



Martin Fabiani

***Evaluierung der Mess- und Auswertemethodik
zur Abnahme eines
Multifunktions-Abgasrollenprüfstandes***

Diplomarbeit

Studienrichtung Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

Technische Universität Graz

Fakultät für Maschinenbau und Wirtschaftswissenschaften

Begutachter: Ao.Univ.-Prof. Dr. Stefan Hausberger
Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik

Graz, 2011

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

EIDESSTÄTLICHE ERKLÄRUNG

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

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 marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

VORWORT

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Diplomand und in weiterer Folge als Mitarbeiter bei Magna Steyr in der Abteilung für Motorapplikation im Zeitraum von August 2009 bis Juni 2011.

Das in dieser Arbeit untersuchte Prüfzentrum, befand sich zu Beginn meiner Untersuchungen im Ende der Bauphase, und so wurde es mir ermöglicht, von der ersten Rollendrehung über den ersten Abgastest bis hin zur offiziellen Eröffnung im Oktober 2010 Teil des Teams zu sein und aktiv am Entstehen mitzuwirken. Durch diese Chance ein System dieser Komplexität während der gesamten Phase der Inbetriebnahme begleiten zu können, durfte ich ganz besondere Erfahrungen sammeln für die ich sehr dankbar bin.

Nicht zuletzt dank der hervorragende Unterstützung durch meine Betreuer, Dr. Mario Ivanisin bei Magna Steyr und Prof. Stefan Hausberger von Seiten der TU Graz, konnte ich einen guten Einblick in die mir bis zu diesem Zeitpunkt noch wenig bekannte Welt der Abgasmesstechnik und Prüfstandstechnik erhalten und die Erkenntnisse durch eigene Erfahrungen am Prüfstand intensivieren und ausbauen. An dieser Stelle richtet sich mein Dank auch an Dr. Franz Kampelmühler, Leiter der Abteilung für Motorapplikation, der mich immer mit Rat und Tat unterstützte.

Besonderer Dank gilt auch meinen Eltern die mir das Studium überhaupt erst ermöglicht haben, sowie meiner Freundin Verena, die mir während der langen Zeit eine große Stütze war und immer Verständnis dafür aufbrachte, wenn ich meine Wochenenden mit Schreiben verbrachte.

ZUSAMMENFASSUNG

Bestmögliche Umsetzung von Energie, das Streben nach alternativen Antrieben sowie die Reduktion von Schadstoffemissionen sind bedeutende Eckpunkte der heutigen Fahrzeugentwicklung. Um diesen Anforderungen auf hohem Niveau gerecht zu werden, wurde im Jahr 2009 bei Magna Steyr in Graz das Prüfzentrum GAAZ¹, welches in dieser Arbeit untersucht wird, realisiert und in Betrieb genommen.

Ziel dieser Arbeit ist es, Methoden zur Evaluierung der Funktion der Anlage anzuwenden, diese weiterzuentwickeln und die Ergebnisse zu bewerten, wobei hier der Fokus auf die Abgasmesstechnik und die Fahrwiderstandssimulation auf dem Rollenprüfstand gelegt wird. Einleitend werden in einem theoretischen Teil die Grundlagen der Verbrennung, die Abgasentstehung sowie dessen Nachbehandlung behandelt. Darauf folgt die Beschreibung der untersuchten Anlage und im Speziellen der Abgasmesstechnik in ihren einzelnen Komponenten. Im praktischen Teil werden zu Beginn die Fahrwiderstände in Ausrollversuchen ermittelt, diese auf dem Rollenprüfstand verifiziert und als Basis für die darauf folgenden Abgastests verwendet. Bei den Abgastests wird die Korrelation der einzelnen Messlinien zueinander untersucht und die Reproduzierbarkeit der Tests bewertet. In einem Ringversuch wird die Anlage mit anderen Prüfzentren verglichen.

ABSTRACT

Effective use of energy, the pursuit of alternative drive trains and the reduction of emissions are important cornerstones of today's vehicle development. In order to meet the highest standards the test center GAAZ was established in 2009 at Magna Steyr in Graz. This work aims to find methods to evaluate the system's operation - apply those methods and evaluate the results. The focus lies on the exhaust gas measurement and the road load simulation on the dynamometer. For this purpose the introduction contains a theoretical section on the basics of combustion, the gas formation and its treatment. This is followed by a discussion of the system and in particular the exhaust gas measurement system. The practical part starts determining the driving resistances using coast down tests which are then verified on the chassis dynamometer. In the subsequent exhaust gas test, the correlation of the individual measuring lines to one another is examined and the reproducibility of the tests is evaluated. In a round robin test the system is compared with other test beds.

¹ GAAZ – Gesamtfahrzeug Antriebs Applikations Zentrum

1	Einleitung	5
2	Theoretische Grundlagen	6
2.1	Verbrennung	6
2.2	Entstehung von Schadstoffen	9
2.2.1	<i>Schadstoffentstehung bei Ottomotoren</i>	10
2.2.2	<i>Schadstoffentstehung bei Dieselmotoren</i>	13
2.3	Innermotorische Reduzierung von Schadstoffen.....	15
2.3.1	<i>Ottomotoren</i>	15
2.3.2	<i>Dieselmotoren</i>	18
2.4	Abgasnachbehandlung	19
2.4.1	<i>Ottomotoren</i>	19
2.4.2	<i>Dieselmotoren</i>	19
2.5	Abgasgesetzgebung	24
2.5.1	<i>Gesetzgebung Europa (70/220/EG)</i>	25
2.5.2	<i>Vorschrift zur Durchführung eines NEDC Abgastests (Typ I Prüfung)</i>	26
2.5.3	<i>US- Gesetzgebung (§ 86 CFR)</i>	28
3	Messtechnik/ Anlagen	29
3.1	Vorstellung des Prüfzentrums GAAZ	29
3.1.1	<i>Rollenprüfstand</i>	30
3.1.2	<i>Abgasmesstechnik</i>	31
3.1.3	<i>Klimatisierung Prüfkammer</i>	32
3.1.4	<i>Fahrwindgebläse</i>	33
3.1.5	<i>Sonnensimulation</i>	33
3.2	Allgemeine Vorbereitung der Versuchsträger	34
3.3	Abgasmesstechnik	34
3.3.1	<i>Messen des verdünnten Abgases</i>	34
3.3.2	<i>Kontinuierliche Messung des Rohabgases</i>	38
3.3.3	<i>Abgasanalytoren</i>	40
3.3.4	<i>Bestimmung von Partikelemissionen</i>	47
4	Methodik	50
4.1	Methodik der Erfassung des Fahrwiderstandes – Der Ausrollversuch.....	50
4.1.1	<i>Grundlagen der Fahrwiderstandsmessung</i>	50
4.1.2	<i>Vorschriften zur Durchführung von Ausrollversuchen</i>	52

4.1.3	<i>Korrektur auf Referenzbedingungen</i>	53
4.1.4	<i>Praktische Durchführung von Ausrollversuchen</i>	55
4.1.5	<i>Auswertung der Ausrollversuche</i>	57
4.2	Überprüfung des Fahrwiderstandes am Prüfstand	59
4.2.1	<i>Verbrauchsmessung bei Konstantfahrt</i>	59
4.2.2	<i>Massensimulation bei Vollastbeschleunigung</i>	61
4.3	Methodik der Abgasuntersuchungen	64
4.3.1	<i>Überprüfung der Feuchtekorekturen</i>	66
4.3.2	<i>Methoden zur Ermittlung der Totzeiten</i>	70
4.3.3	<i>Ermittlung der Massenemission bei Rohabgasanalyse</i>	72
4.3.4	<i>Ermittlung der Massenemissionen bei verdünnter Beutelmessung</i>	75
4.3.5	<i>Ermittlung der Massenemissionen bei verdünnter Modalanalyse</i>	77
5	Ergebnisse der Untersuchungen	78
5.1	Ergebnisse der Fahrwiderstandsuntersuchungen	78
5.1.1	<i>Ergebnisse der Ausrollversuche</i>	78
5.1.2	<i>Ergebnisse der Verbrauchsmessungen bei Konstantfahrten</i>	81
5.1.3	<i>Ergebnisse der Vollastbeschleunigungen</i>	82
5.2	Ergebnisse der Abgasuntersuchungen	83
5.3	Reproduzierbarkeit der Testergebnisse.....	89
5.4	Ringversuch	91
5.5	Diskussion der Ergebnisse	92
5.6	Ausblick	94
6	Anhang	101

1 Einleitung

Die Forderung nach sauberen und sparsamen Autos in Verbindung mit dem Wunsch nach Leistung und Komfort bei gleichzeitig kurzen Entwicklungszeiten und kleinem Preis, machen Veränderungen in den Entwicklungsabläufen nötig. Viele Prozesse werden bereits durch Simulation beschleunigt und verkürzt, jedoch sind Tests mit Einzelkomponenten und Prototypen nach wie vor unerlässlich. Ein immer größer werdender Teil dieser Tests wird jedoch nicht mehr auf Teststrecken oder öffentlichen Straßen durchgeführt, sondern auf Rollenprüfständen. Mit Hilfe solcher Prüfeinrichtungen ist es möglich, Straßenfahrt selbst unter verschiedenen klimatischen Bedingungen zu simulieren. Durch den stationären Aufbau lassen sich dabei sämtliche Größen wie Temperaturen, Kräfte, Drücke und auch Abgaszusammensetzungen messen.

Das in den letzten Jahren verstärkte Verantwortungsbewusstsein der Bevölkerung für Umweltschutz spiegelt sich auch in den strengeren Abgasgesetzgebungen wider. Die immer geringeren Grenzwerte führen zu immer geringeren Schadstoffkonzentrationen im Abgas was gleichzeitig hohe Anforderungen an die Messtechnik stellt.

Der Fokus dieser Arbeit ist auf die Abgasmesstechnik und die Fahrwiderstandsermittlung sowie deren Simulation auf der Rolle gerichtet. Einführend werden hierbei die Grundlagen der Verbrennung behandelt, um sich in weiter Folge näher in die dieselmotorische und ottomotorische Abgasentstehung und deren innermotorische Reduktion sowie Nachbehandlung zu vertiefen. Die Übersicht über die verschiedenen Abgasgesetzgebungen und die detaillierte Darstellung der europäischen Gesetzgebung dienen als Basis für die im praktischen Teil durchgeführten Untersuchungen.

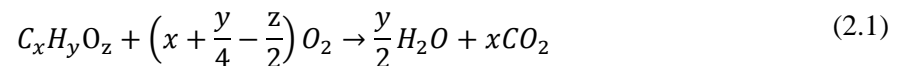
Für die Durchführung von Versuchen auf einem Rollenprüfstand ist es nötig, die fahrzeugspezifischen Fahrwiderstände zu kennen. Zu diesem Zweck werden Ausrollversuche durchgeführt und ausgewertet. Die so erhaltenen Fahrwiderstände sollen am Rollenprüfstand über den Vergleich von Motorsteuergerätedaten verifiziert werden. Daraufhin wird ein Auswerteschema (Basis IVANISIN) weiterentwickelt, mit dessen Hilfe die Ergebnisse der Systemauswertung der Abgasmesstechnik überprüft werden sollen. Des Weiteren werden die einzelnen Abgasmesslinien miteinander verglichen und die Ergebnisse bewertet.

2 Theoretische Grundlagen

2.1 Verbrennung

Die vollständige Verbrennung

Der größte Teil der zurzeit verkauften Fahrzeuge wird mit Verbrennungsmotoren betrieben, welche nach dem Otto- oder Dieselpinzip funktionieren. Otto- und Dieselpinzip sind im wesentlichen Rohöldestillate. Diese Destillate sind Gemische unterschiedlicher Kohlenwasserstoffe (Paraffine, Olefine, Naphthene, Aromate etc.), welche nach der Raffination noch verfeinert und mit Additiven versehen werden, um die gewünschten Eigenschaften zu erzielen. Diese Zusammensetzung des Kraftstoffes hat Einfluss auf die Verbrennung und die Abgasnachbehandlung, auf die in Kapitel 2.4 genauer eingegangen wird. Allgemein gilt, dass als Produkt der vollständigen Verbrennung eines auf Kohlenstoff basierenden Kraftstoffes unter Zuführung von Sauerstoff CO_2 entsteht.



Aus dieser Bilanz ist ersichtlich, dass Kohlendioxid kein Schadstoff ist, sondern Produkt der idealen Verbrennung. Somit ist der Ausstoß von Kohlendioxid direkt proportional dem Kraftstoffverbrauch und kann nicht durch Abgasnachbehandlung oder Verbrennungsgestaltung reduziert werden (BOSCH 2005). Eine Senkung ist somit nur durch die Reduktion des Kraftstoffverbrauchs oder durch Verwendung von Kraftstoffen mit weniger gebundenem Kohlenstoff möglich. Bei Verbrennungsmotoren erfolgt die Verbrennung mit Umgebungsluft wodurch die Reaktionsgleichung erweitert werden muss:

<i>Bestandteil</i>	<i>Konzentration</i>
Stickstoff (N ₂)	78,084 %
Sauerstoff (O ₂)	20,946 %
Argon (Ar)	0,934 %
Kohlendioxid (CO ₂)	360 ppm
Neon (Ne)	18,18 ppm
Helium (He)	5,24 ppm
Methan (CH ₄)	1,6 ppm
∑ Krypton, H ₂ , N ₂ O, Xenon	~2 ppm

Tabelle 1: Zusammensetzung der Luft (MÖLLER 2003)

Wie aus Tabelle 1 ersichtlich wird, kann man auf Grund der volumetrischen Dominanz die Umgebungsluft auf N₂, O₂ und Ar vereinfachen, wobei die 0,934% Argon wegen ähnlicher Stoffeigenschaften dem Stickstoff zugezählt werden.

$$21 \% O_2 + 79 \% N_2 \quad (2.2)$$

Daraus kann der für vollständige Verbrennung bei stöchiometrischen Bedingungen notwendige Luftbedarf errechnet werden.

$$L_{st} = \frac{1}{0,21} O_{st} = 4,76 O_{2\ st} \quad (2.3)$$

Hierbei ist L_{st} der stöchiometrische Luftbedarf in kmol je kg Brennstoff und $O_{2\ st}$ der stöchiometrische Sauerstoffbedarf in kmol je kg Brennstoff. Als Luftzahl Lambda bezeichnet man das Verhältnis von zugeführter Luft zum theoretischen Luftbedarf.

$$\lambda = \frac{\text{zugeführte Luftmenge}}{\text{theoretischer Luftbedarf}} \quad (2.4)$$

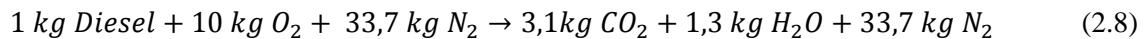
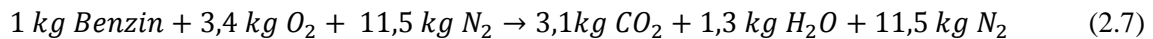
Bei $\lambda=1$ spricht man von stöchiometrischem Verhältnis, darunter ($\lambda < 1$) von fettem Gemisch und darüber ($\lambda > 1$) von magerem Gemisch. Wird der stöchiometrische Sauerstoff beziehungsweise Luftbedarf auf ein kmol Brennstoff bezogen, ergeben sich folgende Zusammenhänge.

$$O_{2\ st} = \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \frac{\text{kmol } O_2}{\text{kmol } B} \quad \text{bzw.} \quad L_{st} = 4,76 \left(x + \frac{y}{4} - \frac{z}{2}\right) \frac{\text{kmol } L}{\text{kmol } B} \quad (2.5)$$

Da meist nur die Massenanteile der einzelnen Kraftstoffkomponenten bekannt sind, ist es oft sinnvoller, den Luftbedarf auf ein kg Brennstoff zu beziehen (BAEHR 1981).

$$L_{st} = 137,8 \left(\frac{c}{12,01} + \frac{h}{4,032} + \frac{s}{32,06} - \frac{o}{32,00}\right) \frac{\text{kg } L}{\text{kg } B} \quad (2.6)$$

Unter der Annahme, dass Ottomotorische Verbrennung bei $\lambda = 1$ und Dieselmotorische Verbrennung bei $\lambda \approx 3$ stattfindet, kann man eine Massenbilanz für die Verbrennung von Diesel- und Ottokraftstoff aufstellen.



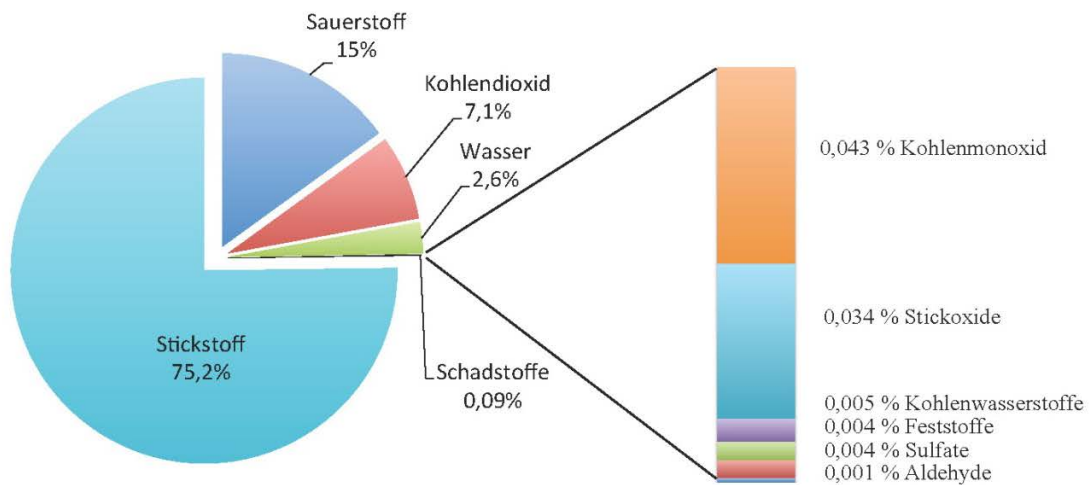
<i>Kraftstoff</i>	<i>Dichte [kg/l]</i>	<i>C Gew-%</i>	<i>H Gew-%</i>
Otto Super	0,745	85,8	14,2
Diesel	0,83	86,4	13,1

Tabelle 2: Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt handelsüblicher Kraftstoffe (KLINGENBERG 1995)

Der Stickstoffanteil der Luft nimmt an der Verbrennung als passive, Wärme entziehende Masse teil und findet sich daher unverändert im Endprodukt wieder. Bei der motorischen Verbrennung entstehen neben den Komponenten der vollständigen Verbrennung auch immer Komponenten der unvollständigen Verbrennung. Diese bilden sich durch globale oder lokale Regionen fetten Gemisches. Solche Luftmangelregionen können beispielsweise durch unvollständige Durchmischung des Kraftstoff-Luftgemisches, durch bewusste Anfettung oder auch durch Flammauslöschung entstehen. Typische Produkte unvollständiger Verbrennung sind CO und HC (KLINGENBERG 1995).

2.2 Entstehung von Schadstoffen

PKW-Dieselmotor im Teillastbereich



PKW-Ottomotor im Betrieb mit $\lambda=1$

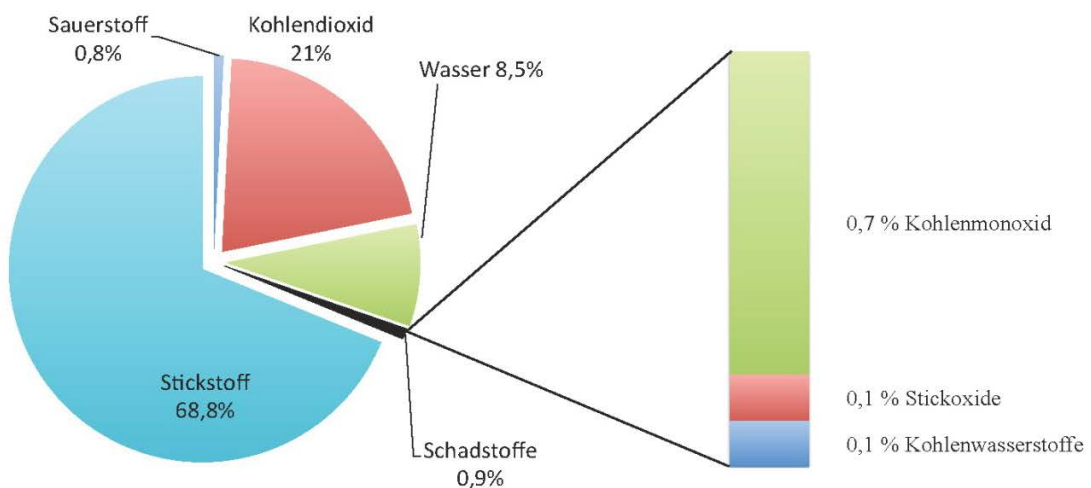


Abbildung 2.1: Zusammensetzung des Rohabgases von Verbrennungsmotoren ohne Abgasnachbehandlung (BOSCH 2002)

- *Kohlendioxid (CO₂)*

Wie einleitend beschrieben, zählt CO₂ nicht zu den Schadstoffen, sondern ist das Produkt der idealen Verbrennung von kohlenwasserstoffhaltigen Kraftstoffen. Die CO₂ Emission ist primär abhängig vom Kraftstoffverbrauch und dem im Kraftstoff gebundenen Kohlenstoff. Eine Verringerung der CO₂ Emission bei einem Fahrzeug ist beispielsweise durch Erhöhung des motorischen Wirkungsgrades, eine Veränderung der Kraftstoffzusammensetzung oder

eine Verringerung des Leistungsbedarfs durch Reduzierung des Fahrzeuggewichts möglich, nicht aber durch Abgasnachbehandlung.

Wie in **Abbildung 2.1** zu sehen ist, besteht das Abgas von Verbrennungsmotoren zum überwiegenden Teil aus Stickstoff. Die limitierten Abgaskomponenten machen bei Ottomotoren nur rund 1% und bei Dieselmotoren 0,1% aus (BOSCH 2002). Im Folgenden soll dieser Anteil des Abgases genauer betrachtet werden. Auch wenn die Entstehung der Schadstoffe bei unterschiedlichen Motorkonzepten oft ähnlichen Mustern folgt, ist es sinnvoll, hier aufgrund der unterschiedlichen Verbrennungsbedingungen zumindest eine Unterscheidung in Diesel- und Ottomotoren zu treffen, wenngleich deren Grenzen durch neue Brennverfahren wie Otto-Direkteinspritzung oder HCCI immer näher aneinander liegen.

2.2.1 Schadstoffentstehung bei Ottomotoren

Charakteristisch für ottomotorische Verbrennung ist die Fremdzündung von Kraftstoff-Luftgemisch mit annähernd konstantem Kraftstoff-Luftverhältnis λ , bei Verdichtungsverhältnis ε von 8 bis 14 (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005).

