt, während die Emissionsgrenzwerte dennoch eingehalten werden. Natürlich muss immer bedacht werden, dass ein Teil des erreichten Puffers der erhöhten Reduktionsmitteldosierung zu verdanken und nicht rein durch die funktionalen Eigenschaften des ASDS zustande gekommen ist. Dennoch bleibt ein Vorteil zum Standardsystem bestehen. In zukünftige Normen werden die Grenzwerte voraussichtlich weiter gesenkt werden. Besonders für die kommenden RDE-Tests (Real Driving Emissions), werden die kalten Phasen des Motorbetriebs einen großen Anteil der gesamten NO_x -Emissionen

einnehmen. Mit den gezeigten Umsatzraten in den kalten WHTC-Zyklen scheint das ASDS auch für kommende Gesetzgebungen sehr vielversprechend.

WHSC

Nach den ersten Untersuchungen im stationären Kennfeld, konnte schon erahnt werden, dass die NO_x -Emissionen im stationären Prüfzyklus relativ gering sein werden. Der WHSC deckt einen Bereich des Kennfeldes ab, in dem mit beiden Systemen, hohe Konvertierungsraten realisierbar sind. Genau dieses Erkenntnis geht auch aus den Ergebnissen in Tabelle 6.4 hervor.

Tabelle 6.4: Ergebnisse der WHSC-Messungen für 81kW-Variante

System	NO_x			Verbrauch		
	vor SCR-Kat g/kWh	nach SCR-Kat ^d g/kWh	Umsatz- rate %	Diesel g	AdBlue g	NH_3 g
AdBlue	2.46	0.17	93	2346	43.3	–
ASDS ^a	2.15	0.07	97	2349	–	8.2
ASDS ^b	2.30	0.07	97	2352	–	7.8
ASDS ^c	4.20	0.08	98	2292	–	15.4

^a slave mode

^b auto mode

^c Kraftstoffverbrauch um ca. 2% reduziert

^d EURO VI: WHSC-Grenzwert = 0.4 g/kWh

Auch in diesem Fall ist bei Verwendung des ASDS ein besseres Ergebnis zu erkennen. Die Umsetzung der NO_x scheint also nicht nur in kalten Phasen besser zu funktionieren, sondern kann auch im heißen WHTC verwirklicht werden. Überraschend ist diese Erkenntnis jedoch nach den Kennfeldbetrachtungen nicht. Aufgrund der hohen Starttemperatur des WHSC ist es nicht relevant ob das ASDS im „slave mode“ oder im „auto mode“ betrieben wird. Der Dosierbeginn ist mit Beginn des Zyklus gleichgesetzt. Einen leichten Vorteil erkennt man im „auto mode“ allerdings trotzdem. Die eingesetzte Menge an NH_3 ist um 5% niedriger, die Konvertierungsrate jedoch höher. Dies zeigt wiederum, dass der Betrieb im „auto mode“ ganz eindeutig die effektivste Variante des ASDS darstellt.

Auch im Fall höherer Roh- NO_x -Emissionen ist die Einhaltung des Limits mit dem ASDS leicht machbar. Der erhöhte Verbrauch an NH_3 muss hier allerdings zu Gunsten der Erhaltung der hohen Konvertierungsrate hingenommen werden.

WNTE

Nach den Richtlinien der Gesetzgebung wurde für den aufgebauten Motor in der 129-kW-Variante, der Bereich des Kennfeldes bestimmt, in welchem die Untersuchungen zum WNTE durchgeführt werden sollten. Der abgegrenzte Bereich wurde in weiterer Folge in neun Zellen aufgeteilt und jeder Zelle wurden jeweils fünf Punkte zugewiesen. Wie die Punkte ausgewählt werden, ist laut Gesetzgebung dem Prüfer überlassen und passiert daher willkürlich. Bei Typprüfverfahren wird allerdings darauf geachtet, dass diese Punkte gleichmäßig in den Zellen verteilt werden, um einen möglichst großen Bereich abzudecken. Abbildung 6.19 zeigt das Raster und die Verteilung der Punkte speziell in diesem Fall. Die Nummerierung der Zellen entspricht dabei auch der Reihenfolge, in der diese vermessen wurden. Wichtig ist hier, dass jede Zelle vollständig abgefahren wird, bevor man in eine andere wechselt.