Bei Ottomotoren zählen folgende Schadstoffe zu den limitierten Abgaskomponenten:

- *Kohlenmonoxid (CO)*

Kohlenmonoxid ist ein farb- und geruchloses Atemgift, welches als Zwischenprodukt der Kohlendioxidbildung und bei unvollständiger Verbrennung unter Sauerstoffmangel entsteht. Im Luftmangelbereich ist die CO-Konzentration nahezu linear abhängig vom Luft-Kraftstoffverhältnis, im Luftüberschussbereich hingegen - unabhängig von λ - gering. Hier kann es durch Dissoziation von CO_2 zu CO und O_2 zur Bildung von Kohlenmonoxid kommen. Während der Verbrennung ist die CO-Konzentration am höchsten. Teilweise oxidiert Kohlenmonoxid während der anschließenden Expansion durch die Reduktion von Wasserdampf zu CO_2 . Diese Reaktion verlangsamt sich aber mit sinkender Ladungstemperatur, bis sie ganz einfriert.



Kohlenmonoxid verringert beim Menschen die Sauerstoffaufnahme-fähigkeit des Blutes und führt daher zu einer Vergiftung des Körpers (BOSCH 2005).

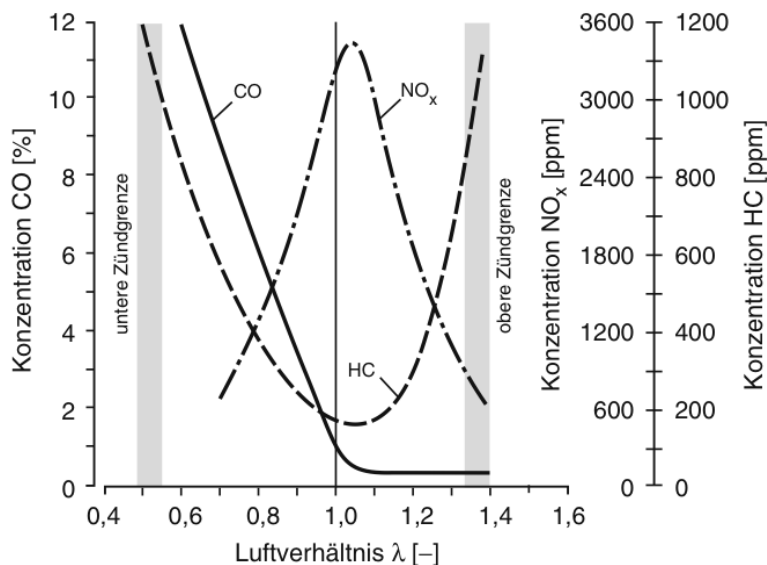


Abbildung 2.2: Schadstoffemission im Abgas von Ottomotoren (Grafik: EICHLSEDER et al. 2008)

- *Kohlenwasserstoffe (HC)*

Kohlenwasserstoffe entstehen in erster Linie durch unvollständige Umsetzung der HC-Verbindungen des Kraftstoffes. Gründe hierfür können die Speicherung des Kraftstoffes im Schmieröl an den Brennraumwänden oder Flammauslöschungen sein. Zu Letzteren kann es einerseits kommen wenn die Flamme in die Nähe der kalten Brennraumwand gelangt („Wall-Quenching“), oder andererseits wenn der Reaktionsmechanismus durch Ladungsbewegung oder Bedingungen der lokalen Gemischzusammensetzung abbricht (EICHLSEDER *et al.* 2008). Unter bestimmten Bedingungen (z.B. das Aufbrechen von langen Molekülketten) können so Kohlenwasserstoffverbindungen entstehen, die im Kraftstoff ursprünglich nicht vorhanden waren (BOSCH 2005). **Abbildung 2.3** zeigt, dass neben den genannten Mechanismen insbesondere die für die Flammenfront schwer erreichbaren Stellen des Brennraums, wie zum Beispiel Spalten an den Kolbenringen oder an den Ventilsitzen stark zur HC-Bildung beitragen, da hier unverbrannte Kraftstoffreste zurückbleiben.

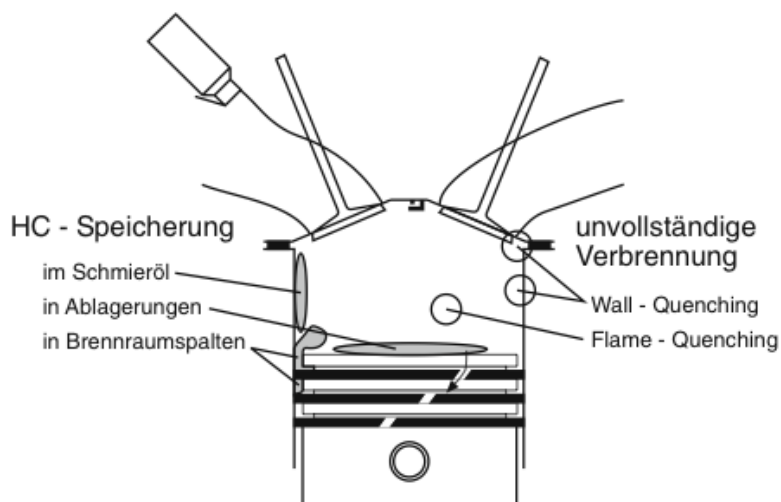


Abbildung 2.3: HC - Quellen im Brennraum (EICHLSEDER et al. 2008)

Aliphatische Kohlenwasserstoffe sind nahezu geruchlos, ringförmige aromatische Kohlenwasserstoffe sind geruchlich wahrnehmbar. Teilverbrannte Kohlenwasserstoffe riechen unangenehm und bilden Folgeprodukte die, so wie auch andere Kohlenwasserstoffe, bei Dauereinwirkung in bestimmten Konzentrationen als krebserregend gelten (BOSCH 2005).

- *Stickoxide (NO_x)*

Unter NO_x werden NO und NO₂, die beiden wesentlichen Oxidationsprodukte von Stickstoff, zusammengefasst. Bei der motorischen Verbrennung werden Stickoxide hauptsächlich in Form von NO emittiert, welches aber binnen weniger Stunden zu NO₂ oxidiert. Stickstoffdioxid hat eine mittlere Lebensdauer von ein bis zwei Tagen. Das im Gegensatz zu NO und NO₂ sehr reaktionsträge N₂O, welches eine atmosphärische Lebensdauer von geschätzten 100 bis 200 Jahren aufweist, wird in der Schadstoffanalyse nicht berücksichtigt (KLINGENBERG 1995). Im Gegensatz zu HC und CO entstehen Stickoxide nicht bei Sauerstoffmangel, sondern am stärksten bei leichtem Luftüberschuss. Bei der Entstehung von Stickoxiden unterscheidet man drei verschiedene Prozesse (SAMS und HAUSBERGER 2007):

1. Thermisches NO
2. Promptes NO
3. Umwandlung von Brennstoff-Stickstoff in NO

Die Bildung von thermischem NO findet wegen der hohen nötigen Aktivierungsenergie bei sehr hohen Temperaturen unter Einfluss von Druck, Temperatur, Sauerstoffkonzentration

sowie Verweilzeit statt und erreicht ihr Bildungsmaximum bei einem Kraftstoff-Luftverhältnis von $\lambda = 1,05-1,1$ bei etwa 2200 bis 2400K (WARNATZ 2001). 1946 erkannte J. Zeldovich die Temperaturabhängigkeit der NO-Bildung was er mit (2.11) und (2.12) beschrieb (ZELDOVICH 1946):



1970 erweiterte Lavoie den Zeldovich-Mechanismus um die Reaktion (2.13) welche vor allem in der Flammfront und bei unterstöchiometrischer Verbrennung an Bedeutung gewinnt (LAVOIE et al. 1970).

Das vergleichsweise in geringen Mengen gebildete prompte NO hat eine gegenüber thermischem NO viel geringere Aktivierungsenergie was zu dessen Bildung bei deutlich geringeren Temperaturen (ab ca. 1000K) führt. Es entsteht als Nebenreaktion in der Flammfront in Verbindung mit CH-Radikalen. Bei ausreichend hoher Konzentration von aus dem Kraftstoff gebildeten CH-Radikalen kann es zur Aufspaltung von N_2 kommen.



Der so gebildete atomare Stickstoff kann dann gemäß Gleichung 2.12 zur Bildung von NO führen. Die Umwandlung von Brennstoff-Stickstoff in NO hat für ottomotorische Verbrennung keine Relevanz, da diese wegen der großen Menge an gebundenen Stickstoff hauptsächlich bei Verbrennung von Kohle zu finden ist.

2.2.2 Schadstoffentstehung bei Dieselmotoren

Bei dieselmotorischer Verbrennung herrschen im Brennraum andere Bedingungen als bei ottomotorischer Verbrennung. Der Kraftstoff wird erst in die komprimierte Luft eingespritzt, was zu einer inhomogenen Ladung führt. Die Ladungsschichtung lässt hohe Luftverhältnisse von 1,2 bis 7 zu (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2002), führt aber zu lokal fetten Zonen, die speziell für die Rußentwicklung problematisch sind.

Dieser Betrieb bei hohem Luftüberschuss verbunden mit hohen Verdichtungsverhältnissen ermöglicht einen höheren Wirkungsgrad, was zu geringerem Kraftstoffverbrauch und damit zu geringeren CO_2 Emissionen führt. Jedoch lassen sich die entstehenden

Schadstoffemissionen auf Grund des überstöchiometrischen Betriebes nur bedingt nachbehandeln.

Die Bildungsvorgänge von CO, HC und NO_x sind vergleichbar mit jenen bei Ottomotoren. Eine besondere Stellung nimmt bei Dieselmotoren die Rußbildung ein, die im Folgenden näher betrachtet wird:

- *Partikel (PM)*

Kohlenwasserstoffe neigen bei Verbrennung unter (lokalem) Luftmangel zu Rußbildung. Die komplexen chemischen und physikalischen Prozesse der Rußbildung aus der Gasphase sind nach wie vor nicht vollständig verstanden und Gegenstand intensiver Forschung.

Nach der Acetylentheorie lässt sich die Bildung von Ruß in 4 wesentliche Prozesse unterteilen:

1. Bildung erster polyzyklischer, aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK) (TTM 2002)
2. Planares Wachstum der PAK (SCHUBIGER 2002)
3. Rußkeimbildung durch Formung von dreidimensionalen Clustern aus den PAK
4. Wachstum der Rußkeime zu Rußpartikeln durch Oberflächenwachstum und Koagulation (BECHMAN et al. 2002)

Bei Verbrennung unter Luftmangel wird in kraftstoffreichen Flammen in hohen Konzentrationen Acetylen (C₂H₂) gebildet, von welchem sich in Folge mehrere Moleküle unter der Anlagerung von H^{*} und Abspaltung von H₂ zu einem ersten Benzolring zusammenfügen (PECK 2007).

Durch Addition von C₂H₂ und das Herauslösen von Wasserstoff, beginnen die PAK planar zu wachsen und koagulieren in Folge zu ersten räumlichen Strukturen. Die so entstehenden Rußkeime, auch Nuklei genannt, haben eine kugelige Form. Im weiteren Verlauf lagern sich parallel zur Oberfläche dieser Primärpartikel weitere Kristallkerne an, sodass kugelförmige Gebilde mit einem Durchmesser von 10-30nm entstehen. Anschließend wachsen die Primärpartikel durch Agglomeration zu traubenförmigen Rußpartikeln welche bei dieselmotorischer Verbrennung einen typischen Durchmesser von 50-200nm aufweisen (IVANISIN 2004).

Die so entstandenen Rußpartikel begünstigen sowohl durch ihre sehr große Oberfläche (bis zu 200m²/g) als auch durch ihre hohe Adsorptionsfähigkeit das Einlagern von Kohlenwasserstoffen, Sulfaten, Wasser und Schmierölbestandteilen (BASSHUYSEN und

SCHÄFER 2005). Partikel bestehen somit aus einer kristallinen Grundstruktur, dem Ruß (dry soot), in welchem lösliche Bestandteile (soluble organic fraction SOF) eingelagert sind (SAMS und HAUSBERGER 2007).

Rußbildung findet nur in einem engen Temperaturbereich statt, da die benötigten radikalischen Vorläufer (z.B. C_3H_3) erst ab 1000K gebildet werden und bei Temperaturen über 2000K dagegen pyrolysiert und oxidiert werden (JOOS 2006) .

Die Bildung von Rußpartikeln beziehungsweise deren „Nichtbildung“ sowie auch die Bedingungen für Rußnachoxidation stehen in Konflikt mit den Voraussetzungen für geringe Stickoxidemissionen.

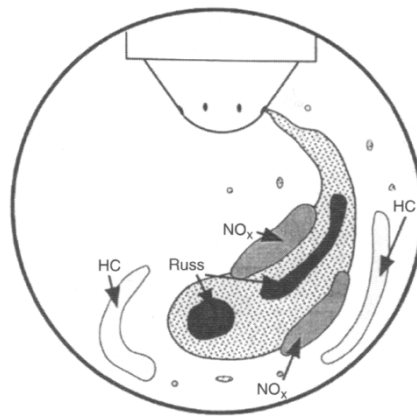


Abbildung 2.4: Qualitative Darstellung der dieselmotorischen Verbrennung und Schadstoffbildung (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005)

2.3 Innermotorische Reduzierung von Schadstoffen

2.3.1 Ottomotoren

Bei Ottomotoren die mit Lambdaregelung stöchiometrisch betrieben werden ist es möglich, durch die Verwendung eines 3-Wege-Abgaskatalysators die Schadstoffe nahezu vollständig in nicht toxische Bestandteile zu oxidieren beziehungsweise zu reduzieren. Auch innermotorisch gibt es zahlreiche Maßnahmen um die Rohemissionen zu verringern, wobei die geringste Rohemission nicht gleichzeitig zum besten Gesamtergebnis führt, da hierbei für die Abgasnachbehandlung nötige Reaktionspartner fehlen können.

Ein weiteres Problem bei der innermotorischen Reduzierung ist, dass die Verringerung eines Schadstoffes oft die Erhöhung eines anderen zur Folge hat. Dieser Zielkonflikt wird als „*Trade Off*“ bezeichnet.

Die Rohemission von Verbrennungsmotoren wird von geometrischen Bedingungen, Gemischaufbereitung, Drehzahl, Last und Temperatur beeinflusst. Im Folgenden sollen für die verschiedenen Rohemissionen Einflussfaktoren dargestellt und Möglichkeiten zu deren Reduktion aufgezeigt werden.

- HC-Rohemission

Speziell nach dem Kaltstart kommt es an den kalten Brennraumwänden zu Flammauslöschungen. Mit zunehmender Last werden diese kalten Zonen durch die erhöhte Verbrennungstemperatur dünner, was zu einer besseren Umsetzung des Kraftstoffes führt. Auch wirkt sich erhöhte Abgastemperatur positiv auf die Nachreaktion in der Expansionsphase aus. Eine Erhöhung der Abgastemperatur ist auch durch die Variation des Zündzeitpunktes möglich.

Voraussetzung für die vollständige Verbrennung von Kraftstoff ist ein homogen im Brennraum verteiltes stöchiometrisches Kraftstoff-/Luftgemisch. Wird dieses Verhältnis unterschritten ($\lambda < 1$) steht nicht mehr genügend Sauerstoff für die Verbrennung zu Verfügung und unverbrannter Kraftstoff gelangt in das Abgas. Jedoch führt auch der Betrieb im überstöchiometrischen Bereich zu einer Erhöhung von HC-Emissionen da es hier zu verschleppten Verbrennungen und sogar Zündaussetzern kommen kann (BOSCH 2005). Die Konzentrationen von HC sowie auch CO haben bei $\lambda = 1,05-1,1$ ihr Minimum, die NO_x Konzentrationen aber ihr Maximum (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005).

Bei höheren Drehzahlen steht für die Gemischaufbereitung immer weniger Zeit zu Verfügung was Inhomogenität und erhöhte Emissionen zur Folge hat. Eine besondere Stellung nehmen Ottomotoren mit Direkteinspritzung ein, welche im Schichtbetrieb betrieben werden. Hier wird der Kraftstoff nicht im gesamten Brennraum homogen verteilt, sondern es wird im Bereich der Zündkerze ein Bereich mit gut entflammbarem Gemisch geschaffen. Maßgeblich für die HC-Emissionen ist hierbei, wie gut die Ladungsbewegung gesteuert werden kann.

- CO-Rohemission

Wie bei den Kohlenwasserstoffen wirkt sich auch bei Kohlenmonoxid erhöhte Last mit daraus resultierenden höheren Brennraumtemperaturen positiv auf die Emission aus. Ebenso verhält es sich mit den Anforderungen an die Gemischaufbereitung was eine erhöhte CO-Konzentration bei höheren Drehzahlen mit sich bringt. Der Einfluss auf das Kraftstoff-/Luftverhältnis ist im Luftmangelbereich nahezu linear von der Luftzahl abhängig (BOSCH 2005), im mageren Bereich ist die CO-Emission jedoch gering und nahezu unabhängig von λ .

- NO_x-Rohemission

NO_x wird vorwiegend bei hohen Brennraumtemperaturen gebildet, wie sie bei hoher Last und steigender Frühzündung vorherrschen. Eine frühe Zündung bewirkt unter anderem eine Verschiebung der Verbrennungsschwerpunktlage näher zum oberen Totpunkt, was nicht nur einen höheren Druckgradienten und einen höheren Spitzendruck, sondern damit verbunden auch eine höhere Verbrennungsspitzen temperatur mit sich bringt. Zwar führt dies zu einer Erhöhung des thermodynamischen Wirkungsgrades, aber die Temperaturspitzen tragen maßgeblich zur Bildung von thermischen NO_x bei. Wird die Frühzündung weiter erhöht, führt dies zu erhöhten Wandwärmeverlusten was den Wirkungsgrad wieder verschlechtert.

Bei höheren Drehzahlen nimmt die für die Oxidation von N₂ zu Verfügung stehende Reaktionszeit ab, was zu einer Reduktion der Stickoxide führt. Ein weit verbreitetes Mittel zur Senkung der Brennraumspitzentemperatur und damit der NO_x-Emissionen ist die innere oder äußere Abgasrückführung.

- Konstruktive Maßnahmen

Eine kompakte Brennraumform mit einer zentral ausgeführten Zündkerze ermöglicht eine gleichmäßige Flammausbreitung mit kurzen Flammwegen. Durch Vermeidung von Spalten und Totvolumina ist es möglich, HC-Emissionen zu verringern.

Mit erhöhtem Verdichtungsverhältnis steigt der thermodynamische Wirkungsgrad des Motors. Dies führt zu geringerem Kraftstoffverbrauch und damit zu weniger CO₂ Ausstoß. Allerdings steigt auch die Verbrennungstemperatur, was die Bildung von NO_x fördert.

Maßgeblich für die vollständige Umsetzung des Kraftstoffes ist die homogene Gemischaufbereitung in jedem Zylinder. Zylinderselektive Kraftstoffeinbringung, entweder in das Saugrohr oder direkt in den Brennraum, ermöglicht eine möglichst gleichmäßige Gemischverteilung.

Durch die Rückführung von Verbrennungsgas in den Brennraum wird das Temperaturniveau während der Verbrennung gesenkt, was die Bildung von thermischen NO verhindert. Das Verbrennungsgas, welches einen Teil der Frischladung ersetzt, gelangt entweder extern über den Ansaugtrakt oder intern durch entsprechende Ventilüberschneidung in den Verbrennungsraum. Durch die damit verbundene Entdrosselung des Motors kann auch ein Kraftstoffersparnis erreicht werden. Im Fall von sehr hohen Rückföhrtraten kann es in Folge von Verbrennungsaussetzern zu erhöhten HC Emissionen kommen.

2.3.2 Dieselmotoren

Das Kraftstoff/-Luftgemisch ist bei Dieselmotoren im Gegensatz zu Ottomotoren heterogen und es muss, um hohe Schadstoffemissionen und hohen Verbrauch zu vermeiden, insgesamt immer ein Luftüberschuss vorhanden sein (BOSCH 2002).

- *Einspritzsystem*

Die Gemischbildung hat wesentlichen Einfluss auf das Schadstoffniveau, daher werden hohe Anforderungen an die Kraftstoffeinspritzung gestellt. Wesentliche Einflussgrößen des Einspritzsystems sind der Spritzbeginn, der Einspritzdruck und der Einspritzverlauf.

Der Beginn der Verbrennung wird bei Dieselmotoren über den Spritzbeginn gesteuert, da der Zündverzug als relativ konstant betrachtet werden kann (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005). Ein früher Spritzbeginn bewirkt eine Verschiebung des Verbrennungsschwerpunkts in Richtung des oberen Totpunkts was Verbesserungen im Verbrauch bewirkt, aber einen Anstieg der Brennraumspitztemperatur und damit verbunden eine Erhöhung der NO_x Emissionen mit sich bringt. Der Zielkonflikt der gleichzeitigen Minimierung von Ruß und NO_x Emissionen – auch NO_x /Ruß Trade Off genannt – ist bezeichnend für die dieselmotorische Verbrennung.

- *Aufladung*

Im Gegensatz zu Ottomotoren sind nahezu alle Dieselmotoren mit Turboaufladung versehen. Diese Maßnahme hat einen positiven Einfluss auf das Emissionsverhalten der Motoren. Eine zusätzliche Kühlung der Ladeluft senkt das Temperaturniveau der Verbrennung und bringt unter anderem auch eine Verringerung der Stickoxidemissionen mit sich.

- *Abgasrückführung*

Bei Dieselmotoren sind im Vergleich zu Ottomotoren noch deutlich höhere Rückführraten möglich, was allerdings bei weiterer Steigerung zu immer höheren Partikelemissionen führt. Eine Kühlung des rückgeführten Abgases verringert zwar die NO_x Emissionen noch weiter, erhöht aber andererseits die CO-, HC- und PM-Emission (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005).

2.4 Abgasnachbehandlung

2.4.1 Ottomotoren

Trotz des im Vergleich zu Dieselmotoren höheren Rohabgas-Emissionsniveaus, haben Ottomotoren bei stöchiometrischem Betrieb große Vorteile in der Abgasnachbehandlung. In einem 3-Wegekatalysator werden CO/HC zu CO₂/H₂O oxidiert und NO/NO₂ zu N₂ reduziert, wobei die Reaktionen durch die Anwesenheit der katalytisch aktiven Edelmetalle Platin, Rhodium und Palladium gefördert werden. Katalysatoren benötigen zur erfolgreichen Umsetzung eine Mindestbetriebstemperatur (light-off), welche gerade beim problematischen Kaltstart noch nicht erreicht ist. Aus diesem Grund sind spezielle Katalysator Heizkonzepte nötig um die Anspringtemperatur möglichst schnell zu erreichen. Zu ihnen zählen konstruktive Maßnahmen, wie motornahe Vorkatalysatoren mit luftspaltisolierten Krümmerrohren, sowie motorische Aufheizstrategien zur Steigerung der Abgasenthalpie. Auch wird versucht die thermische Trägheit der Katalysatoren möglichst gering zu halten. Hat ein 3-Wegekatalysator seine Betriebstemperatur erreicht, können Konvertierungsraten nahe 100% erreicht werden.