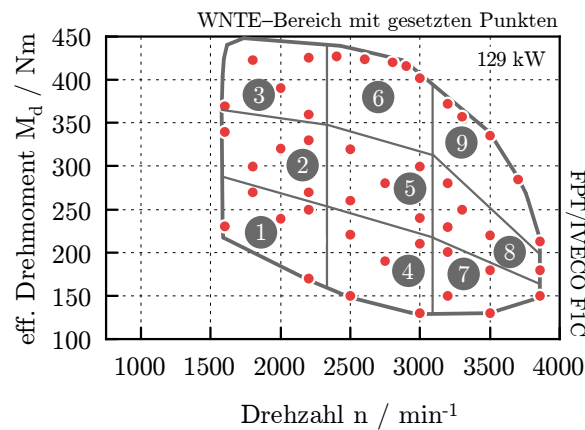


Abbildung 6.19: Verteilung der Punkte im WNTE-Bereich

Auffällig ist hier auch, dass viele Punkte an der Vollastkurve bzw. sehr nahe dazu gewählt wurden. Eine solche Verteilung wäre im Falle einer Typprüfung keineswegs sinnvoll, jedoch sollte damit veranschaulicht werden, wie die beiden SCR-Systeme in diesen extremen Punkten arbeiten und ob sie die Grenzwerte des WNTE auch in diesem Fall einhalten. Für NO_x werden $0,6 \text{ g/kWh}$ vorgeschrieben. Der Wert gilt immer für jeweils eine Zelle, das heißt für den Mittelwert aus den fünf gewählten Punkten. Erfüllt sind die Anforderungen des WNTE dann, wenn der Grenzwert in drei beliebig gewählten Zellen, nicht überschritten wird.

Um dies zu untersuchen wurden in einem automatisierten Ablauf, alle Zellen abgefahren. Die Ergebnisse für die einzelnen Zellen sind in den folgenden Abbildungen zu finden.

Abbildung 6.20 zeigt auch hier eine bessere Performance des ASDS. Die Überschreitung des Limits in einigen der Zellen lässt sich hier auf zwei unterschiedliche Effekte zurückführen. Im Fall von Zelle 9 ist die Überschreitung eindeutig auf die Positionierung der Punkte zurückzuführen. Der Betrieb entlang der Vollastlinie ist in Realität jedoch