Diese Maßnahmen können bei Motoren welche bei $\lambda > 1$ betrieben werden (Magermotoren) nicht angewandt werden. Wegen des Sauerstoffüberschusses im Abgas reagieren die Komponenten CO und HC bedingt durch die höheren Reaktionsgeschwindigkeiten bevorzugt mit O₂, sodass zur Reduzierung von NO_x die Reaktionspartner fehlen.

2.4.2 Dieselmotoren

Wie bei Ottomotoren, die mit Luftüberschuss betrieben werden, fehlen auch bei Dieselmotoren die geeigneten Reaktionspartner zur Reduktion der Stickoxide im Abgas. Die Möglichkeiten der Abgasnachbehandlung beschränken sich daher auf Oxidationsprozesse und die Verwendung von katalytisch aktiven Komponenten (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005).

Zur Zeit sind drei Strategien zur Abgasreinigung von mager betriebenen Motoren möglich (SAMS und HAUSBERGER 2007):

- Dieselpartikelfilter
- SCR – Selektive Katalytische Reduktion
- NO_x-Speicherkatalysator

Mit Hilfe von **Diesel Partikelfiltern (DPF)** ist es möglich, über 99% der Partikelanzahl aus dem Abgas zu filtern. Ein weit verbreitetes System ist das „Wall-Flow“-System. Hierbei sind wechselweise Ein- und Auslasskanäle so angeordnet, dass das Abgas durch die porösen Wände, in denen Partikel und Asche abgeschieden werden, strömen muss.

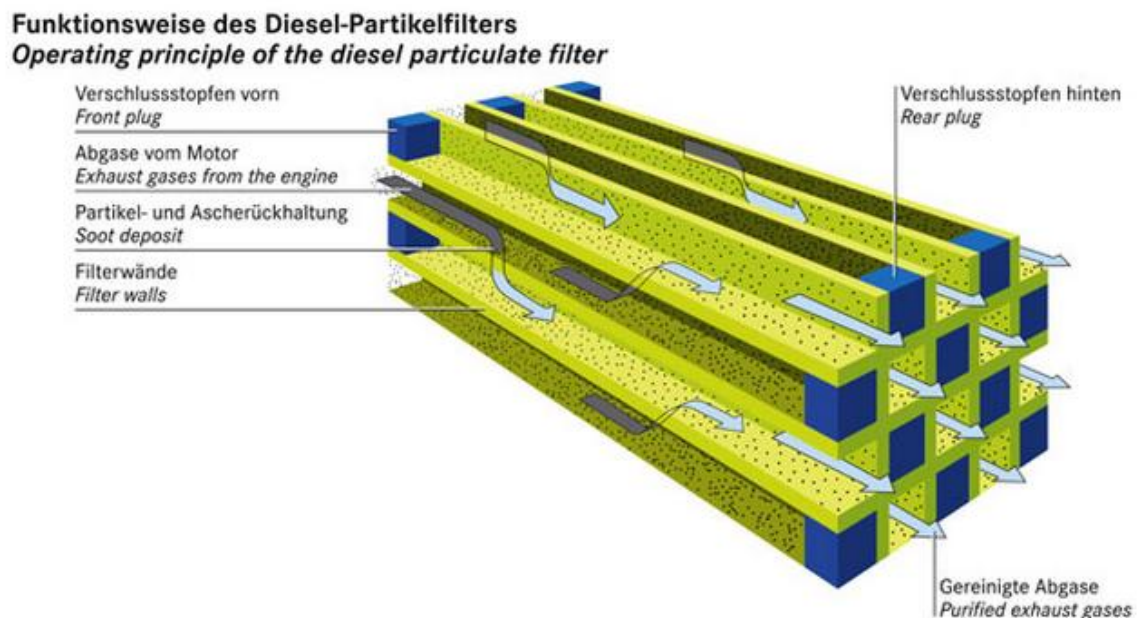


Abbildung 2.5: Funktionsweise eines Wall-Flow Partikelfilters (Mercedes-Benz Presseaussendung).

Die Abscheidung der Partikel beruht hierbei auf drei physikalisch unterschiedlichen Mechanismen: Große Partikel (siehe **Abbildung 2.7**) lagern sich wegen ihrer Massenträgheit durch Impaktion am Strömungshindernis ab, während etwas kleinere, deren Partikelbahn sich noch unter der Grenzpartikelbahn befindet, durch Interzeption abgelagern und Kleinstpartikel (Nanopartikel) durch Diffusion.

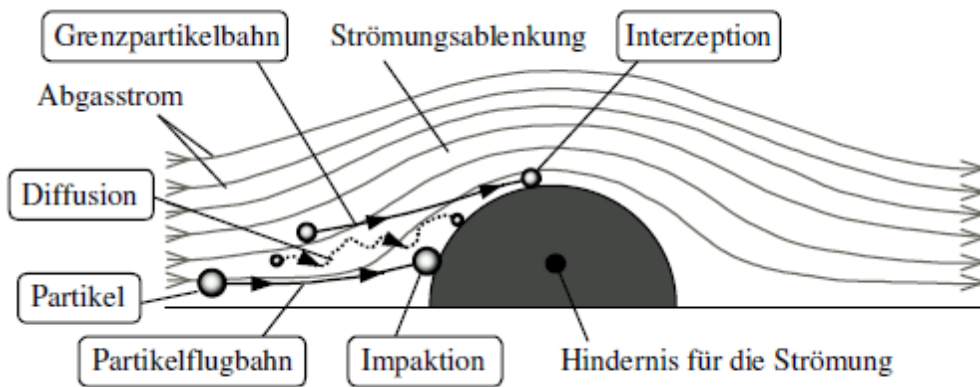


Abbildung 2.6: Mechanismen der Partikelabscheidung (PECK 2007)

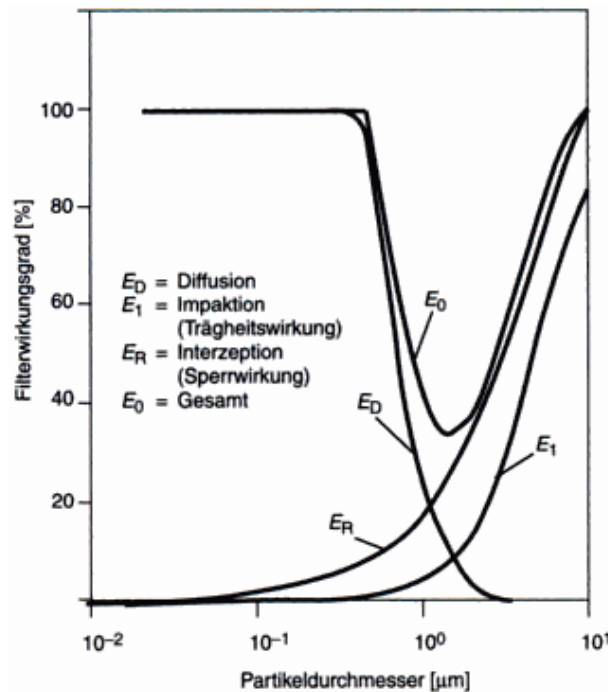
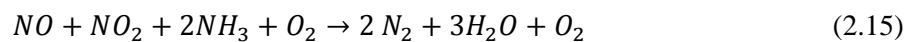


Abbildung 2.7: Mechanismen der Partikelabscheidung als Funktion der Partikelgröße (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005)

Dies zeigt, dass nicht wie bei einem Sieb nur Partikel zurückgehalten werden welche größer als der Porendurchmesser sind, sondern deutlich kleinere. Mit zunehmender Filterbelastung steigt auch der Abgasgedruck. Wird dieser zu hoch, muss der Filter regeneriert werden. Ruß benötigt Temperaturen über 600°C um vollständig zu verbrennen. Diese Regeneration kann entweder aktiv ausgeführt werden, was bedeutet, dass durch Energiezufuhr die Abgastemperatur so weit erhöht wird bis Ruß verbrannt wird, oder passiv, wobei mit Hilfe von katalytischen Maßnahmen die Aktivierungsenergie so weit herabgesetzt wird, dass eine

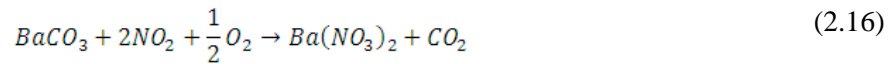
Regeneration bei geeigneten Betriebstemperaturen ohne weitere Regelung abläuft. Ein solches passives Verfahren kommt bei dem von Johnson Matthey patentierten CRT-System (Continuously Regenerating Trap) zum Einsatz. Hier wird in einem dem Partikelfilter vorgeschalteten Oxidationskatalysator NO_2 aus NO erzeugt, welches bei den hier vorherrschenden Temperaturen aber nicht stabil ist. Im darauf folgenden Partikelfilter findet daher der umgekehrte Vorgang statt: das freigewordene Sauerstoffradikal oxidiert den Kohlenstoff. Dies geschieht schon bei 230°C , was bei höherer Last ohne zusätzliche Heizkonzepte zu bewerkstelligen ist.

Eine Möglichkeit zur Reduktion von Stickoxiden ist die **selektive katalytische Reduktion (SCR)**. Nachdem bei Vorhandensein von Sauerstoff im Abgas CO und HC bevorzugt mit O_2 oxidiert, gilt es ein anderes Reduktionsmittel beizumengen, welches den Sauerstoff der Stickoxide zur Oxidation favorisiert. Ammoniak (NH_3) erfüllt diese Anforderungen und reagiert mit NO_2 nach Gleichung 2.15. Da Ammoniak aus Gründen der Sicherheit nicht im Fahrzeug transportiert werden darf, werden unbedenkliche Substanzen eingesetzt, aus welchen erst bei Bedarf Ammoniak hergestellt wird. Eine gängige Methode ist der Einsatz von Harnstofflösung welche in das Abgas eingesprüht wird (Schüssler 2008).



Auf die SCR Stufe folgt ein Sperrkatalysator, der ein Emittieren von Ammoniak in die Umgebung verhindert.

Ein **NO_x -Speicherkatalysator** ist im Aufbau ähnlich einem 3-Wegekatalysator und kann sowohl für dieselmotorische Antriebe als auch für mager betriebene Ottomotoren verwendet werden. Jedoch verschiebt sich das Arbeitsfenster des Katalysators bei Dieselmotoren wegen des geringeren Abgastemperaturniveaus und der geringeren thermischen Spitzenbelastung hin zu tieferen Temperaturen (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005). Der Unterschied zu einem 3-Wegekatalysator besteht darin, dass zusätzlich zu den bekannten katalytisch wirkenden Edelmetallen NO_x -Speicherkomponenten, zum Beispiel Barium, in der Beschichtung enthalten sind (SAMS und HAUSBERGER 2007). Diese bewirken, dass Stickstoffmonoxid zunächst am katalytisch wirkenden Edelmetall mit Sauerstoff zu Stickstoffdioxid oxidiert, welches daraufhin im Speichermaterial unter Bildung von Nitraten eingelagert wird (MOLLENBAUER und TSCHÖKE 2007).



Da bei diesem Prozess die Speicherkapazität kontinuierlich abnimmt, ist es nötig, das Speichermaterial regelmäßig zu regenerieren. Hierzu wird der Motor kurzzeitig fett betrieben. Durch die hierbei im Abgas vorhandenen Komponenten CO und HC werden die Nitrate zu NO reduziert. Im Folgenden wird dies beispielhaft mit CO als Reduktionsmittel dargestellt. Das so freigesetzte NO kann daraufhin wie in einem 3-Wege Katalysator reduziert werden.

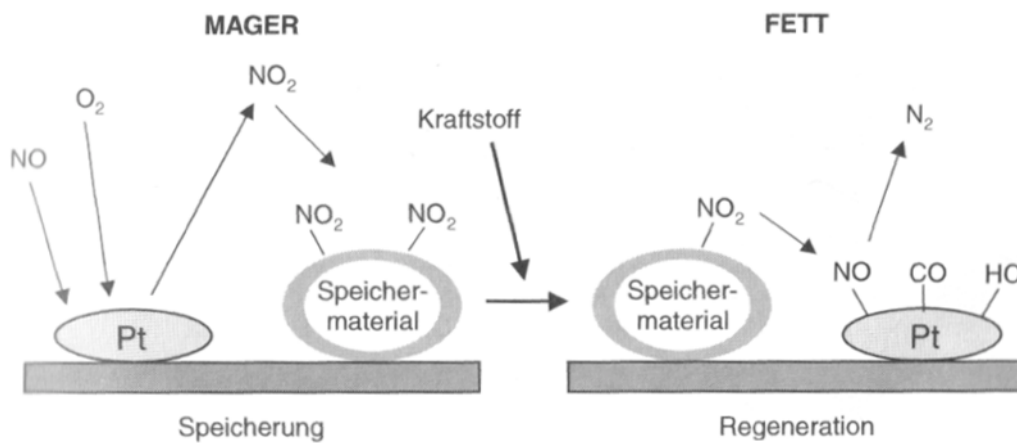
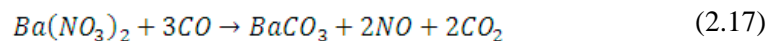


Abbildung 2.8: NO_x-Speicherung und Regeneration (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005).

NO_x-Speicherkatalysatoren reagieren sehr empfindlich auf Schwefel im Kraftstoff, da dieser zu einer „Vergiftung“ des NO_x Speichermaterials führt. Alle bisher bekannten NO_x-adsorbierenden Materialien haben auch die Eigenschaft SO₂ unter Bildung entsprechender Sulfate zu binden. Diese sind thermisch stabiler als Nitrate, welche durch NO₂ gebildet werden, was eine Entschwefelung erst bei Temperaturen über 650°C ermöglicht (SAMS und HAUSBERGER 2007). Grundsätzlich stellt die Regeneration bei Dieselmotoren eine besondere Herausforderung dar. Bei internen Maßnahmen zur Anhebung der Abgastemperatur wird der Motor fett betrieben um die Abgasenthalpie anzuheben. Dies führt aber zu starken Partikelemissionen, was zur Deaktivierung des Speicherkatalysators beitragen kann. Eine externe Maßnahme zur Regeneration des NO_x-Speicherkatalysators ist das Eindüsen eines Reduktionsmittels, meist Kraftstoff, kurz vor dem Katalysator. (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005).

2.5 Abgasgesetzgebung

Der Ursprung aller Bemühungen zur Reglementierung von verkehrsbedingten Emissionen ist im Kalifornien der sechziger Jahre zu finden. Das stärker werdende Verkehrsaufkommen, verbunden mit klimatischen Gegebenheiten, führte zu drastischer Luftverschmutzung, was die Regierung auf Drängen der Bevölkerung dazu veranlasste, sich für die Reduktion der Emissionen einzusetzen. 1961 wurden auf freiwilliger Basis Vorschriften zur Kontrolle von Emissionen aus dem Kurbelgehäuse bei neu zugelassenen PKW mit Ottomotoren eingeführt, die daraufhin 1964 im Gesetz verankert wurden (KLINGENBERG 1995). Über die Jahre wurden die Vorschriften kontinuierlich verschärft und erweitert, wobei nicht nur die Anforderungen an die Fahrzeuge stiegen, sondern auch die Anforderungen an die Messtechnik. Parallel zu den Entwicklungen in den USA verliefen auch Entwicklungen in Europa und Japan. Viele Länder, wie auch Österreich (1986), führten die amerikanische Gesetzgebung mit einem Stufenplan ein. Seit dem EU-Beitritt am 1.1.1995 gilt in Österreich die europäische Gesetzgebung.

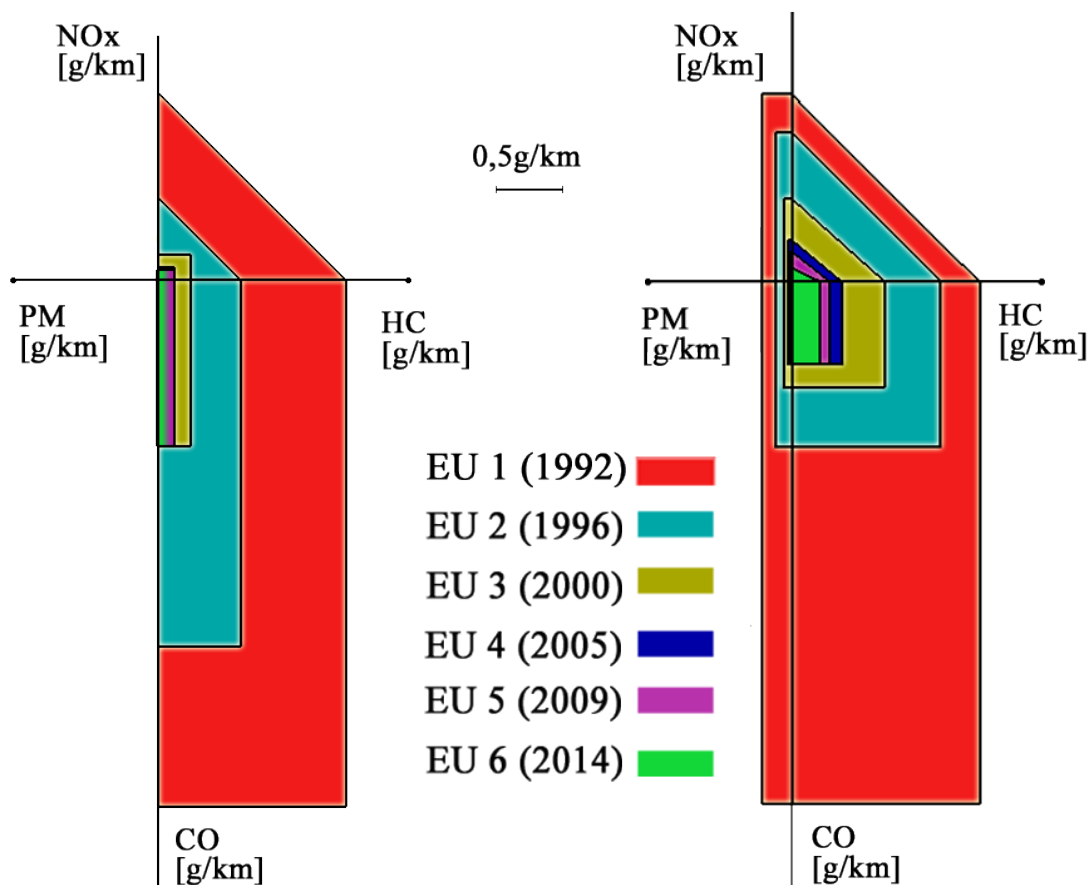


Abbildung 2.9: Entwicklung der Abgasgesetzgebung der von Euro 1 bis Euro 6 (Darstellung nach KAMPELMÜHLER/IVANISIN, Magna Steyr)

2.5.1 Gesetzgebung Europa (70/220/EG)

Die europäische Gesetzgebung sieht für Fahrzeuge mit Ottomotoren und solche mit Dieselmotoren unterschiedliche Grenzwerte vor. Zu den limitierten Schadstoffkomponenten zählen THC, CO, NO_x und Partikelemissionen. Während bisher die gravimetrisch ermittelten Partikelemissionen nur für Dieselfahrzeuge von Bedeutung waren, sind diese seit Inkrafttreten von Euro 5 auch für Fahrzeuge mit Otto-Direkteinspritzungsmotoren beschränkt. Mit Euro 5+ und Euro 6 wird neben der Partikelmasse auch die Partikelanzahl limitiert. Für eine Typprüfung nach europäischer Gesetzgebung sind für Fahrzeuge mit einem höchst zulässigen Gesamtgewicht ≤ 3,5t die Prüfungen des Typs I bis VI durchzuführen.

		Ottomotor	Dieselmotor
Typ I:	Prüfung der durchschnittlichen Auspuffemissionen nach Kaltstart	Ja	Ja
Typ II:	Prüfung der Emission von Kohlenstoffmonoxid im Leerlauf	Ja	-
Typ III:	Prüfung der Gasemissionen aus dem Kurbelgehäuse	Ja	-
Typ IV:	Bestimmung der Verdunstungsemissionen aus Fahrzeugen mit Ottomotor	Ja	-
Typ V:	Alterungsprüfung für die Überprüfung der Dauerhaltbarkeit der emissionsmindernden Einrichtungen	Ja	Ja
Typ VI:	Überprüfung der durchschnittlichen Emissionen von Kohlenmonoxid und Kohlenwasserstoffen bei niedrigen Umgebungstemperaturen nach einem Kaltstart	Ja	-

Tabelle 3: Typgenehmigungsprüfungen nach 70/220/EG

Fahrzyklen Europa

Der europäische Standardzyklus ist der NEDC (New European Driving Cycle) welcher aus einem innerstädtischen (ECE15) und einem Überlandteil (EUDC-Extra Urban Driving Cycle) besteht. Die Durchführung eines Typ I Abgastests nach 70/220/EG wird im nächsten Kapitel näher beschrieben.

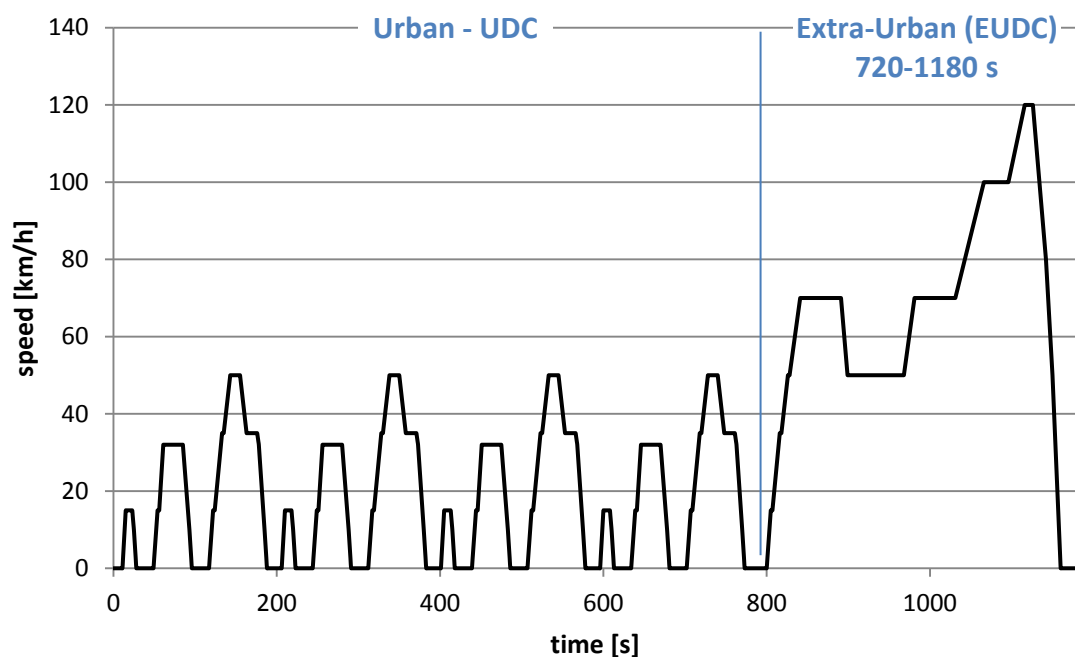


Abbildung 2.10: NEDC – New European Driving Cycle

2.5.2 Vorschrift zur Durchführung eines NEDC Abgastests (Typ I Prüfung)

Die Typ I Prüfung ist ein Kaltstarttest bei einer Umgebungstemperatur zwischen 20-30°C. Um immer gleiche Rahmenbedingungen zu schaffen, sind sämtliche Vorgänge bezüglich der Bestimmung der Fahrwiderstände, der Vorkonditionierung, der Testdurchführung und der Abgasanalyse im Gesetz beschrieben. Es sei erwähnt, dass hier ausschließlich auf Diesel und Benzin als Kraftstoff eingegangen wird, auch wenn die Vorschriften für Erdgas beziehungsweise Flüssiggas sowie bivalente Antriebe in weiten Teilen gleich sind.