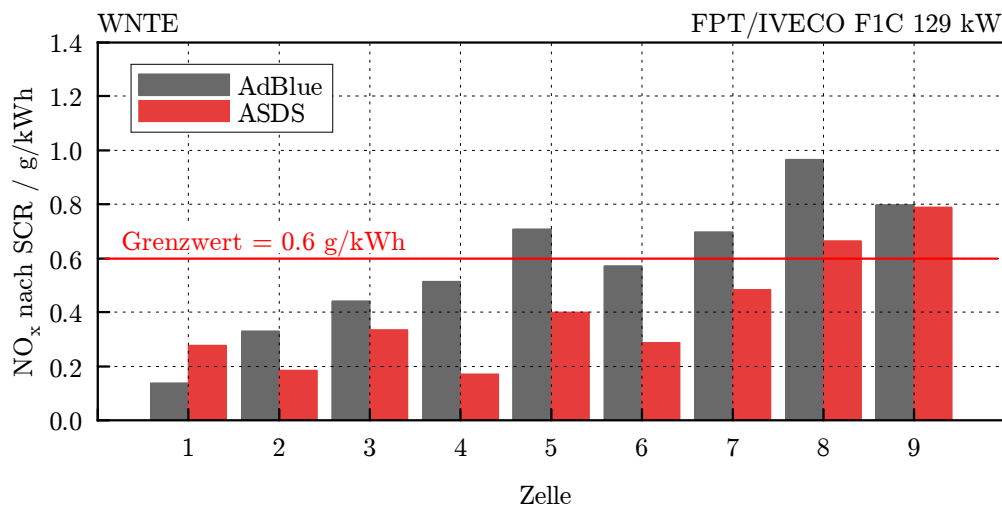


Abbildung 6.20: NO_x-Emissionen für die einzelnen Zellen des WNTTE

eher ein Ausnahmefall, weswegen eine solche Punkteverteilung im Typprüfverfahren ziemlich unwahrscheinlich ist. Erstaunlich ist, dass für Zelle 6, in der ähnliche Zustände zu erwarten sind, die Werte unter dem Limit zu liegen kommen. Ebenfalls wird das Limit in Zelle 5 und im Fall des AdBlue-Systems überschritten. Beides kam durch den selben Effekt zustande. Waren die Temperatursprünge zwischen dem letzten Punkt der vorhergehenden Zelle, und dem ersten Punkt der folgenden Zelle hoch, wurden in den ersten beiden Punkten der folgenden Zelle, sehr niedrige NO_x-Emissionen gemessen. Unter Anderem spielte hier die Beladung des SCR-Kats mit Ammoniak eine wichtige Rolle, welcher in den niedrigen Lastpunkten mit NH₃ angereichert wurde. Speziell für den Fall der Zelle 6 bedeutete das niedrige NO_x-Werte, bei hohen Leistungen. Im Mittel ergibt sich für diese Zelle somit ein Wert, der unter dem Limit liegt. Umgekehrt sind in Zelle 5 für alle Punkte, ähnliche NO_x-Emissionen und Leistungen zu verzeichnen. Auch wenn die emittierten NO_x in g/h für Zelle 5 und 6 in gleichem Ausmaß auftreten, ist die gemittelte Leistung in Zelle 5 um die Hälfte geringer. Für Zelle 7 und 8 scheint die hohe Drehzahl und die daraus resultierende, zu kurze Verweilzeit der Schadstoffe im Katalysator, die beste Erklärung zu sein, warum hier die Grenzwerte nicht eingehalten werden können.

Abbildung 6.21 soll auch für die Untersuchungen im WNTTE, die verbrauchten Mengen für beide Reduktionsmittel aufzeigen. In erster Linie soll dies verdeutlichen, dass hier die besseren Umsatzraten des ASDS, nicht auf einen übermäßigen Mehrverbrauch an Reduktionsmittel zurückzuführen sind, sondern auf dessen funktionale Eigenschaften.

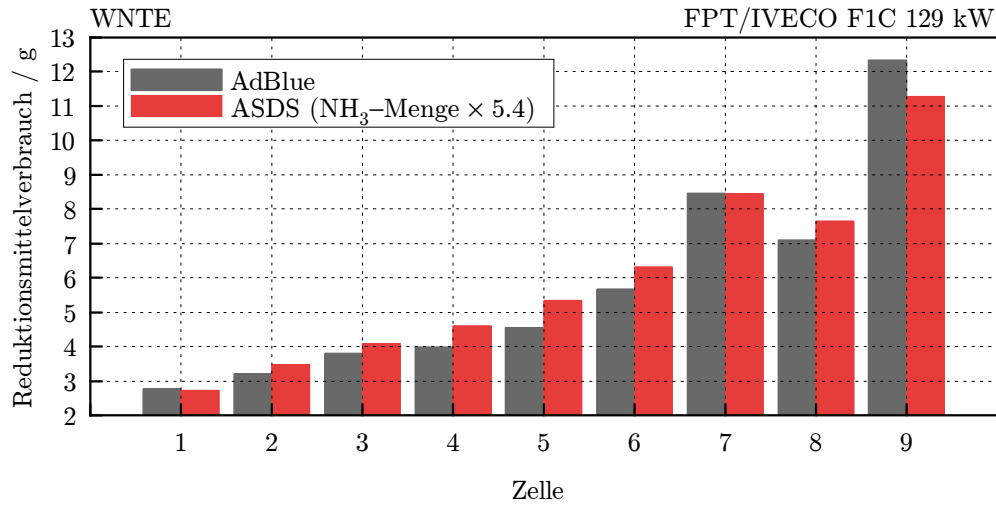


Abbildung 6.21: Verbrauch von Reduktionsmittel für die einzelnen Zellen

Die Performance des ASDS ist im WNTe überaus zufriedenstellend, vor allem im direkten Vergleich zum AdBlue-System. Die nicht erreichten Grenzwerte für einige Zellen, sind mit der Verteilung der Punkte und der gewählten Reihenfolge der Zellen zu begründen. Durch geeignete Anpassung dieser beiden Variablen könnten die Emissionsgrenzwerte vermutlich eingehalten werden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Masterarbeit war es, ein alternatives NH_3 -Speicher- und Dosiersystem für die SCR-Anlage eines Nutzfahrzeuges zu untersuchen und dieses mit dem derzeitigen Standard-AdBlue-System zu vergleichen. Die alternative Form der NH_3 -Speicherung und Bereitstellung verspricht in der Theorie deutliche Vorteile gegenüber dem AdBlue-System, vor allem in den kalten Betriebsphasen des Motors. Diese theoretische Annahme galt es am Prüfstand, in einem simulierten Realbetrieb, zu untersuchen.

Für den direkten Vergleich wurden beide Systeme sowohl im stationären Kennfeldbetrieb als auch in den derzeit gültigen Typprüfzyklen für Nutzfahrzeuge vermessen. Um aussagekräftige Vergleiche anstellen zu können, musste besonders auf die Einhaltung gegebener Randbedingungen geachtet werden.