2.5.2.1 Vorkonditionierung

Bei der Vorkonditionierung wird zwischen Fahrzeugen mit Dieselmotoren und solchen mit Ottomotoren unterschieden. In Hinblick auf die Messung der Partikel muss bei Fahrzeugen mit Dieselmotoren mindestens 6 und höchstens 36 Stunden vor Testbeginn drei Mal der

Überlandzyklus des NEDC gefahren werden. Bei Fahrzeugen mit Ottomotoren geschieht dies auf freiwilliger Basis beziehungsweise auf Wunsch des Herstellers mit einem Stadtzyklus und zwei Überlandzyklen. Da der NEDC ein Kaltstart Test ist, ist es unbedingt erforderlich, das Fahrzeug, unabhängig vom Motorkonzept, zumindest sechs Stunden vor dem Test relativ konstanten Temperaturen (zwischen 293 und 303K) auszusetzen, sodass die Öl- und Kühlmitteltemperaturen ± 2 K der Umgebungstemperatur entsprechen. Gegebenenfalls ist die Zeit zu verlängern. Auf Grund der hohen Belastungen für die Reifen, kann der Luftdruck bei Prüfständen mit Doppelrollen bis maximal 50% gegenüber der Herstellerangabe erhöht werden. Der verwendete Druck muss im Prüfprotokoll angegeben werden.

2.5.2.2 Prüfbedingungen

Während der gesamten Prüfung muss die Temperatur des Prüfraumes zwischen 293 und 303 K betragen und die absolute Feuchte zwischen 5,5g und 12,2g H₂O/kg trockener Luft liegen. Des Weiteren muss ein Fahrtwindgebläse installiert sein, welches einen der Rollengeschwindigkeit entsprechenden Luftstrom über das Fahrzeug leitet. Die Geschwindigkeitsabweichung dieses Luftstroms darf im Bereich von 10 bis 50 km/h eine maximale Abweichung von ± 5 km/h aufweisen. Die Austrittsöffnung dieses Gebläses muss eine Fläche von mindestens 0,2 m² aufweisen und mit der Unterkante 20cm vom Boden entfernt sein. Der Abstand zur Stirnseite des Fahrzeuges soll rund 30cm betragen.

2.5.2.3 Testablauf

Der Test, und damit die Probeentnahme, beginnt mit dem Anlassvorgang des Motors und endet mit dem Abschluss der letzten Leerlaufphase am Ende des außerstädtischen Fahrzyklus. Der Fahrer muss nach dem Start dem definierten Fahrprofil folgen, wobei er von der vorgegebenen Geschwindigkeit nur geringfügig abweichen darf. Was die Fahrweise betrifft, hat der Fahrer Vorgaben, welche das Beschleunigen, das Verzögern und beispielsweise auch das Auskuppeln des Motors beschreiben.

2.5.2.4 Abgasanalyse

Das Abgas wird zur Gänze von der CVS²-Anlage abgesaugt und mit gefilterter Luft so verdünnt, dass sich immer ein konstantes Volumen einstellt. Das Gesamtvolumen muss gemessen, und eine anteilige Probe kontinuierlich in Beuteln gesammelt werden. Nach dem

² Constant Volume Sampling

Test werden die Proben aus den Beuteln so schnell wie möglich, spätestens aber nach 20 Minuten, analysiert.

2.5.3 US- Gesetzgebung (EPA 40 CFR Part 86)

Die amerikanische Gesetzgebung unterscheidet sich von der europäischen und der japanischen nicht nur durch die unterschiedlichen Fahrzyklen, sondern auch durch die Berücksichtigung „nicht limitierter Abgasemissionen“. Dies bedeutet, dass bei der Abgasnachbehandlung zur Reduktion der gesetzlich limitierten Schadstoffkomponenten nicht andere Komponenten in gesundheitsschädlichen Konzentrationen entstehen dürfen. Dies betrifft differenzierte Kohlenwasserstoffe, Aldehyde und Ketone, Schwefeldioxid und Sulfat, Distickstoffmonoxid, Ammoniak, Gesamtcyanide, Phenole, Schwefelwasserstoff sowie polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAH) (EICHLSEDER *et al.* 2008). Zu den limitierten Abgaskomponenten zählen Kohlenmonoxid (CO), Kohlenwasserstoffe (HC), Stickoxide (NO_x) und Ruß.

Während die europäische Gesetzgebung alle Kohlenwasserstoffe unter dem Begriff THC (Total Hydro Carbons) zusammenfasst, sieht die amerikanische bei den organischen Abgasemissionen eine weitere Unterteilung vor. So werden NMHC (Non Methan Hydro Carbons) und NMOG (Non Methan Organic Gas) reglementiert, wobei letzteres auf Grund des hohen Ozonbildungspotentials der Carbonyle (Summe aus diversen Aldehyden und Ketonen) gesondert betrachtet wird. Auch Formaldehyd (CH₂O) besitzt einen eigenen Grenzwert.

$$NMHC = THC - CH_4 \quad (2.18)$$

$$NMOG = THC - CH_4 + \text{Carbonyle} = NMHC + \text{Carbonyle} \quad (2.19)$$

Fahrzyklen USA

Die Environmental Protection Agency (EPA) sieht zur Überprüfung der Emissionen spezielle Fahrzyklen vor, die das durchschnittliche Fahrverhalten widerspiegeln sollen. Der Standardtest ist der FTP-75 Test, der durch zwei Supplemental Federal Tests (SFTP), welche die Schwächen des FTP-75 aufheben sollen, ergänzt wird. Dies ist einerseits der US06, welcher die aggressive und schnelle Fahrweise abdecken soll, und andererseits der SC03, der sich auf den Einsatz der Klimaanlage konzentriert.

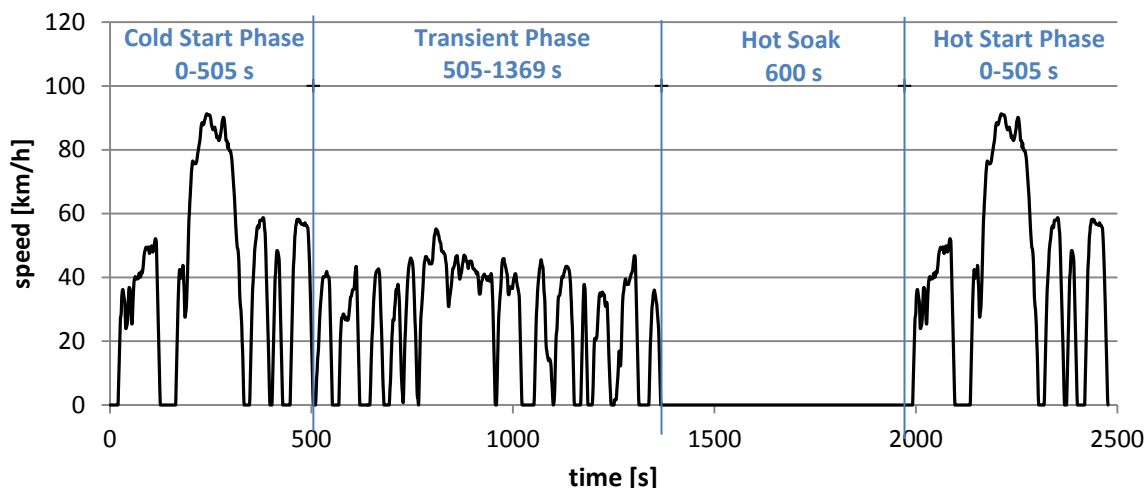


Abbildung 2.11: FTP-75 Zyklus

Der FTP-75 Zyklus ist ein modifizierter FTP-72 Zyklus, welcher um eine Pause von zehn Minuten und eine dritte Phase mit 505 Sekunden, identisch der Kaltstartphase, erweitert wird.

3 Messtechnik/ Anlagen

3.1 Vorstellung des Prüfzentrums GAAZ



Abbildung 3.1: Logo GAAZ

Das neue Gesamtfahrzeug Antriebs Applikations Zentrum (GAAZ) der Firma Magna Steyr in Graz wurde im Jahr 2009 errichtet und Anfang des Jahres 2010 in Betrieb genommen. Das Prüfzentrum ist so konzipiert, dass es neben der Durchführung von zertifizierten Abgastests auch ein großes Spektrum an Entwicklungstests ermöglicht. Für die Emissionsuntersuchung stehen neben dem CVS System auch zwei Rohabgaslinien zur Verfügung, mit denen beispielsweise das Umsetzungsverhalten von Katalysatoren untersucht werden kann. Durch die viermotorige Ausführung des Rollenprüfstands ist es möglich, jede Rolle unabhängig von

den anderen zu regeln. Dies ermöglicht Untersuchungen des Antriebsstrangs, der Längsdynamik und der Bremsleistung, um nur einige Möglichkeiten zu nennen.

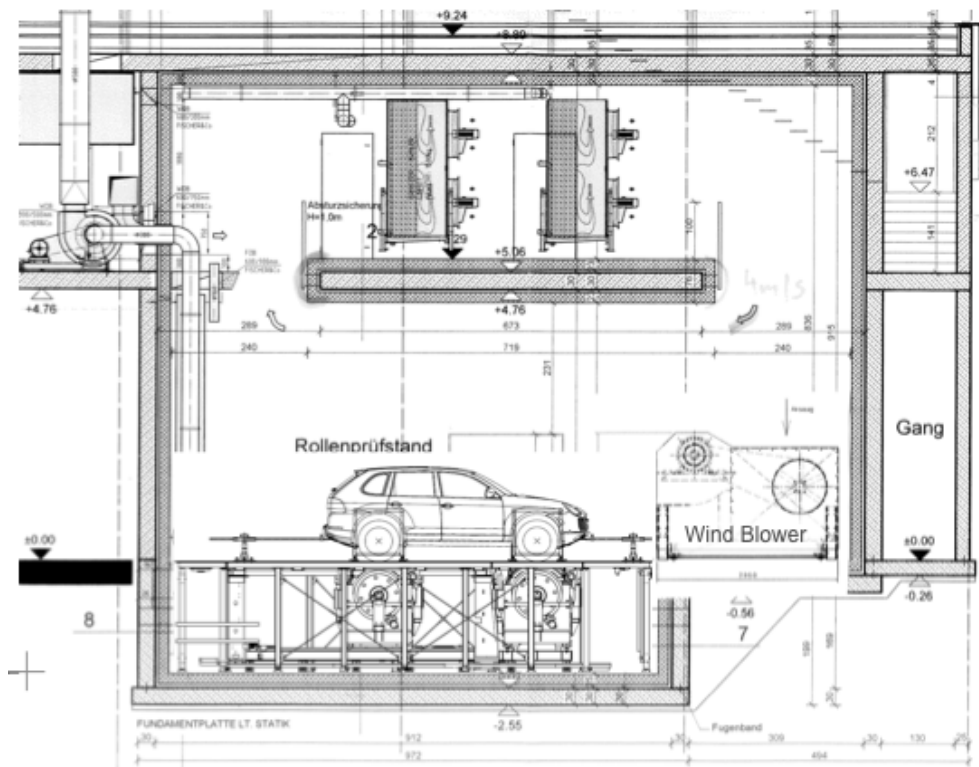


Abbildung 3.2: Längsschnitt der Prüfwelle

3.1.1 Rollenprüfstand



Abbildung 3.3: Prüfraum GAAZ

Der Rollenprüfstand besteht aus vier separaten 48-Zoll Scheitel-Rollen der Firma MAHA

- Für front-/ heck- oder allradgetriebene Fahrzeuge
- Antriebsleistung Vorderachse 220 kW
- Antriebsleistung Hinterachse 300 kW
- Radstandverstellung von 1800 mm bis 4200 mm
- $v_{\max} = 260 \text{ km/h}$
- Schwungmassensimulation von 550-4500kg
- Rollen separat bedienbar (Torque Vectoring, Zugkraftuntersuchungen)

3.1.2 Abgasmesstechnik



Abbildung 3.4: Otto- und Diesel-Verdünnungstunnel

Die Abgasmesstechnik der AVL Emission Test Systems GmbH aus der Generation i60 besteht aus folgenden Komponenten:

- 2-Linien Rohemissionsmessung + EGR
- CVS Messeinrichtung mit Diesel- und Otto-Entnahmeleitungen
 - IRD i60 CO₂Tracer
 - Partikelsammler
 - Verdünnungsluftvorwärmung
 - Verbaute Analysatoren siehe Tabelle 4

<i>Name des Analysators</i>	<i>gemessene Komponente</i>	<i>niedrigster Messbereich</i>	<i>höchster Messbereich</i>
FID i60 LHD	THC	0...3ppm C ₃	0...1000ppm C ₃
	CH ₄	0...9ppm C ₁	0...1000ppm C ₁
FID i60 Cutter HHD	THC	0...10 ppm C ₃	0...20 000 ppm C ₃
	CH ₄	0...30 ppm C ₁	0...20 000 ppm C ₁
CLD i60 HHD	NO _x	0...10 ppm	0...10 000 ppm
	NO	0...10 ppm	0...10 000 ppm
CLD i60 LC	NO _x oder NO	0...3 ppm	0...1000 ppm
IRD Combi i60 CO₂/CO H	CO ₂	0...0,5 %	0...20 %
	CO	0...0,5 %	0...10 %
IRD Combi i60 CO₂/CO L	CO ₂	0...0,1 %	0...6 %
	CO	0...250 ppm	0...20 000 ppm

Tabelle 4: In AMA i60 verbaute Analysatoren (AVL 2008).

3.1.3 Klimatisierung Prüfkammer

Die von der Firmen Fischer & CO in Kooperation mit den Firmen Schmelzer und Technotrend gebaute Klimatisierung der Prüfkammer ist so ausgelegt, dass neben den gesetzlichen Abgastests auch Klimatests möglich sind. Durch den breiten Temperaturbereich von -35 bis +55°C ist es möglich, das Kaltstartverhalten, das Aufheizverhalten, die Scheibenenteisung oder bei hohen Temperaturen die Motorkühlung, die Innenraumklimatisierung und den Bauteilhitzeschutz zu untersuchen.

- 210.000 m³/h Luftumwälzung
- Temperaturbereich -35°C bis +55°C
- Feuchteregulierung durch Be- und Entfeuchtung
- Ein Vorkonditionierraum mit Klimatisierung für 8 Fahrzeuge
- Zusätzlich ein Vorkonditioniercontainer

Der zusätzliche Vorkonditioniercontainer ermöglicht eine Hoch- oder Tieftemperaturkonditionierung außerhalb der Prüfkammer. Auf einem Luftkissenlager kann der gesamte Container an das Prüfkammertor befördert werden, und dort luftdicht angedockt werden.

3.1.4 *Fahrtwindgebläse*

Das höhen- und längsverstellbare Fahrtwindgebläse der Firma LTG bewirkt durch die große Auslassdüse und den hohen Luftdurchsatz eine gute Fahrzeugumströmung, was vor allem für Klimauntersuchungen relevant ist.

- Fläche Düsenauslass 1,3 m²
- Fahrtwind Normaldüse bis 140 km/h
- Fahrtwind Hochgeschwindigkeitsdüse bis 200 km/h
- Luftdurchsatz bis 200.000 m³/h
- Maximale Beschleunigung und Verzögerung 2 m/s²



Abbildung 3.5: Fahrtwindgebläse LTG

3.1.5 *Sonnensimulation*

Die Sonnensimulation der Firmen Ulbrich und Hönle besteht aus 24 an der Decke montierten und 4 mobil einsetzbaren Strahlern, mit deren Hilfe die Aufheizung von Fahrzeugen durch Sonneneinstrahlung simuliert wird. Durch an den Seiten angebrachte Reflektoren wird, auf einer Höhe von einem Meter über dem Boden gemessen, eine homogene Strahlungsverteilung von 1200W/m² dargestellt.

3.2 Allgemeine Vorbereitung der Versuchsträger

Für die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen kommen zum überwiegenden Teil zwei PKW der oberen Mittelklasse mit Allradantrieb, ein Fahrzeug mit einem 3 Liter Commonrail-Sechszylinder Dieselmotor und ein Fahrzeug mit einem 5,5 Liter V8 Benzinmotor, bei denen Applikationsmotorsteuergeräte verbaut sind, zum Einsatz. Mit Hilfe von Messmodulen der Serie ES600 der Firma ETAS ist es möglich, sowohl Daten des Motorsteuergerätes als auch Signale von Thermoelementen zu erfassen und mit der Applikationssoftware INCA aufzuzeichnen. Für die Durchführung der Ausrollversuche kommt zusätzlich ein GPS-System der Firma DEWETRON zum Einsatz. Dieses System unterscheidet sich zu gewöhnlichen GPS-Systemen aus dem Navigationsbereich durch die sehr hohe Abtastfrequenz von 100Hz, welche ein Erfassen von kleinsten Geschwindigkeitsunterschieden ermöglicht. Aufgezeichnet wird das Signal mit der ebenso von DEWETRON stammenden Software DEWESOFT 6.3.

3.3 Abgasmesstechnik

3.3.1 Messen des verdünnten Abgases

Das CVS-Verfahren

Das Grundprinzip des im vorigen Kapitel bereits erwähnten CVS-Messverfahrens beruht darauf, dass das gesamte Abgas des Motors mit einem Luftstrom verdünnt wird und proportionale Teilströme der Verdünnungsluft und des Luft-/Abgasgemisches in Beuteln für die anschließende Analyse gesammelt werden (Haas 1991). Die Verdünnung des Abgases führt zu einer starken Verringerung von Kondensationen und chemischen Reaktionen der Abgasprobe. Der Gesamtvolumenstrom wird durch der Pumpe vorgeschaltene kritisch betriebene Venturidüsen konstant gehalten, sodass sich ein dem Rohabgasstrom umgekehrt proportionaler Verdünnungsluftstrom einstellt. Daher der Name CVS – Constant Volume Sampling. Da das Probenvolumen und die Temperaturen bekannt sind, kann nach jeder Testphase aus den Schadstoffkonzentrationen im Abgasbeutel und dem zugehörigen Verdünnungsluftbeutel die absolute Schadstoffmasse pro Phase berechnet werden. Eine komplizierte Messung der momentanen Abgasmasse ist bei diesem Verfahren nicht nötig.

Jedoch ist hier auch ein wesentlicher Nachteil des CVS-Verfahrens mit Beutelmessung zu erkennen. Da das Ergebnis ein Integralwert über die Messphase ist, ist es nicht möglich, die Schadstoffkonzentrationen bestimmten Betriebszuständen des Motors zuzuordnen. Hierfür

sind andere Verfahren nötig, die entweder verdünnt oder unverdünnt modal, das bedeutet kontinuierlich, die Schadstoffkonzentrationen messen. Dies ist zwar vom Gesetzgeber nur bei Dieselmessung für Kohlenwasserstoffe vorgesehen, wird aber speziell in der Entwicklung auch für die anderen Abgaskomponenten benötigt, um das Emissionsverhalten der Motoren noch weiter verbessern zu können.

Es gilt:

Aus einer Schadstoffkonzentration lässt sich mit (3.1) die Masse der jeweiligen Abgaskomponente errechnen (70/220/EG):

$$M_i = \rho_i * V * C_i \quad (3.1)$$

$$M_{i\ mix} = M_{i\ Abg} + M_{i\ Luft} \quad (3.2)$$

$$M_{i\ Abg} = M_{i\ mix} - M_{i\ Luft} = \rho_i * [V_{mix} * C_{i\ mix} - (V_{mix} - V_{Abg}) * C_{i\ Luft}] \quad (3.3)$$

M_i...Masse der jeweiligen Abgaskomponente

ρ_i...Dichte der jeweiligen Abgaskomponente

V...Volumen

C_i...Konzentration der jeweiligen Abgaskomponente

Das Verhältnis von Gesamtvolumenstrom zu Abgasvolumenstrom wird über den Verdünnungsfaktor beschrieben:

$$DF_{real} = \frac{V_{mix}}{V_{Abg}} \quad (3.4)$$

DF_{real}...realer Verdünnungsfaktor

V_{mix}...Volumen des verdünnten Abgases

V_{abg}...Volumen des Abgases

Der Verdünnungsfaktor ändert sich, wie in nachfolgender Abbildung 3.6 schematisch dargestellt, stark dynamisch und umgekehrt proportional dem Abgasvolumen, während das Gesamtvolumen verfahrensbedingt konstant bleibt. Die Verdünnungsstufe der CVS muss immer so gewählt werden, dass der Verdünnungsfaktor nie so klein wird, dass es zu Wasseraustritt kommt, jedoch im Durchschnitt klein genug ist, um gut messbare Schadstoffkonzentrationen im Beutel zu haben. Wird zu stark verdünnt, nähern sich die

Schadstoffkonzentrationen, gerade bei neuen Fahrzeugen mit sehr niedrigen Emissionen, der Nachweisgrenze.

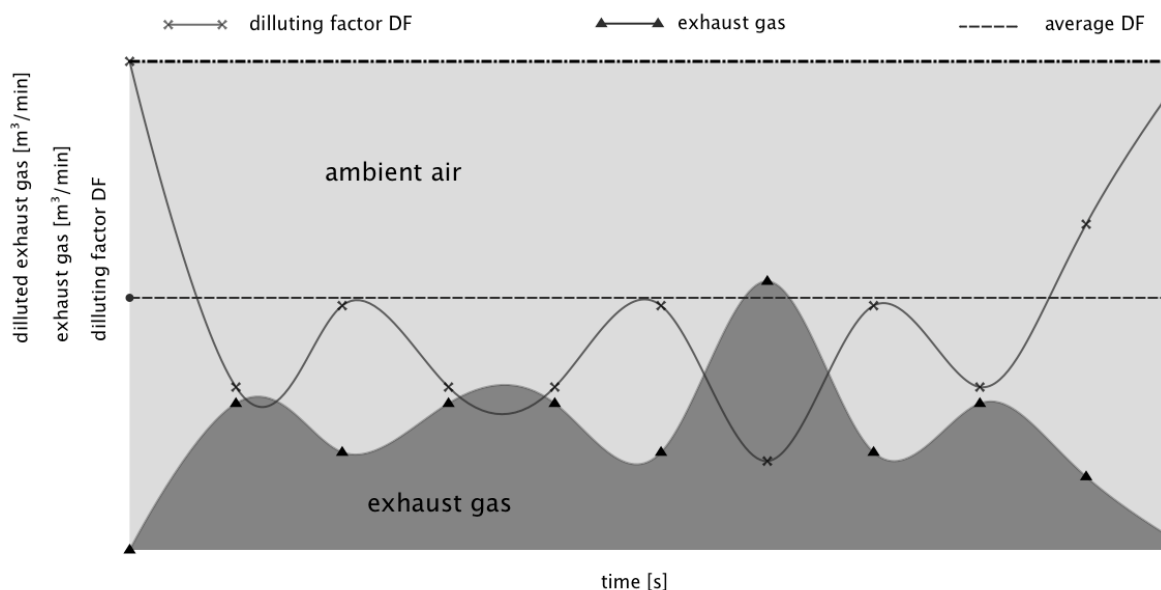


Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der Zusammensetzung des verdünnten Abgases und Verlauf des Verdünnungsfaktors.

Da das Abgasvolumen nicht bekannt ist, wird der Verdünnungsfaktor über die Schadstoffkonzentrationen im verdünnten Abgas und den stöchiometrischen Faktor berechnet (88/77/EWG).

$$F_s = 100 * \frac{x}{x + \frac{y}{2} + 3,76 * (x + \frac{y}{2})} \quad (3.5)$$

$$DF = \frac{F_s}{C_{CO_2} + (C_{HC} + C_{CO})10^{-4}} \quad (3.6)$$

F_s...stöchiometrische Faktor

x,y...Kraftstoffzusammensetzung C_xH_y

DF...Verdünnungsfaktor

C_i...Konzentrationen der jeweiligen Abgaskomponenten

Ist die Kraftstoffzusammensetzung nicht bekannt, kann für Benzin und Diesel auch ein stöchiometrischer Faktor von 13,4 angenommen werden. Hiermit ergibt sich dann für (3.3):

$$M_{i\text{ Abg}} = \rho_i * V_{\text{mix}} * [C_{i\text{ mix}} - C_{i\text{ Luft}} * (1 - \frac{1}{DF})] \quad (3.7)$$

Die Berechnung des Verdünnungsfaktors aus der Zusammensetzung des verdünnten Abgases stellt eine Vereinfachung dar, die zum einen eine ideale Verbrennung eines Kraftstoffes mit HC-Verhältnis 1,85 voraussetzt, und zum anderen davon ausgeht, dass sich in der Verdünnungsluft kein nennenswerter Anteil an CO₂ befindet. Diese Vereinfachungen waren zur Zeit der Einführung der nach wie vor gültigen Berechnungsvorschriften absolut ausreichend, stellen aber heute, wo die Grenzwerte nur mehr zum Teil weniger als ein Prozent der damaligen Grenzwerte betragen, eine Fehlerquelle dar (GIFHORN et al. 2000). So kann es vorkommen, dass die Massenemissionen bei niedrig emittierenden Fahrzeugen negative Werte annehmen. Die immer geringer werdenden Schadstoffemissionen sind auch Grund dafür, dass bei früher gebräuchlichen Verdünnungsfaktoren von DF > 10 die Schadstoffemissionen im Bereich der Nachweisgrenze sind. Daher ist es nötig, das Abgas weniger zu verdünnen, was natürlich eine höhere Gefahr von Kondensation mit sich bringt. Dem kann durch Maßnahmen wie Trocknung der Verdünnungsluft und Beheizen aller Leitungen sowie der Beutel entgegen gewirkt werden. Die Temperatur des verdünnten Abgases im Verdünnungstunnel sollte 40°C nicht unterschreiten und die Beuteltemperatur beträgt vorzugsweise 22°C < T_{Beutel} < 30°C . Sie ist nach oben begrenzt, da ab 30°C die Eigenemission des Beutelmateriale stark zunimmt (BEHRENTH et al. 2001).

Zur Messung der Konzentrationen sieht der europäische Gesetzgeber folgende Abgasanalysatoren vor (70/220/EG):

- **CO und CO₂** *nichtdispersiver Infrarot-Absorptionsanalysator (NDIR)*
- **HC bei Fzg. mit Ottomotor** *Flammionisations-Analysator (FID) propankalibriert*
- **HC bei Fzg. mit Dieselmotor** *Flammionisations-Analysator beheizt auf 190 °C ±10 °C (HFID)*
- **NO_x** *Entweder Chemilumineszenz-Analysator (CLA) mit NO_x/NO-Konverter oder nichtdispersiver Ultraviolett-Resonanz-Absorptionsanalysator (NDUVR) mit NO_x/NO-Konverter*

Zur Bestimmung der Partikelmasse wird ein definierter Teilstrom des verdünnten Abgases durch spezielle Filter geleitet und die abgeschiedene Masse gravimetrisch ermittelt.

3.3.2 Kontinuierliche Messung des Rohabgases

Mit der CVS Methode kann nur jenes Abgas analysiert werden, das vom Auspuffendrohr abgesaugt und im Verdünnungstunnel verdünnt wird. Speziell zur Applikation von Abgasnachbehandlungssystemen ist es wichtig, die Zusammensetzung des Abgases an verschiedenen Stellen des Abgassystems zu kennen. Dies ist durch die Entnahme von Rohabgas und dessen modale (kontinuierliche) Analyse möglich.

Die hierbei eingesetzten Abgasanalysatoren entsprechen im Grundprinzip jenen der verdünnten Messung. Sie sind wegen der fehlenden Verdünnungsluft für höhere Messbereiche ausgelegt. Der Wassergehalt im Rohabgas ist gegenüber dem verdünnten Abgas deutlich höher, was auf Grund der Querempfindlichkeiten der Analysatoren, auf welche im Kapitel 3.3.3 näher eingegangen wird, zu einer Verfälschung der Ergebnisse führt. Um dies zu vermeiden und auch einem unkontrollierten Wasseraustritt entgegenzuwirken, wird das gesamte Abgas über einen Kühler geleitet, in welchem das Wasser kondensiert und ausgeschieden wird.

Will man neben den Konzentrationen auch die Schadstoffmassen ermitteln, sind zusätzliche Maßnahmen nötig, da der Volumenstrom nicht, wie bei der CVS-Methode, konstant ist, sondern stark diskontinuierlich und in der Höhe unbekannt. Zum feststellen des Volumenstroms kommen verschiedene Methoden zum Einsatz, von denen repräsentativ drei genannt werden sollen:

- Rohabgasvolumenmessung durch zusätzliche Messinstrumente
- Berechnung aus den Eingangsgrößen Kraftstoffverbrauch und Ansaugluft
- Tracer Methode

Da bei der untersuchten Anlage ein CO₂-Tracer System verbaut ist, soll dieses näher erklärt werden. Bei der CO₂-Trace Methode wird aus dem Tunnel der CVS-Anlage verdünntes Abgas entnommen, und bezüglich der CO₂-Konzentration direkt in einem IRD-Analysator analysiert. Nachdem der Volumenstrom im CVS-Tunnel bekannt ist, ergibt sich auf Grund der Massengleichheit in Verbindung mit der CO₂-Konzentration des Rohabgases folgender Zusammenhang:

$$C_{Tracer_{feucht}} * V_{CVS_{feucht}} = C_{Roh_{trocken}} * V_{Roh_{trocken}} \quad (3.8)$$

$$V_{Roh\,trockn} = \frac{C_{Tracer\,feucht}}{C_{Roh\,trocken}} * V_{CVS\,feucht} \quad (3.9)$$

Diese Methode setzt voraus, dass immer CO₂ im Abgas vorhanden ist, was bei Schubabschaltung nicht der Fall ist. In diesen Phasen ist die Tracer Methode „blind“ und würde sinnlose Werte für das Volumen ergeben. Um den Fehler zu minimieren wird daher die CO₂-Konzentration bei beispielsweise 2,5% nach unten begrenzt.

Im Fall der genannten Tracer Methode kann die Schadstoffmasse unmittelbar aus dem ermittelten Rohvolumen und der Rohkonzentration errechnet werden, da beide im trockenen Zustand vorliegen. Liegen trockene Konzentrationen und feuchtes Volumen vor, wie es bei der Berechnung des Abgasvolumenstroms aus der Einspritzmenge und der angesaugten Luftmasse aus Motorsteuergerätedaten der Fall ist, müssen die Konzentrationen erst auf feuchten Bezug korrigiert werden.

Neben dem unbekanntem Abgasvolumenstrom und der Feuchtekorrektur muss noch ein weiterer Aspekt betrachtet werden. Das Volumen des Abgasstroms muss immer mit der zugehörigen Konzentration zeitlich synchronisiert werden. Da jeder Analysator verschieden lange Ansprechzeiten und ungleich lange Zuleitungen hat, ergeben sich für jede gemessene Abgaskomponente unterschiedlich lange Totzeiten, um welche die einzelnen Konzentrationen relativ zum Volumenstrom zeitlich verschoben werden müssen. Die Schadstoff-Massenemission ergibt sich aus dem Produkt von Abgasvolumen, Schadstoffkonzentration und der Schadstoffdichte. Ist die Konzentration zum Volumen verschoben, ergeben sich falsche Massen. Deutlich ist dies in **Abbildung 3.7** nach 12,5s zu sehen, wo trotz Anstieg von Leistung und Abgasemission kein Anstieg von NO_x-Massenemission entsteht. Auf die Totzeitverschiebung wird in Kapitel 4.3.2 noch genauer eingegangen.

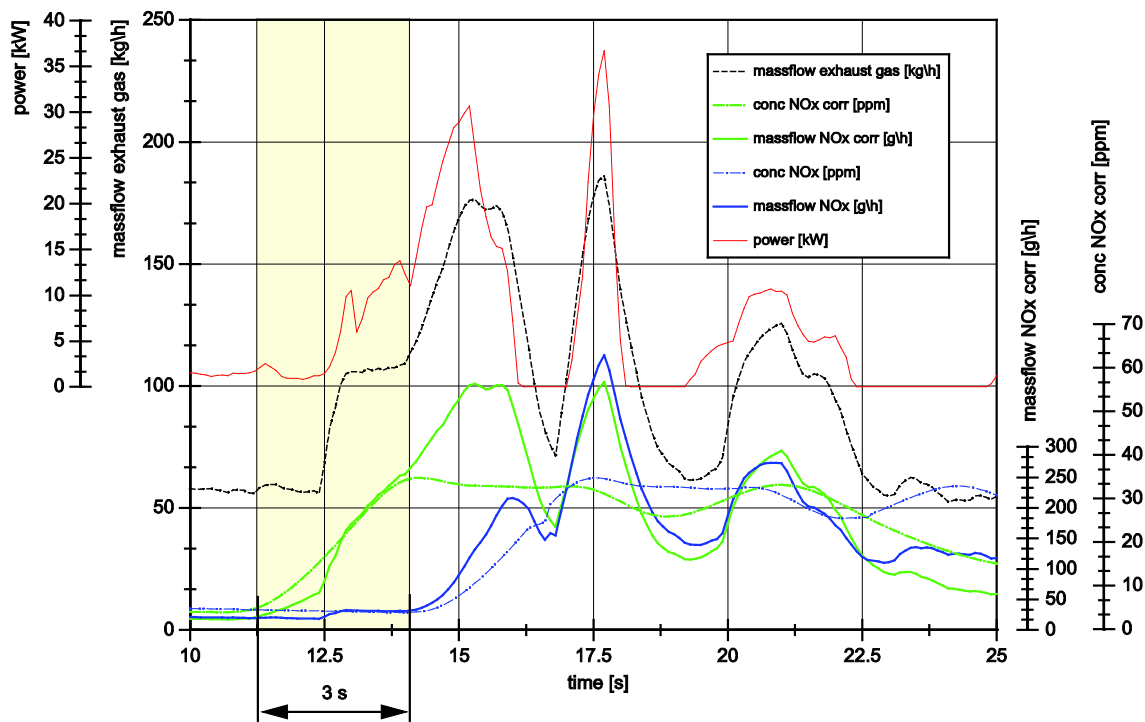


Abbildung 3.7: Einfluss der Totzeitverschiebung auf NOx- Massenkonzentration

3.3.3 Abgasanalysatoren

3.3.3.1 Nichtdispersives Infrarotmessverfahren (NDIR)

Mit Hilfe des nichtdispersiven Infrarotanalysators, auch IRD genannt, können Konzentrationen von CO und CO₂ beziehungsweise auch anderer Komponenten gemessen werden, wobei hier Einschränkungen gelten.

Grundlage der CO/CO₂ Messung ist das Verfahren der Absorbitionsspektroskopie. Sie wird im Wellenbereich von Mikrowellen bis zum Ultravioletten, hauptsächlich aber im Infraroten eingesetzt, wobei der Messeffekt durch die Wechselwirkung der elektromagnetischen Strahlung mit inneren, diskreten Energiezuständen des Moleküls beziehungsweise seiner Atome entsteht (KLINGENBERG 1995).

Die Energie der Moleküle setzt sich im Wesentlichen aus folgenden Anteilen zusammen:

- der diskreten Energie der Valenzelektronen E_e
- der diskreten Energie der Schwingungen der im Molekül gebundenen Atome um die Gleichgewichtslage E_s

- der diskreten Energie der Rotation des Gesamtmoleküls E_r

$$E \approx E_e + E_s + E_r \quad (3.10)$$

Je nach Anregung der Moleküle ändern sich, wie in **Abbildung 3.8** zu sehen ist, ihre Schwingungszustände.

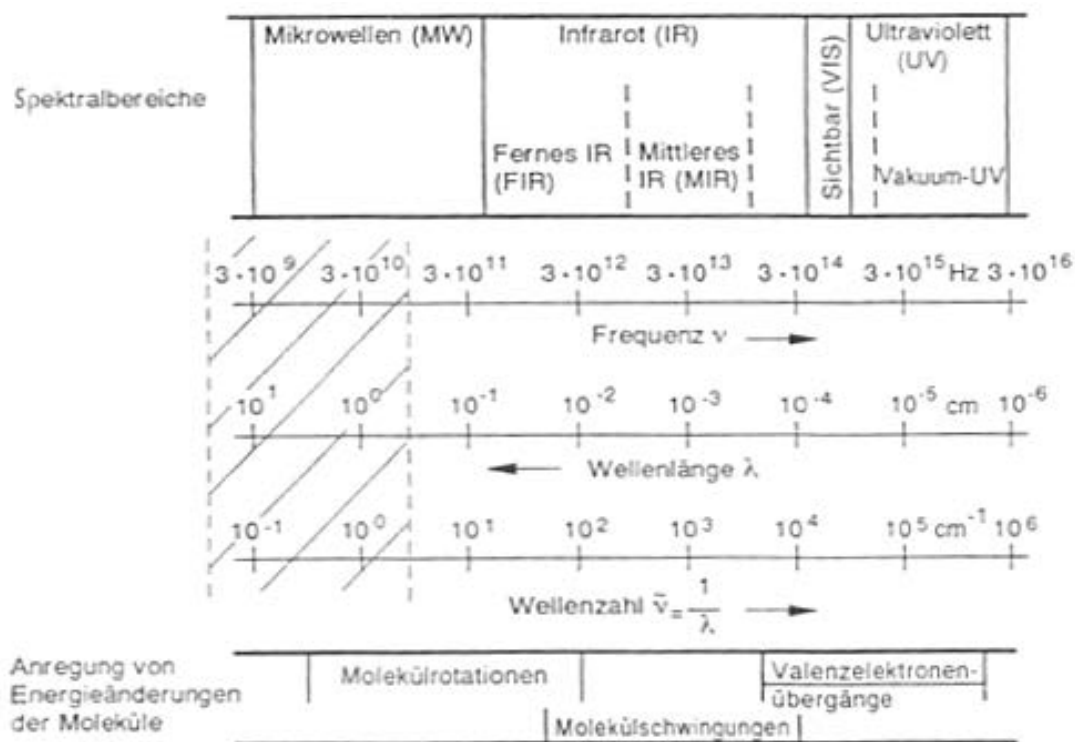


Abbildung 3.8: Anregungsarten bei Molekülen in den einzelnen Spektralbereichen (KLINGENBERG 1995).

Eine Änderung der Schwingungsenergie bewirkt eine Absorption oder Emission in unterschiedlichen Wellenbereichen. Man unterscheidet grundlegend zwischen Emissions- und Absorptionsspektren, wobei man die Emissionsspektren wiederum in Fluoreszenz und Phosphoreszenz unterteilt. Bei Fluoreszenz geht man davon aus, dass Moleküle die durch Absorption von Strahlung in höhere Energiezustände gelangt sind, durch Emission von Strahlung unmittelbar wieder zu tieferen Energiezuständen zurückkehren. Bei Phosphoreszenz kann es durch so genannte metastabile Anregungen zu Zuständen kommen, bei denen die Emission die Anregung um mehrere Sekunden überdauert.

Die für die Abgasmesstechnik relevanten Spektren sind die Absorptionsspektren. Nach dem Kirchhoffschen Gesetz absorbiert ein Körper diejenige Strahlungsart, welche er bei Anregung emittiert. Das bedeutet, dass ein gelöster oder gasförmiger Stoff, welcher mit einem

kontinuierlichen Spektrum angeregt wird, aus diesem die für ihn charakteristische Wellenlänge absorbiert beziehungsweise in der Intensität schwächt. Die verbleibende Intensität kann daraufhin gemessen werden. Diese Absorption folgt dem Lambert–Beerschen Gesetz:

$$I = I_0 e^{-\varepsilon \cdot (\tilde{\nu}) c \cdot d} \tag{3.11}$$

Hierbei beschreibt I die durchgehende Strahlung, I_0 die Ausgangsstrahlung, ε den Absorptionskoeffizienten, c die Konzentration und d die Länge des Gasvolumens. Bei niedrigen Konzentrationen kann man diese Exponentialfunktion in erster Näherung als Gerade beschreiben, wodurch hier die Absorption direkt proportional der Konzentration ist.

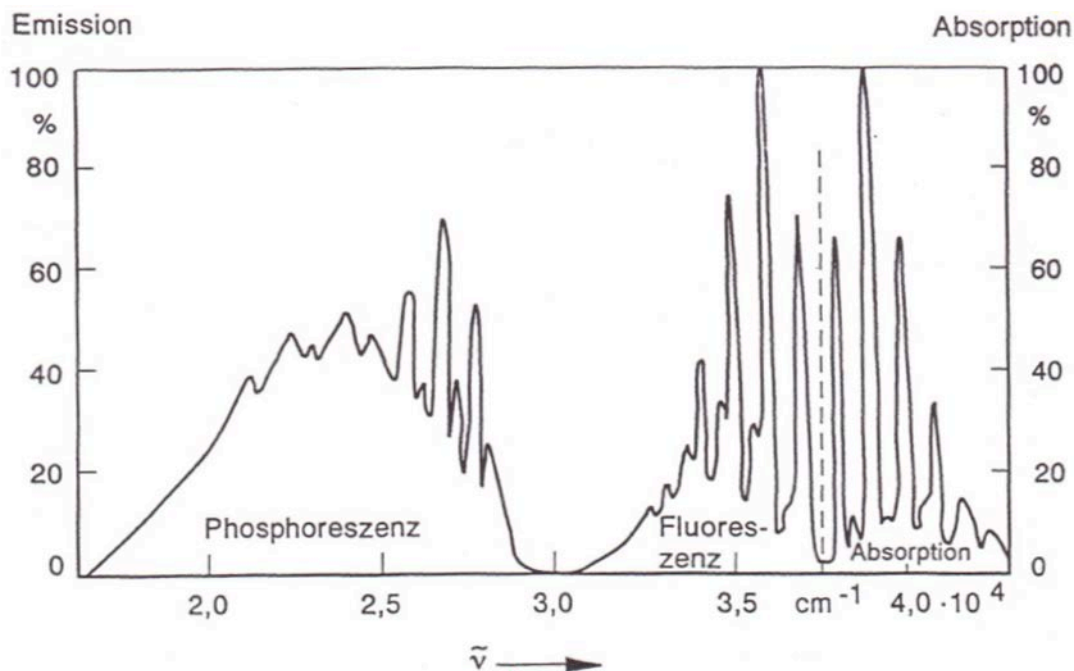


Abbildung 3.9: Absorption-, Fluoreszenz- und Phosphoreszenz-Elektronenspektren des Benzols bei 77K (KLINGENBERG 1995).

Wie am Beispiel für Benzol in **Abbildung 3.9** gezeigt wird, ändern sich die Elektronenspektren abhängig von der Anregung und damit von der Wellenzahl $\tilde{\nu}$. Die Absorptionsschwerpunkte verschiedener Gase liegen getrennt voneinander, können sich aber überschneiden (siehe **Abbildung 3.11**). Insbesondere die Überschneidung mit H_2O - und HC-Banden stellt sich als problematisch dar, da diese Überlagerung zu Querempfindlichkeiten und damit zu Verfälschungen führt.

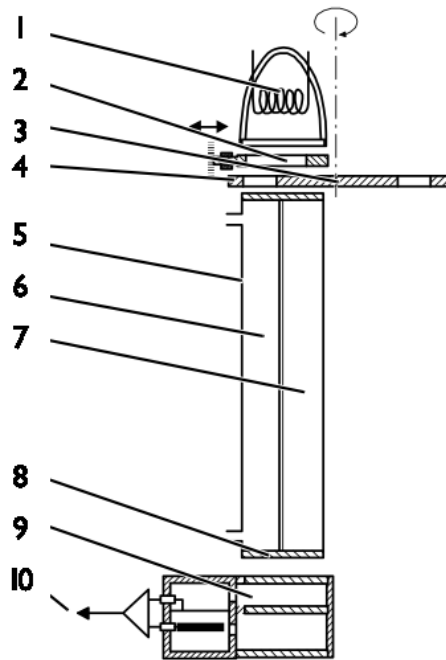


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung des IRD-Prinzips (AVL 2008); (1)IR-Strahler, (2) Filter, (3) Antrieb Chopperrad, (4) Chopperrad, (5) Analyseküvette, geteilt, (6) Messeite, (7) Vergleichsseite, (8) Filter, (9) Detektor, (10) Ausgangssignal.