Die stationären Kennfeldbetrachtungen zeigten einen eindeutigen Vorteil der neuen Methode. Bei gleichen Randbedingungen waren im gesamten Kennfeld deutlich bessere Umsatzraten realisierbar. Speziell im Teillastbereich können in einem beliebig gewählten Punkt, etwa bei 1500 min^{-1} und 4 bar effektivem Mitteldruck im Fall des ASDS Umsatzraten von 99 % beobachtet werden, während das AdBlue-System im selben Punkt unterhalb der 50 % Linie zu liegen kommt.

Besonders im kalten Teil des dynamischen WHTC zeigte das ASDS seine Vorzüge. Aufgrund nicht benötigter NH_3 -Erzeugungsmechanismen, konnte die Zudosierung des Reduktionsmittels im kalten WHTC schon deutlich früher erfolgen. Dadurch wurde die NO_x -Umsetzung früher in Gang gesetzt, als es mit dem AdBlue-System möglich ist, woraus natürlich niedrigere NO_x -Emissionen resultieren. In dem darauf folgenden warm gestarteten WHTC wurde dieser anfängliche Vorteil noch weiter ausgebaut. Gewichtet nach den Vorgaben der Norm, ergab sich für das ASDS im dynamischen Teil der Typprüfung ein NO_x -Vorteil von ca. 40 % im Vergleich zum Standardsystem, wobei hier die AdBlue-äquivalente zudosierte Menge um etwa 10 % höher war.

Die Auswertung der stationären Zyklen, also WHSC und WNTE, zeigte ebenfalls eine bessere Performance des ASDS. Zwar schneidet das AdBlue-System im WHSC ebenfalls sehr gut ab, aber das ASDS erzielt auch hier einen Vorteil. Mit dem ASDS ist im WHSC eine Halbierung der im AdBlue-Fall ausgestoßenen NO_x möglich. Im Bereich des WNTE sind die NO_x -Emissionen im Fall des ASDS in acht von neun Zellen niedriger. Eine etwas ungünstige Wahl der Reihenfolge und Verteilung der Punkte, sorgte in machen Zellen zur Überschreitung des Grenzwertes.

In Summe ergibt sich für die betrachteten Fälle und in der untersuchten Konfiguration ein klarer Vorteil des ASDS im Vergleich zum Standardsystem. Der dadurch vergrößerte Spielraum zwischen tatsächlichen NO_x -Emissionen und den vorgeschriebenen Grenzwerten, ermöglicht eine Verlagerung der NO_x -Reduktion auf das Abgasnachbehandlungssystem. Innermotorische Maßnahmen zur Minderung von Stickoxiden können somit verringert werden. In weiterer Folge bedeutet das bessere Motorwirkungsgrade und einen geringeren Kraftstoffverbrauch. Mit Hinblick auf zukünftige Abgasgesetzgebungen hat das ASDS noch bedeutendes Potenzial.

Literaturverzeichnis

- [1] Eichlseder, H.: „*Verbrennungskraftmaschinen Vertiefte Ausbildung*“, Vorlesungsskriptum, TU Graz, 2013
- [2] Hausberger, S., Sams, T.: „*Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei KFZ*“, Vorlesungsskriptum, TU Graz, 2012
- [3] Käfer, S.: „*Trokenharnstoff-SCR-System und Betriebsstrategie für Fahrzeuge mit Dieselmotor*“, Dissertation, Kaiserslautern, 2004
- [4] Lacroix, A.: „*Untersuchung eines Harnstoff-SCR-Systems zur Stickoxidminderung im Diesel-PKW-Praxiseinsatz*“, Dissertation, Kaiserslautern, 2005
- [5] Merker, G.P., Teichmann R.: „*Grundlagen Verbrennungsmotoren*“, Springer-Vieweg, 7. Auflage, 2014, ISBN 978-3-658-03194-7
- [6] UNECE Regulation No.49: „*Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression ignition engines and positive ignition engines for use in vehicles*“, Addendum 48, 2013, www.unece.org
- [7] Walz, C.: „*NO_x-Minderung nach dem SCR-Verfahren: Untersuchungen zum Einfluss des NO₂-Anteils*“, Dissertation, Karlsruhe, 2000
- [8] Wimmer, A.: „*Motorenmesstechnik*“, Vorlesungsskriptum, TU Graz, 2011
- [9] FPT/IVECO: „*EURO VI Technologies & Strategies*“, <http://ibb.iveco.com/Lists/Markets/Attachments/59/EURO\%20VI.pdf> (22.08.2016)