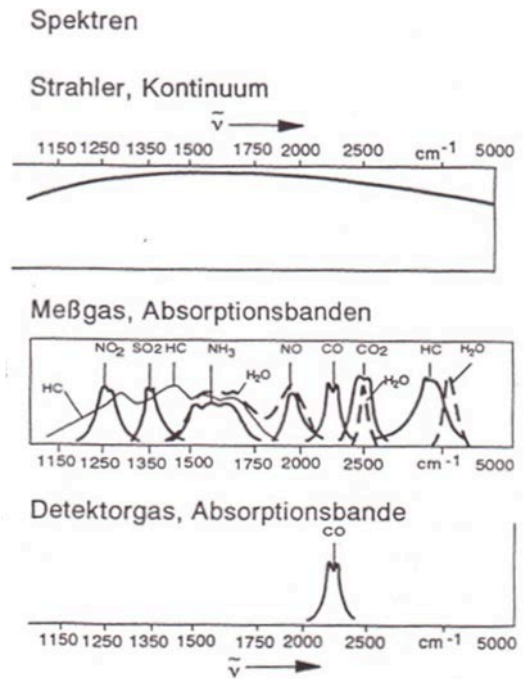


Abbildung 3.11: Spektrum des Strahlers, Absorptionsbanden des Messgases, Absorptionsbande des Detektorgases CO (KLINGENBERG 1995).

Dieser bisher beschriebenen Eigenschaften bedient man sich beim NDIR-Messverfahren. Ein Infrarot-Strahler erzeugt eine konstante homogene IR-Strahlung, welche einen Filter und ein rotierendes Chopperrad (Lichtzerhacker) durchläuft. Durch den Filter werden jene ungewünschten Bereiche des Strahlungsspektrums herausgefiltert, die verstärkte Querempfindlichkeiten verursachen. So gelangt abwechselnd Infrarot-Strahlung gleicher Intensität in die Mess- oder Vergleichsseite der geteilten Küvette. Die Vergleichsseite ist mit einem Gas gefüllt, zum Beispiel Stickstoff, welches die Strahlung nicht absorbiert und somit einen Referenzwert darstellt. Auf der Messeite hingegen wird, abhängig von der Konzentration der gesuchten Komponente, die Strahlung zum Teil absorbiert. Nach einem weiteren Filter trifft die Reststrahlung auf einen optopneumatischen Detektor, welcher die Strahlung aus Mess- und Vergleichsseite abwechselnd erfasst (AVL 2008). Beim Detektor gibt es verschiedene Bauweisen, im AVL IRD i60 COL ist beispielsweise ein Detektor mit 3 Kammern verbaut die alle mit der zu messenden Gasart gefüllt sind (**Abbildung 3.12**). Die

vordere und hintere Kammer sind durch ein infrarotstrahlungsdurchlässiges Fenster getrennt, und jeweils durch einen Ausgleichskanal mit der seitlichen Kammer verbunden. Diese ist durch eine Kondensator-Membrane geteilt (KLINGENBERG 1995).

Trifft nun IR-Strahlung in die vordere Kammer, wird diese zum größten Teil vom Gas absorbiert, der restliche Teil gelangt durch das IR-strahlungsdurchlässige Fenster in die hintere Kammer. Dies führt zu einer unterschiedlich starken Erwärmung des Gases, was eine Ausdehnung und somit Druckdifferenz mit sich bringt, die sich durch die Kanäle in die seitliche Kammer fortsetzt. Dort kommt es zu einer Durchbiegung der dünnen Membrane, was eine Kapazitätsänderung zur Folge hat, die in einem Signalprozessor digitalisiert und weitergegeben wird.

- 1... IR-Strahlung
- 2... vordere Kammer
- 3... Ausgleichsöffnung
- 4... seitliche Kammer
- 5... Kondensator Membrane
- 6... Signal zum Signalprozessor
- 7... feststehende Kondensatorplatte
- 8... Fenster, IR-strahlungsdurchlässig
- 9... hintere Kammer

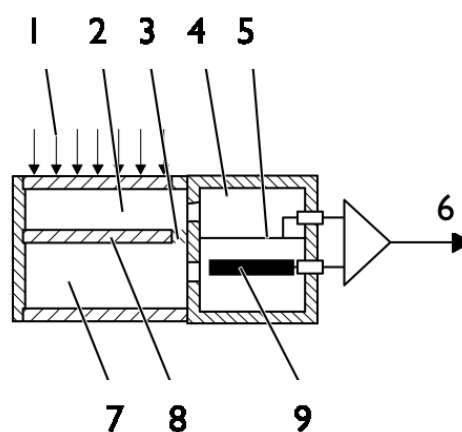


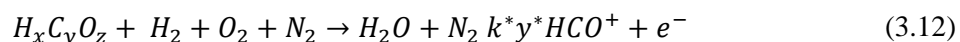
Abbildung 3.12: Schematischer Aufbau des Detektors (AVL 2008)

Wird die Konzentration zu hoch, ist sie nicht mehr proportional zur Absorption, was zu Messfehlern führt. In diesem Fall kann man sich mit kürzeren Messküvetten behelfen. Um einen größeren Messbereich abdecken zu können, ist es sinnvoll zumindest zwei Küvettenlängen für zwei Messbereiche (CO_{high}/CO_{low}) vorzusehen, um über den ganzen Messbereich maximale Linearität gewährleisten zu können.

3.3.3.2 Flammionisationsdetektor (FID)

Mit einem Flammionisationsdetektor lassen sich Kohlenwasserstoffkonzentrationen im Abgas messen. Das Messprinzip beruht darauf, dass sich organisch gebundene Kohlenwasserstoffe in einer Wasserstoffflamme ionisieren lassen, wobei die Anzahl der Ionen proportional dem gebundenen Kohlenstoffanteil ist. Diese Ionen lassen sich zwischen zwei Elektroden als

Strom messen, welcher proportional zu einem HC-Referenzwert ist. Bei diesem Verfahren handelt es sich um eine Relativmessung, bei der die gemessene Stromstärke mit einer ebenso gemessenen Stromstärke eines Referenzgases mit bekannter Konzentration verglichen wird. Als Referenzgas wird entweder Methan (CH₄) oder Propan (C₃H₈) verwendet (AVL 2008). Der FID verbrennt in einer Flamme entsprechend folgender Gleichung:



Das zu analysierende Gas wird dem Brenngas (Wasserstoff oder ein Gemisch aus Wasserstoff und Helium) vor der Brennerdüse zugemischt und verbrennt daraufhin als Diffusionsflamme unter Zuführung von kohlenwasserstofffreier Luft. Bei dem in **Abbildung 3.13** dargestellten Schema eines FID dient die Brennerdüse gleichzeitig als Anode, während die Kathode ringförmig um die Flamme angeordnet ist.

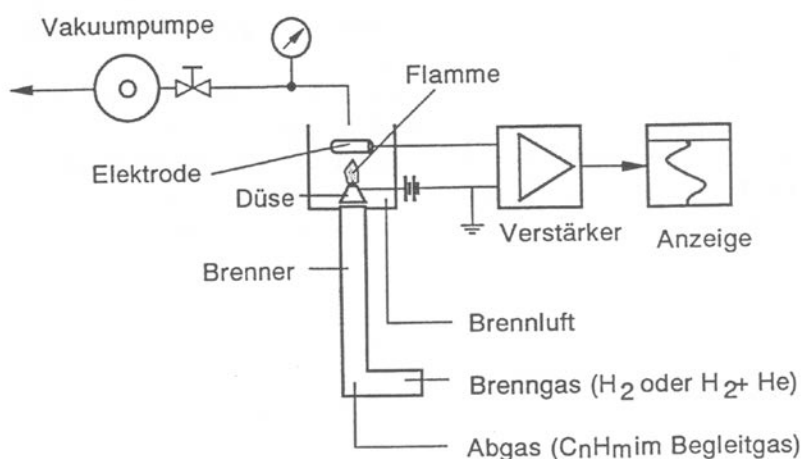


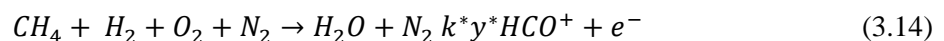
Abbildung 3.13: Prinzipschema eines FID im Unterdruckbetrieb (KLINGENBERG 1995)

Da bei diesem Verfahren das Ergebnis einen Summenwert aller Kohlenwasserstoffe (THC – Total Hydro Carbon) darstellt, kann man keine weitere Aussage über die genaue Zusammensetzung treffen. So kommt es vor, dass zum Beispiel ein Molekül Hexan (C₆H₁₄) sechsmal stärker in das Ergebnis einfließt als ein Molekül Methan mit nur einem Kohlenstoffatom. Um verschiedene Einzelkomponenten messbar zu machen, werden zwei unterschiedliche Verfahren verwendet.

Zur Aufschlüsselung in mehrere Einzelkomponenten bedient man sich der Gaschromatographie. Bei diesem Verfahren werden die Komponenten in Trennsäulen

voneinander isoliert, und anschließend mit Hilfe des FID analysiert. Hierbei ist es wichtig zu wissen, dass nicht nur die Anzahl der C-Atome Einfluss auf das Ergebnis hat, sondern auch die Molekülstruktur. Je nach Substanz ergeben sich mehr oder weniger große Abweichungen von Ionenzahl zu C-Atomzahl, was mit Hilfe von Responsefaktoren ausgedrückt wird (KLINGENBERG 1995). Diese vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Faktoren geben die unterschiedliche Effizienz der Moleküle gegenüber Propan an und liegen im Bereich zwischen 0,8 und 2. Da es sich bei der räumlichen Trennung der Einzelkomponenten mittels Gaschromatographen um ein diskontinuierliches Verfahren handelt, ist es nur zur Beutelmessung und nicht zur modalen (kontinuierlichen) Messung geeignet.

Zur Messung von CH₄ wird oft ein dem FID vorgeschaltener Konverter verwendet, in dem alle Nicht-Methan-Kohlenwasserstoffe (Non Methan Hydro Carbon) entsprechend (3.13) zu CO₂ und H₂O oxidiert werden.



Nach Gleichung (3.14) lässt sich nun das verbleibende Methan, wie zuvor beschrieben, ionisieren und im FID messen. Als Referenzgas wird hier ebenso Methan verwendet, was einen Response Faktor von 1 zur Folge hat.

3.3.3.3 Chemilumineszenz-Analysator (CLA)

Mit einem Chemilumineszenz-Analysator (CLA bzw. CLD) ist man in der Lage Stickstoffmonoxid-Konzentrationen im Abgas zu messen. Das Verfahren beruht auf der Spontanreaktion von NO mit Ozon (O₃), bei der sich elektronisch angeregtes NO₂^{*} bildet.



In einer Reaktionskammer werden die Reaktionspartner NO und O₃ rasch vermischt und reagieren sofort miteinander. Das entstehende angeregte NO₂^{*} kann seinen Energieüberschuss entweder spontan in Form von optisch messbarer Fluoreszenzstrahlung, der so genannten Chemilumineszenzstrahlung $h\nu$, oder, wenn sich geeignete Reaktionspartner finden, in Form von kinetischer Energie an die Moleküle M wieder abbauen (AVL 2008).



Bei der gewünschten Strahlung $h\nu$ handelt es sich vorwiegend um Infrarotstrahlung mit einem Wellenlängenbereich von 600nm bis 3,2 μ m. Allerdings wird unter Normalbedingungen nur ein geringer Teil der Energie in Form von Strahlung abgebaut. Wesentlichen Einfluss auf das Verhältnis von strahlender zu strahlungsloser Energieabgabe haben der Reaktionsdruck und die Reaktionspartner. Je geringer der Druck, umso wahrscheinlicher ist die Abgabe von Energie in Form von Strahlung. Die entstehende Strahlung gelangt über einen optischen Filter zum Detektor (Photomultiplier), welcher in einer Kühlkammer installiert ist (AVL 2008). Dieser erzeugt einen der Lichtstärke und damit der Konzentration proportionalen Strom, welcher in Folge weiterverarbeitet wird.

Um neben NO auch NO_x (=NO+NO₂) messen zu können, muss das Stickstoffdioxid im Vorfeld zu Stickstoffmonoxid reduziert werden. Dies geschieht in einem vorgeschalteten Konverter. Wichtig ist, dass der Konvertierungswirkungsgrad des Konverters zumindest 95% erreicht (AVL 2008).

Um gleichzeitig NO und NO_x messen zu können, wird entweder der Konverter beziehungsweise weggeschaltet (was jedoch nur bei statischen Motorenprüfständen sinnvoll durchgeführt werden kann), oder es werden parallel zwei CLD Analysatoren betrieben von denen einer mit und einer ohne Konverter ausgestattet ist. Das für dieses Verfahren benötigte Ozon wird in einem Ozonator mittels elektrischer Energie und reinem Sauerstoff erzeugt.

3.3.4 Bestimmung von Partikelemissionen

Die Partikelemission wird durch die an einem Filter abgeschiedene Partikelmasse beschrieben. Zu diesem Zweck wird ein Teilstrom aus dem Verdünnungstunnel einer CVS-Anlage mit einer, je nach Gesetzgebung des jeweiligen Landes unterschiedlichen, Entnahmesonde abgezweigt und unter definierten Bedingungen durch ein oder zwei hintereinander gelegene spezielle Filter geleitet. Die Filter müssen vor und nach der Messung unter genauer Einhaltung von Konditionier- und Stabilisierungsrichtlinien gewogen werden, um die Masse der sich darauf abgeschiedenen Partikel feststellen zu können. Damit das Messergebnis nicht durch Partikel aus der Umgebungsluft verfälscht wird, ist eine staubfreie

Umgebung besonders wichtig. Kontrolliert wird dies durch das Wägen von unbeladenen Referenzfiltern vor und nach dem Versuch.

Aus nachfolgender Tabelle sind die Anforderungen an die Messtechnik und die Umgebung nach der europäischen und der amerikanischen Gesetzgebung ersichtlich:

	<i>Europa bis Euro 4 (70/220/EG)</i>		<i>Amerika EPA (CRF-40 §1065)</i>	
Filterdurchmesser	verschiedene		Ø 46,5 ±0,6mm	
Filterhalter	T-Abgas max. 325K ±3K Durchflussmenge max. ±5% konstant		T-Abgas 320,15K ±5K 20cm vor und nach Filter, beheizte Leitungen empfohlen, 100cm/s Strömungsgeschwindigkeit am Filter	
Vorkonditionierung der Filter	>8h, max. 56h		>30min	
Anforderungen an Konditionier- bzw. Stabilisierungsumgebung	T-Umgebung 295K ±3K	T-Taupunkt 282,5K ±3K	T-Umgebung 295,15K ±1K	T-Taupunkt 282,65K ±1K
Überprüfung der Umgebung	Vergleichsfilter(paare)		Vergleichsfilter	
Nachkonditionierung und Stabilisierung der Filter	max. 1h nach Abgastest in klimatisierte Umgebung bringen und dort 2-36h konditionieren		>30min	
Anforderungen an Waage	Genauigkeit 1µg		Wiederholgenauigkeit 0,5µg	

Tabelle 5: Bedingungen für Filterkonditionierung nach europäischer und amerikanischer Gesetzgebung

Die Masse der abgeschiedenen Partikel ist jedoch nur ein Summenwert über einen Zyklus und ermöglicht keine Aussagen über die zeitliche Verteilung der Emissionen oder die Größenverteilung der Partikel. Gerade die besonders gesundheitsrelevanten Ultrafeinpartikel werden durch die Massenbetrachtung nicht genügend erfasst. Aus diesem Grund werden immer mehr Verfahren entwickelt, mit denen man in der Lage ist, die Partikel zu zählen, beziehungsweise auch ihre Größenverteilung zu erfassen.

Mit Inkrafttreten von Euro 5+ und Euro 6 sieht der Gesetzgeber neben der gravimetrischen Bestimmung der Partikelemission auch einen Grenzwert für die Partikelanzahl vor. Das nun vorgelegte Program zur Messung der Partikelanzahl ist das Ergebnis des von der

Europäischen Wirtschaftskommission (UN/ECE) 2001 eingesetzten Particle Measurement Program (PMP) und dessen gleichnamiger Arbeitsgruppe. Die in der ECE-R83 beschriebene Messmethode sieht eine Entnahme eines Teilstroms des verdünnten Abgases am Ende des Verdünnungstunnels vor.

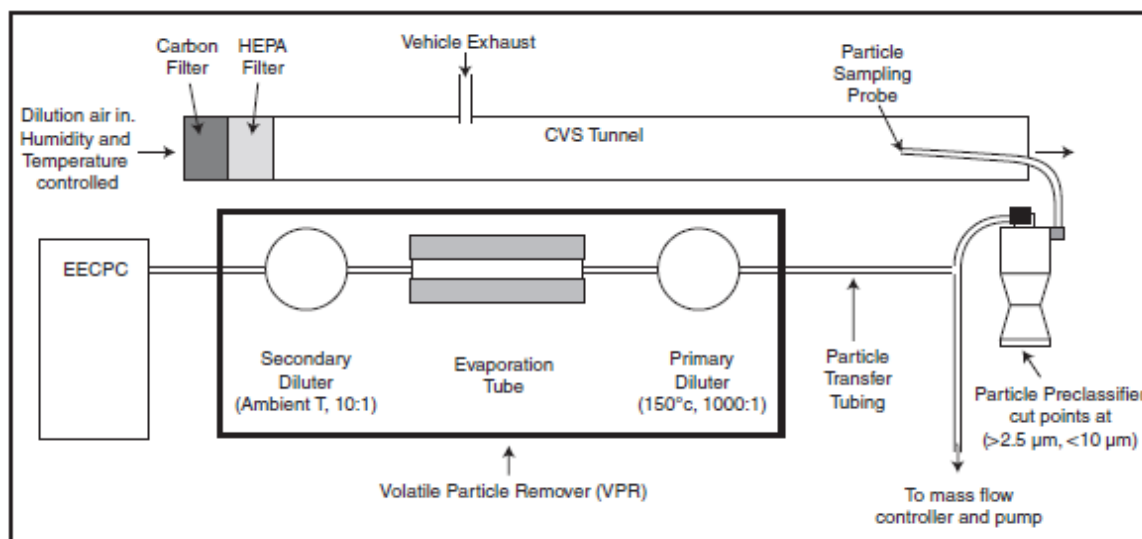


Abbildung 3.14: Schema des empfohlenen Partikelzählsystems (TSI nach ECE-R83)

Durch eine geeignete Probeentnahmesonde oder einen Vorabscheider werden Partikel mit einem Durchmesser größer als $2,5\mu\text{m}$ abgeschieden. Daraufhin wird das Abgas mit gefilterter Umgebungsluft verdünnt, und flüchtige Partikel im VPR (volatile particle remover) verdampft. In einem weiteren Verdünnungsschritt wird das Abgas wieder abgekühlt und bei einer Temperatur von unter 35°C einem CPC (condensation particle counter) zugeführt.

Dieser Partikelzähler zählt in weiterer Folge über optische Streulicht-Detektion die Anzahl der Partikel im verdünnten Abgas in $\#/ \text{cm}^3$, ohne dabei Rücksicht auf die Größenverteilung zu nehmen. Um auch Ultrafeinpartikel zählen zu können, werden diese durch Aufkondensieren von Butanol in einer übersättigten Umgebung stark vergrößert.

Ein Kritikpunkt an dieser Methode ist, dass es nicht möglich ist zu erkennen, ob die flüchtigen Partikel, welche durch Nukleation oder Kondensation im Abgas entstehen, im VPR vollständig beseitigt wurden. Dies wäre durch Messung der Größenverteilung der Partikel erkennbar. Sind alle Kondensationspartikel entfernt, ergibt sich eine gauß'sche Größenverteilung. Sind hingegen Kondensationspartikel im analysierten Abgas vorhanden, führt dies zu einer zusätzlichen starken Konzentration der Partikelanzahl im Bereich von $d < 30\text{-}50\text{nm}$. (IVANISIN 2004).

4 Methodik

4.1 Methodik der Erfassung des Fahrwiderstandes – Der Ausrollversuch

Zur Simulation des Fahrwiderstandes auf dem Rollenprüfstand ist es nötig, diesen für jede Geschwindigkeit zu kennen. Diese Fahrwiderstandskurve gilt es im Versuch auf der Straße zu ermitteln. Zu diesem Zweck gibt es von den verschiedenen Gesetzgebern für zertifizierte Abgasuntersuchungen genaue Vorschriften, welche einleitend beschrieben werden sollen. Da diese im Gesetz beschriebene Durchführung sehr zeitaufwändig und auf öffentlichen Straßen kaum durchführbar ist, wird in weiterer Folge ein abgewandeltes Verfahren, basierend auf TU Graz/VKM_THD, weiterentwickelt und bezüglich der Qualität der Ergebnisse untersucht.

4.1.1 Grundlagen der Fahrwiderstandsmessung

Für die Messung von Abgasemissionen und Verbrauch am Rollenprüfstand ist es unbedingt nötig, die Fahrwiderstände jedes Fahrzeuges zu kennen und diese zu simulieren. Der Fahrwiderstand setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen (Bosch 2003):

$$F_w = F_L + F_R + F_{St} + F_a \quad (4.1)$$

F_w	... Fahrwiderstand
F_L	... Luftwiderstand
F_R	... Rollwiderstand
F_{St}	... Steigungswiderstand
F_a	... Beschleunigungswiderstand

Der Luftwiderstandskraft F_L errechnet sich aus dem Luftwiderstandsbeiwert c_w , der Luftdichte ρ , der Fahrzeugstirnfläche A sowie der Anströmgeschwindigkeit v (BRAESS und SEIFFERT 2005).

$$F_L = \frac{1}{2} c_w * A * \rho * v^2 \quad (4.2)$$

Der Luftwiderstandsbeiwert wird nicht nur von der Fahrzeugform, sondern auch vom Anstellwinkel des Fahrzeuges bezüglich der Strömung, dem Bodenabstand und dem Einfederzustand der Reifen in die Radhäuser beeinflusst (Mahr 2001). Durch den

quadratischen Einfluss der Anströmgeschwindigkeit ist bei höheren Geschwindigkeiten der Einfluss des Luftwiderstandes auf den Gesamtwiderstand dominant.

Der Rollwiderstand wiederum wird durch die Fahrzeugmasse m , den Rollwiderstandsbeiwert f sowie den Steigungswinkel α beschrieben, wobei der Steigungswinkel für Fahrwiderstandsmessungen vernachlässigt werden kann, da der Cosinus für zulässige Fahrbahneigungen immer etwa Eins ist (4.3). Der Steigungswiderstand hängt nur von der Fahrzeugmasse und dem Steigungswinkel ab (4.4).

$$F_R = m * g * f * \cos \alpha \quad (4.3)$$

$$F_{St} = m * g * \sin \alpha \quad (4.4)$$

Für den Beschleunigungswiderstand ist es nicht ausreichend die Fahrzeugmasse zu betrachten, sondern es ist auch nötig die Massenträgheit des Antriebstranges zu berücksichtigen. Braess und Seifert (2005) sehen dafür unter Vernachlässigung der rotierenden Bauteile mit kleineren Trägheitsmomenten sowie konstanter Rotationsenergie folgende Gleichungen vor:

$$F_a = m_{red} \frac{dv}{dt} \quad (4.5)$$

$$m_{red} = m + \frac{J_R + i^2 * J_m}{r_{dyn} * r_{stat}} \quad (4.6)$$

J_R ...*Massenträgheitsmoment der Räder [kgm²]*

J_m ...*Massenträgheitsmoment des Motors [kgm²]*

r_{dyn} ...*Dynamischer Reifenhalmmesser [mm]*

r_{stst} ...*Statischer Reifenhalmmesser [mm]*

i ...*Gesamtübersetzung [-]*

m ...*Fahrzeugmasse [kg]*

m_{red} ...*reduzierte Fahrzeugmasse [kg]*

Da in den seltensten Fällen alle Trägheitsmomente bekannt sind, werden vom Gesetzgeber für die Simulation des Fahrwiderstandes am Rollenprüfstände Tabellen mit äquivalenten Schwungmassen bereitgestellt, beziehungsweise Zuschlagsfaktoren vorgegeben.

Der Fahrwiderstand lässt sich neben der Aufgliederung in die Einzelwiderstände auch als quadratisches Polynom darstellen, welches neben den massenproportionalen Koeffizienten A und B auch einen dem Luftwiderstand proportionalen Koeffizienten C aufweisen.

$$F_w = A + B * v + C * v^2 \quad (4.7)$$

4.1.2 Vorschriften zur Durchführung von Ausrollversuchen

Im Folgenden wird die Durchführung von Ausrollversuchen nach 70/220/EG beschrieben. Wichtigstes Kriterium zur erfolgreichen Durchführung von Ausrollversuchen ist die Wahl einer geeigneten Teststrecke. Diese muss möglichst gerade und eben sein, mit einer auf 0,1% konstanten Steigung die 1,5% an keiner Stelle überschreiten darf. Die Strecke sollte lang genug sein, um aus einer Geschwindigkeit von 130km/h bis zum Stillstand rollen zu können. Ist dies nicht möglich, kann man die Geschwindigkeitsbereiche auch stückeln, also beispielsweise von 130km/h bis 90km/h, von 90km/h bis 50km/h und von 50km/h bis 20km/h. Zum Zeitpunkt des Tests muss die Fahrbahn trocken sein.

Bei Wind ist ein repräsentativer Test nicht möglich, daher ist die Windgeschwindigkeit begrenzt. Sie darf 0,7m über der Fahrbahn gemessen in Fahrtrichtung im Durchschnitt höchstens 3m/s betragen, wobei Windböen 5m/s nicht überschreiten dürfen. Quer zur Fahrbahn beträgt die höchst zulässige Windgeschwindigkeit 2m/s. Auch die Außentemperatur und der Luftdruck dürfen höchstens 7,5% von den Referenzbedingungen ($p=100\text{kPa}$, $T=293,2\text{K}$) abweichen. Zwar werden Abweichungen zu den Referenzbedingungen rechnerisch korrigiert, allerdings würde der Einfluss der Temperatur auf den Rollwiderstand der Reifen außerhalb dieser Grenzen zu hoch und das Ergebnis verfälscht werden. Das Fahrzeug muss vor dem Versuch inklusive Fahrer und Messequipment gewogen und auf korrekten Reifendruck überprüft werden.

Ist die Vorbereitung in allen Punkten abgeschlossen, wird das Fahrzeug auf eine Geschwindigkeit von mindestens 10km/h über die zu messende Geschwindigkeit beschleunigt und bei Fahrzeugen mit Automatikgetriebe der Gangwahlhebel in die neutrale Position gebracht, beziehungsweise bei Fahrzeugen mit Handschaltgetriebe der Leerlauf eingelegt. Nun wird die Zeit T_1 gemessen die benötigt wird, um das Fahrzeug von der Geschwindigkeit V_2 auf V_1 zu verzögern. Diese Messung wird in die gegengesetzte Richtung zur Bestimmung von T_2 wiederholt.

$$V_2 = V + \Delta V, \quad V_1 = V - \Delta V \quad (4.8)$$

$$T_i = t_{V_2i} - t_{V_1i} \quad (4.9)$$

Die beiden Zeiten werden nun arithmetisch zum Wert T gemittelt. Die Messungen müssen so oft wiederholt werden, bis sich eine statistische Genauigkeit $p \leq 2\%$ einstellt.

$$T = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n T_i \quad (4.10)$$

Die statistische Genauigkeit ist definiert durch:

$$p = \frac{ts}{\sqrt{n} * \frac{100}{T}} \quad (4.11)$$

- t ... Tabellenwert
- n ... Anzahl der Prüfungen
- s ... Standardabweichung

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T)^2}{n - 1}} \quad (4.12)$$

Mit den auf diese Weise ermittelten Zeiten lässt sich in Folge die Leistung errechnen:

$$P = \frac{M * V * \Delta V}{500 * T} \quad (4.13)$$

- P ... Leistung in kW
- V ... Prüfgeschwindigkeit in m/s
- ΔV ... Abweichung der Geschwindigkeit von der Geschwindigkeit V in m/s
- M ... Bezugsmasse
- T ... Zeit in Sekunden

4.1.3 Korrektur auf Referenzbedingungen

Da der Luftwiderstand eine Funktion der Geschwindigkeit, der Stirnangriffsfläche und der Luftdichte ist, verändert sich dieser bei Variation von Umgebungsdruck und Temperatur. Aus diesem Grund muss das Ergebnis auf Referenzbedingungen (293,15K, 100kPa) korrigiert werden.

$$P_{\text{korrigiert}} = K * P_{\text{gemessen}} \quad (4.14)$$

$$K = \frac{R_R}{R_T} * [1 + K_R(t - t_0)] + \frac{R_{Aero}}{R_T} * \frac{\rho_0}{\rho} \quad (4.15)$$

R_R ... Rollwiderstand bei Geschwindigkeit v

R_{AERO} ... Luftwiderstand bei Geschwindigkeit v

R_T ... Antriebswiderstand gesamt ($=R_R+R_{AERO}$)

K_R ... Temperaturkorrekturfaktor $8,64 \times 10^{-3}/^{\circ}C$

t ... Umgebungstemperatur in $^{\circ}C$

t_0 ... Bezugstemperatur $=20^{\circ}C$

ρ ... Luftdichte während der Prüfung

ρ_0 ... Luftdichte bei Bezugsbedingungen ($20^{\circ}C, 100kPa$)

Sind R_R/R_T und R_R/R_{AERO} nicht bekannt, kann man mit der Gleichung (4.16) und den dazugehörigen Tabellenwerten a und b (**Tabelle 6**) das Verhältnis von Rollwiderstand zu Gesamtwiderstand bestimmen.

$$\frac{R_R}{R_T} = a * M + b \quad (4.16)$$

M ... Fahrzeugmasse

a, b ... Tabellenwerte

v [km/h]	a	b
20	$7,24 \times 10^{-5}$	0,82
40	$1,59 \times 10^{-4}$	0,54
60	$1,96 \times 10^{-4}$	0,33
80	$1,85 \times 10^{-4}$	0,23
100	$1,63 \times 10^{-4}$	0,18
120	$1,57 \times 10^{-4}$	0,14

Tabelle 6: Parameter zur Korrektur der Fahrwiderstände auf Referenzbedingungen (70/220/EWG 2007).

So ist es möglich, die ermittelten Leistungen auf Referenzbedingungen zu korrigieren. Die somit erhaltenen sechs Punkte dienen als Stützstellen zur Ermittlung der Fahrwiderstandskurve und damit zur Ermittlung der Parameter A, B und C.

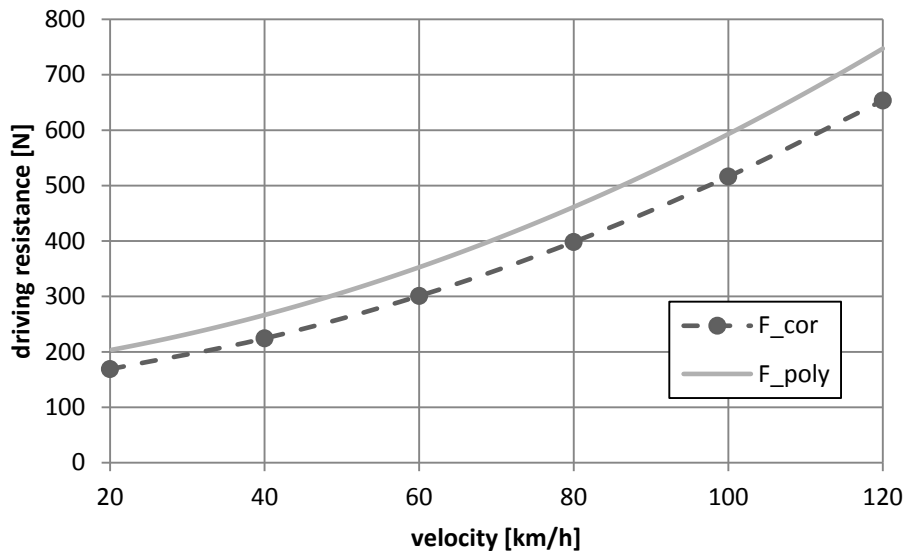


Abbildung 4.1: Fahrwiderstandskurven unkorrigiert sowie durch 6 Stützstellen auf Referenzbedingungen korrigiert.

4.1.4 Praktische Durchführung von Ausrollversuchen

Bei Versuchen am Rollenprüfstand hat sich gezeigt, dass die Temperatur des Antriebstrangs starke Auswirkungen auf den Rollwiderstand hat. Um in den Ausrollversuchen reproduzierbare Bedingungen zu realisieren, wird vor Beginn der Ausrollversuchen das Aufwärm – und Abkühlverhalten der Getriebe betrachtet.

Ziel dieser Untersuchung ist es, festzustellen, wie lange die jeweiligen Getriebe unter bestimmten Bedingungen brauchen, um Beharrungstemperatur zu erreichen beziehungsweise zu testen, wie schnell sie während des Ausrollversuches auskühlen. Zu diesem Zweck wird auf ein Versuchsfahrzeug zurück gegriffen, welches für frühere Untersuchungen bereits mit Temperaturmessstellen in Schaltgetriebe, Verteilergetriebe sowie Vorderachs- und Hinterachsgetriebe ausgestattet ist.

Als Versuchsstrecke für die Ausrollversuche wird eine etwa 1,5km lange gerade Strecke im Süden von Graz gewählt, die sich auf Grund ihrer Länge, geringer Steigung und Welligkeit sowie durch den gleichmäßigen Straßenbelag gut für die Durchführung der Tests eignet. Wegen des starken Verkehrsaufkommens werden sämtliche Tests am späten Abend

durchgeführt, um den öffentlichen Verkehr nicht zu behindern. Um die Versuche auch tagsüber durchführen zu können, werden in Folge in Kapitel 5.1 noch alternative Strecken untersucht und die Vergleichbarkeit der verschiedenen Ergebnisse überprüft.

Vor Beginn des Versuchs müssen folgende Vorbereitungen getroffen werden:

- Installation und Test der Messsysteme
- Betankung
- Wiegen des Fahrzeuges inklusive Fahrer und Messeinrichtung
- Überprüfen des Reifendrucks im kalten Zustand

Der Gesetzgeber schreibt für Ausrollversuche ein betriebswarmes Fahrzeug vor, was eine Warmfahrphase voraussetzt.

Ist das Fahrzeug vorbereitet und in betriebswarmem Zustand, kann man mit der Durchführung des Tests beginnen. Da die Testbedingungen auf der Straße nie ganz ideal sind, müssen sämtliche Versuche immer in beide Fahrtrichtungen durchgeführt werden, um später leichte Steigungswiderstände oder Windeinflüsse durch Mittelwertbildung eliminieren zu können. Hier sei erwähnt, dass dies nur für nahezu ideale Versuchsbedingungen funktioniert. Voraussetzungen sind Windstille sowie eine Hangneigung $<1\%$, da ansonsten das Berücksichtigen von Hangabtriebskräften und Wind unbedingt notwendig wird, was wiederum einen deutlichen Mehraufwand hinsichtlich der Messtechnik bedeutet (Mahr 2001).

Das Fahrzeug wird nun auf eine Geschwindigkeit von mindestens 10km/h über die Testausgangsgeschwindigkeit beschleunigt, und daraufhin frei rollen gelassen. Da die gewählte Strecke nicht lange genug ist um die Fahrzeuge bis zum Stillstand ausrollen zu lassen, werden drei Geschwindigkeitsintervalle gewählt für welche die Geschwindigkeitsverläufe ermittelt werden. Diese sind 120-90km/h, 90-50km/h und 50-20km/h. Diese Stückelung ist von Gesetzes wegen zulässig. Mit jeder Geschwindigkeit sind jeweils vier Tests in jede Fahrtrichtung durchzuführen, wobei auf die Veränderung von Wind und Temperatur zu achten ist. Um ein zu starkes Auskühlen der Getriebe und in Folge eine Verfälschung der Ergebnisse zu verhindern, werden die Intervalle in der Reihenfolge 50-20km/h, 120-90kmh und 90-50km/h durchgeführt. Über der Zeit aufgetragen ergibt sich für diesen Versuch folgender Geschwindigkeitsverlauf:

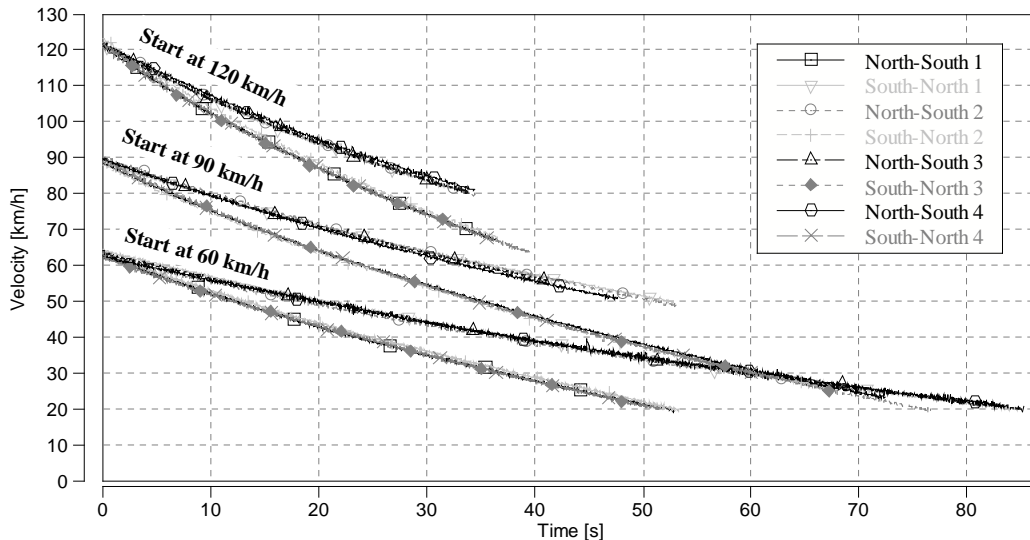


Abbildung 4.2: Ausrollverläufe bei jeweils vier Versuchen pro Ausgangsgeschwindigkeit und Fahrtrichtung.

4.1.5 Auswertung der Ausrollversuche

Trotz der geringen mittleren Steigung der Versuchsstrecke von 0,26% und Windstille ist ein deutlicher Unterschied der Geschwindigkeitsverläufe der beiden Fahrtrichtungen erkennbar. Durch Bildung des arithmetischen Mittels der Geschwindigkeitsintervalle erhält man die Ausgangswerte für die weitere Berechnung. Da nicht alle Versuche eines Geschwindigkeitsintervalls gleich lange dauern, werden die Messreihen nach unten auf die Dauer der kürzesten Messung beschnitten. Um den Einfluss von Messstreuungen und Straßenunebenheiten zu verringern, werden die Verläufe mit Hilfe eines Tiefpassfilters mit einer Grenzfrequenz von 0,01Hz geglättet.

Im nächsten Schritt werden für jedes Zeitintervall aus der Geschwindigkeitsdifferenz pro Intervall die dazugehörige Verzögerung a berechnet und über die reduzierte Masse daraufhin die zugehörigen Verzögerungskräfte F_a ermittelt.

$$F_a = m_{red} * \frac{\Delta v}{\Delta t} \tag{4.17}$$

Ebenso lässt sich, wie in Kapitel 4.1.1 erläutert, der Fahrwiderstand für die jeweiligen Geschwindigkeiten durch ein Polynom zweiten Grades mit den noch unbekanntem Koeffizienten A , B und C beschreiben.

$$F_w = A + B * v + C * v^2 \tag{4.18}$$

Definitionsgemäß gilt:

$$F_a \equiv F_w \tag{4.19}$$

Aus diesem Grund wird im nächsten Schritt versucht, den Fehler zwischen Polynom und Messwert zu minimieren, was durch das Verfahren der kleinsten Quadrate geschieht.

$$\min \sum_{t=1}^n (F_{a,t} - F_{w,t})^2 \tag{4.20}$$

Durchgeführt wird dies mit Microsoft Excel durch die Verwendung der Solver Funktion. Die drei Koeffizienten werden als veränderbare Parameter definiert und die Summe der Fehlerquadrate als Minimum. Somit erhält man Werte für A , B und C , mit deren Hilfe man die approximierte Ausrollkurve darstellen kann. **Abbildung 4.3** zeigt den mit GPS gemessene Geschwindigkeitsverlauf und das dazu ermittelte Geschwindigkeitspolynom. In der Detailansicht links ist zu sehen, wie das mit 100Hz aufgezeichnete GPS-Rohsignal streut.

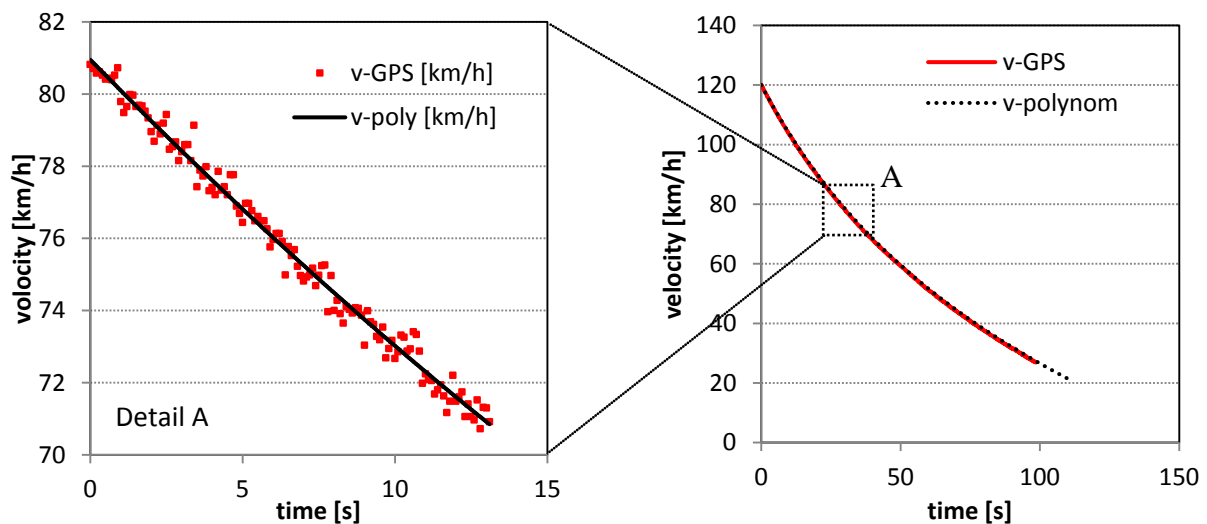


Abbildung 4.3: Vergleich GPS-Geschwindigkeitsverlauf zu Polynom.

Da jeder Ausrollversuch stark von den Umgebungsbedingungen abhängt, werden die Parameter entsprechend den gesetzlichen Vorschriften noch auf Bezugsbedingungen normiert. Der Gesetzgeber sieht in der Vorschrift 70/220/EG, wie im Kapitel 4.1.3 bereits beschrieben, eine Korrektur auf Referenzbedingungen bei sechs verschiedenen Geschwindigkeiten vor. Die

so ermittelten korrigierten Fahrwiderstandskräfte dienen als Stützstellen für eine neuerliche Annäherung der Ausrollkurve durch Variation der drei Koeffizienten.

Das Ergebnis sind nun die drei Koeffizienten A, B und C, welche in Folge für die Einstellung des Rollenprüfstandes verwendet werden.

4.2 Überprüfung des Fahrwiderstandes am Prüfstand

Der Fahrwiderstand setzt sich, wie unter 4.1.1 beschrieben, aus Luftwiderstand, Rollwiderstand, Steigungswiderstand und Beschleunigungswiderstand zusammen. Diese Widerstände gilt es, auf dem Rollenprüfstand zu simulieren. Zur Verifizierung dieser Simulation werden Referenzmessungen auf der Straße durchgeführt, und im Anschluss mit Messungen auf der Rolle verglichen. Dieser Vergleich geschieht über die aus dem Motorsteuergerät aufgezeichneten Einspritzzeiten, über welche sich der Lastpunkt des Motors exakt bestimmen lässt. Zu diesem Zweck wird ein Verfahren von IVANISIN weiterentwickelt und auf die speziellen Anforderungen adaptiert.

Da sämtliche Straßenmessungen auf ebener Fahrbahn durchgeführt werden, kann der Steigungswiderstand vernachlässigt werden. Im Abschnitt 4.2.1 werden auf der Straße Referenzmessungen bei konstanter Geschwindigkeit durchgeführt wodurch auch der Beschleunigungswiderstand zu Null wird. Der verbleibende konstante Luft- und Rollwiderstand soll nun über Vergleich der Einspritzzeiten aus dem Steuergerät auf dem Rollenprüfstand verifiziert werden. Daraufhin wird unter Punkt 4.2.2 die Simulation der Massenträgheit bei Vollastbeschleunigung untersucht.

4.2.1 Verbrauchsmessung bei Konstantfahrt

Unter der Annahme, dass der Rollenprüfstand genau den Fahrwiderstand simuliert, welcher auch auf der Straße vorherrscht, muss sich unter gleichen klimatischen Bedingungen bei gleicher Geschwindigkeit auch der gleiche Kraftstoffverbrauch einstellen wie auf der Strasse. Hierfür werden mit den beiden Versuchsfahrzeugen bei verschiedenen Geschwindigkeiten Referenzmessungen auf der Strasse durchgeführt, wobei sämtliche relevanten Motordaten mit INCA aufgezeichnet werden.

Ottomotor

<i>effektive Einspritzzeit Bank 1/2</i>	<i>[s]</i>
<i>Fahrzeuggeschwindigkeit</i>	<i>[km/h]</i>
<i>Motordrehzahl</i>	<i>[1/min]</i>
<i>Kühlwassertemperatur</i>	<i>[°C]</i>
<i>Motoröltemperatur</i>	<i>[°C]</i>
<i>Ansauglufttemperatur T1 HFM</i>	<i>[°C]</i>
<i>Umgebungsdruck</i>	<i>[hPa]</i>

Dieselmotor

<i>Einspritzmenge pro Zyklus</i>	<i>[mm³/cyc]</i>
<i>Fahrzeuggeschwindigkeit</i>	<i>[km/h]</i>
<i>Motordrehzahl</i>	<i>[1/min]</i>
<i>Kühlwassertemperatur</i>	<i>[°C]</i>
<i>Motoröltemperatur</i>	<i>[°C]</i>
<i>Ansauglufttemperatur T1 HFM</i>	<i>[°C]</i>
<i>Umgebungsdruck</i>	<i>[hPa]</i>

Die Umgebungsbedingungen haben starken Einfluss auf die Messergebnisse, wodurch es nötig ist, die Versuche an einem windstillen Tag auf einer absolut ebenen und trockenen Fahrbahn durchzuführen. Eventuelle Luftdruckunterschiede sind ebenso wie Temperaturunterschiede in der nachfolgenden Auswertung zu berücksichtigen. Um zu vermeiden, dass Schwankungen im Ladestrom Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben, werden in den Fahrzeugen Schalter zur Trennung der Batterie vom Generator installiert. Als Versuchsstrecke wird dieselbe Straße südlich von Graz gewählt, auf der auch die Ausrollversuche durchgeführt werden. Die durchschnittliche Steigung von 0,26% wird durch Mittelwertbildung der in beide Fahrtrichtungen durchgeführten Versuche kompensiert. Der Reifendruck und das Gewicht werden vor dem Versuch überprüft und dokumentiert.

Sind alle Vorbereitungen abgeschlossen, wird die Strecke jeweils in beide Richtungen bei den Geschwindigkeiten 40km/h, 60km/h, 80km/h sowie 100km/h je vier Mal durchfahren. Die Geschwindigkeit wird hierbei nach der aus dem Steuergerät ausgegebenen Geschwindigkeit per Tempomat eingestellt. Diese Ermittlung der Geschwindigkeit wird der eigentlich exakteren Ermittlung per GPS, wie sie bei den Ausrollversuchen angewandt wird, vorgezogen, da sich dadurch eine leichte Reproduzierbarkeit am Rollenprüfstand ergibt.

Aus den aufgezeichneten Daten wird für jede Geschwindigkeit ein stabiler Bereich herausgenommen und jeweils die mittlere Einspritzzeit, beziehungsweise die mittlere Einspritzmenge, ermittelt.

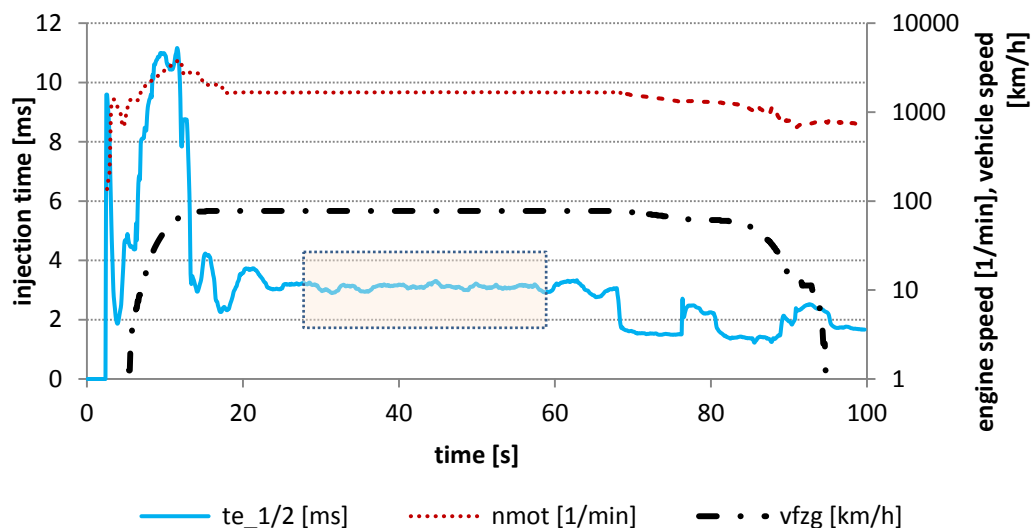


Abbildung 4.4: Verlauf der Einspritzzeiten bei 80km/h Konstantfahrt.

Im Anschluss wird derselbe Versuch bei gleichen klimatischen Bedingungen am Rollenprüfstand durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen.

4.2.2 Massensimulation bei Vollastbeschleunigung

Die am besten reproduzierbare Beschleunigung ist die Vollastbeschleunigung. Daher wird diese auch zur Verifizierung der Massensimulation des Rollenprüfstandes herangezogen. Zum Beweis der korrekten Massensimulation werden in Vergleichsmessungen zwischen Straße und Rollenprüfstand folgende Größen verglichen.

- absolute Beschleunigungszeit von 40-90km/h
- Geschwindigkeitsvergleich Straße zu Rolle
- Vergleich der Einspritzmengen während des Beschleunigungsvorgangs

Die Messungen werden mit einem PKW mit Commonrail Dieselmotor der 3l-Klasse, Allradantrieb und Automatikgetriebe durchgeführt. Um den Schlupf möglichst gering zu halten, starten die Messungen bei 40km/h im zweiten Gang. Das Versuchsfahrzeug verfügt über eine Speedlimiter Funktion, über welche sich trotz durchgetretenem Fahrpedal die Geschwindigkeit begrenzen lässt. Diese Limiterfunktion wird auf 40km/h gesetzt und das

Fahrpedal bis zum Kickdownpunkt durchgedrückt ($\alpha=100$). Daraufhin wird die Limiterfunktion deaktiviert und im gesperrten zweiten Gang beschleunigt, bis das Fahrzeug in den dritten Gang schaltet. Hierbei werden über INCA sämtliche aus 4.2.1 bekannten Motordaten, ergänzt um die Fahrpedalstellung und die Ganginformation, aufgezeichnet.

Testbedingungen

<i>Fahrzeug</i>	<i>Diesel, 3l CR, 4WD, Automatik</i>
<i>Fahrzeuggewicht incl. Fahrer</i>	<i>1972kg</i>
<i>Reifendruck (Vo/Hi)</i>	<i>2,5/2,5bar</i>
<i>Umgebungstemperatur</i>	<i>25°C</i>
<i>Messsystem</i>	<i>ETAS ES690/ INCA</i>
<i>Auswertung</i>	<i>ETAS MDA/ AVL Concerto/ EXCEL</i>

Die in **Abbildung 4.5** dargestellte Messaufzeichnung kann in folgende Phasen unterteilt werden:

- 1 ... Konstantfahrt mit aktivierter Limiterfunktion bei 40km/h*
- 2 ... Gaspedal voll durchgetreten (vor Kickdownpunkt)*
- 3 ... Limiterfunktion wird deaktiviert – das Fahrzeug beschleunigt*
- 4 ... Bei Auswertung berücksichtigter Bereich*
- 5 ... Fahrzeug schaltet automatisch in den dritten Gang*

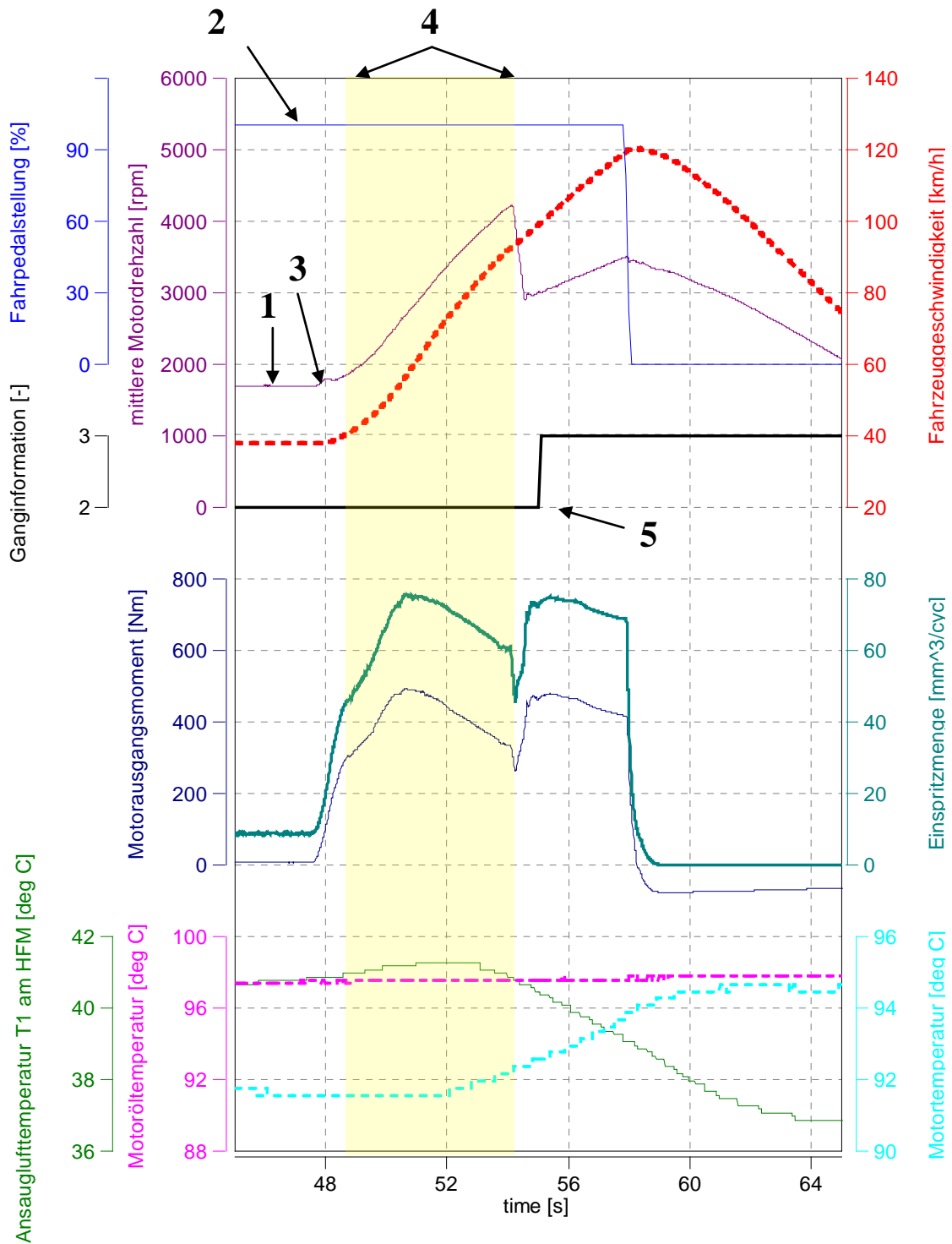


Abbildung 4.5: Vollastbeschleunigung aus 40km/h im zweiten Gang (3l V6 Diesel)

Für beste Reproduzierbarkeit wird nur der Bereich vom Beginn der Beschleunigung bis zum Schaltvorgang in den dritten Gang in der Auswertung berücksichtigt (Ergebnisse siehe Kapitel 5.1.3).

4.3 Methodik der Abgasuntersuchungen

Die untersuchte Anlage verfügt über drei verschiedenen Abgasmessmethoden. Zu ihnen zählen die verdünnte Beutelmessung, die verdünnte Modalmessung sowie die Analyse des unverdünnten Abgases. Das Messen von Rohabgas stellt hohe Anforderungen an die Probenaufbereitung dar, da es im Abgas zu einer Vielzahl von Nachreaktionen und vor allem zu Wasserkondensation kommen kann. Auch muss für die Angabe von Massenemissionen das Abgasvolumen, welches sich ständig ändert, bekannt sein. Mit den durchgeführten Untersuchungen soll die Korrelation der beiden in **Abbildung 4.6** dargestellten verdünnten Linien und der Rohlinien zueinander festgestellt werden

Voraussetzung für die Korrelation der unterschiedlichen Linien ist die Korrektur auf gleiche Bedingungen. Da die verdünnten Linien feuchtes Abgas messen und die Rohlinien trockenes, müssen diese entsprechend korrigiert werden. Diese Rechnungen werden unter Punkt 4.3.1 durch die Untersuchung von Massenemissionen bei konstanten Rohemissionen verifiziert.

Zur Ermittlung der Massenemissionen der Rohlinien sind neben den Rohkonzentrationen auch die dazugehörigen Abgasvolumina nötig. Diese Volumina müssen immer exakt zu den Konzentrationen synchronisiert sein. Ein Fehler in dieser Totzeitverschiebung oder in der Abgasvolumenbestimmung setzt sich als Fehler im Ergebnis fort. Unter Punkt 4.3.2 werden zunächst Methoden zur Ermittlung der Totzeitverschiebung vorgestellt und im darauf folgenden Kapitel angewandt.

Unter Punkt 0 werden die Massenemissionen der unterschiedlichen Linien während NEDC Abgastests analysiert. Aus den Rohkonzentrationen der einzelnen Messkanäle werden Massenemissionen berechnet und mit jenen der Systemauswertung verglichen.

Aufgabe dieser Untersuchungen ist einerseits der Vergleich der selbst berechneten Rohemissionen zu den selbst berechneten verdünnten Emissionen und andererseits der Vergleich der eigenen Ergebnisse mit jenen der Systemauswertung. Auf diese Weise wird sowohl die Abgasvolumensbestimmung, als auch die Totzeitverschiebung und die im System hinterlegte Auswertemethode der Firma AVL selbst überprüft.

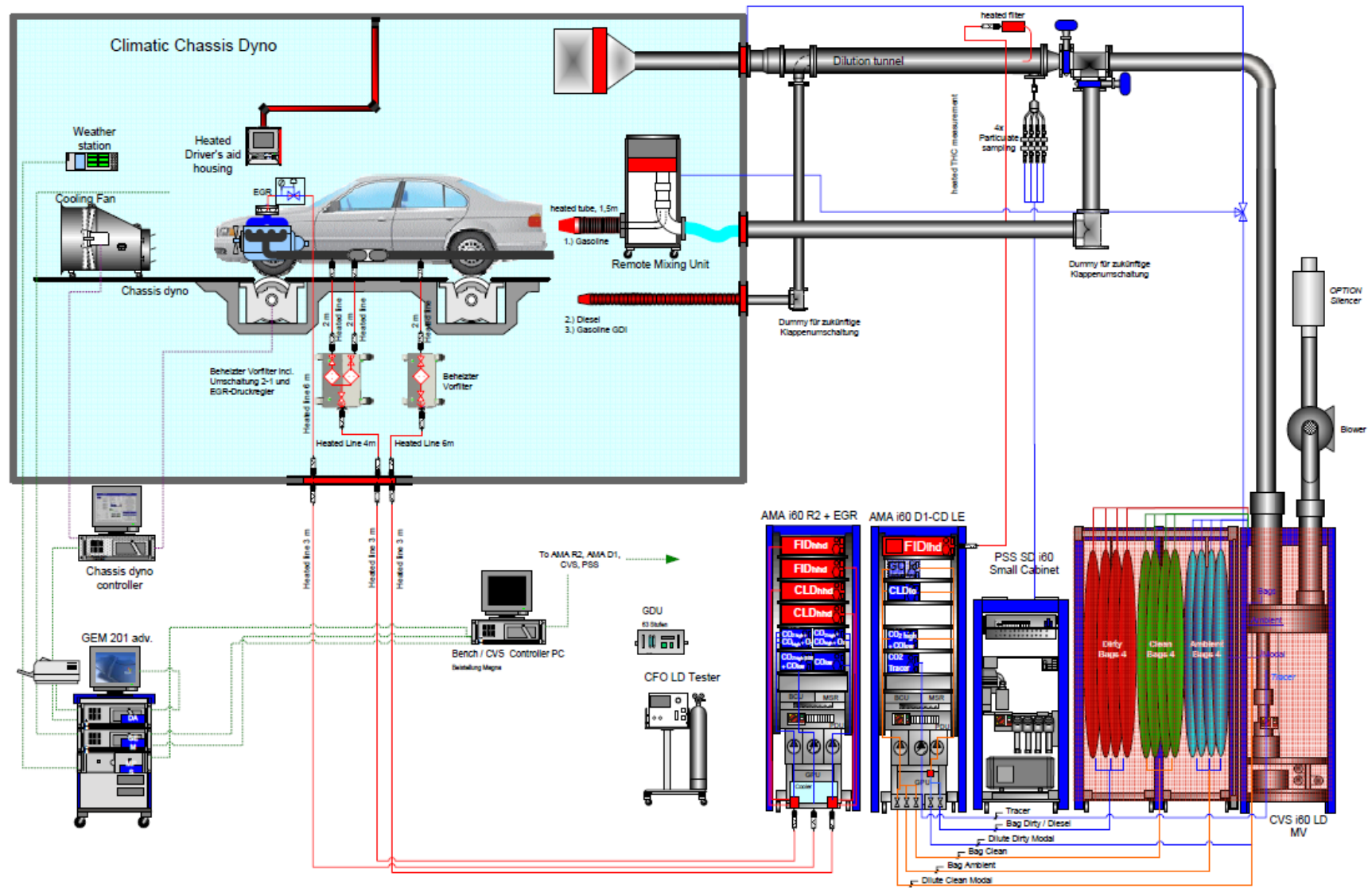


Abbildung 4.6: Flusschema der Abgasanalyseysteme (MAGNA STEYR 2008)

4.3.1 Überprüfung der Feuchtekorrekturen

Zuerst wird überprüft ob die nötigen Feuchtekorrekturen richtig im System hinterlegt sind. Um alle Einflüsse von Totzeitverschiebung und Ansprechzeit ausschließen zu können, wird das Fahrzeug in betriebswarmem Zustand so lange bei konstanter Last und Geschwindigkeit gefahren, bis sich eine stabile Schadstoffkonzentration einstellt. Nun wird ein Abgasbeutel mit verdünntem Abgas fünf Minuten lang gefüllt. Zeitgleich werden das verdünnte Abgas der CVS sowie das unverdünnte Abgas der beiden Rohlinien modal analysiert. Um von den so erhaltenen durchschnittlichen Schadstoffkonzentrationen der verschiedenen Linien auf Massenemissionen schließen zu können, müssen diese mit dem jeweiligen Volumen multipliziert werden. Vorausgesetzt die Konzentrationen wurden richtig korrigiert, müssen sich an allen Linien bei sämtlichen Schadstoffen die jeweils gleichen Massenemissionen in g/km ergeben.

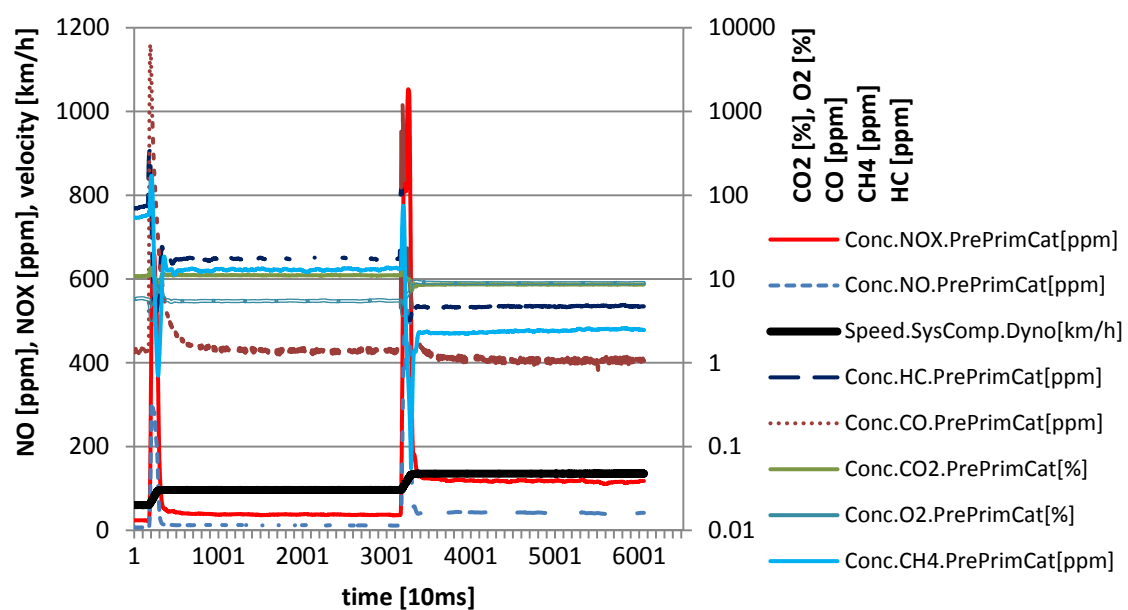


Abbildung 4.7: Schadstoffkonzentrationen bei konstanten Geschwindigkeiten

Das Volumen des verdünnten Abgases entspricht jenem das über die Kombination der Venturidüsen in der CVS Anlage eingestellt ist und bleibt über jede Phase eines Zyklus konstant. Das Volumen des Rohabgases ist jedoch unbekannt und wird daher für diese Betrachtung aus Daten des Motorsteuergerätes ermittelt. Folgende Kanäle werden für die Berechnung herangezogen:

- *Angesaugte Luftmenge pro Ansaugzyklus*
- *Eingespritzte Kraftstoffmenge pro Arbeitszyklus*
- *Motordrehzahl*
- *Ansauglufttemperatur*

Da im Rohabgas eine große Menge an Wasser gebunden ist, ist den Analysatoren ein Kühler vorgeschaltet, an dem das Wasser kondensiert und abgeschieden wird. Somit werden Konzentrationen in der Rohbench im trockenen Abgas gemessen, in der CVS-Bench hingegen im feuchten. Daher ist es nötig, beide auf den gleichen Bezugszustand zu bringen. Die hierfür nötige Feuchtekorrektur ist nach folgenden Schritten durchzuführen (88/77/EWG 2004):

$$conc_{feucht} = K_{W,r} * conc_{trocken} \quad (4.21)$$

$$K_{W,r} = \left(1 - F_{FH} * \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRD}}\right) - K_{W2} \quad (4.22)$$

$$F_{FH} = \frac{1,969}{1 + \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRW}}} \quad (4.23)$$

$K_{W,r}$... Korrekturfaktor für Umrechnung vom trockenen zum feuchten Bezugszustand des Rohabgases

F_{FH} ... Kraftstoffspezifischer Faktor für die Berechnung der Feuchtkonzentration anhand der Trockenkonzentration

G_{FUEL} ... Kraftstoffmassendurchsatz

G_{AIRD} ... Massendurchsatz der Ansaugluft, trocken

G_{AIRW} ... Massendurchsatz der Ansaugluft, feucht

K_{W2} ... Korrekturfaktor für Umrechnung vom trockenen zum feuchten Bezugszustand der Ansaugluft

Für die Ansaugluft gilt:

$$K_{W2} = \frac{1,608 * H_a}{1000 + (1,608 * H_a)} \quad (4.24)$$

$$H_a = \frac{6,220 * R_a * p_a}{p_B - p_a * R_a * 10^{-2}} \quad (4.25)$$

H_a ... absolute Feuchte der Ansaugluft [g H₂O/ kg trockene Luft]

R_a ... relative Feuchte der Ansaugluft [%]

p_a ... Sättigungsdampfdruck der Ansaugluft [kPa]

p_B ... Barometrischer Gesamtdruck [kPa]

Darüber hinaus ist die NO_x-Konzentration unter Berücksichtigung von Temperatur und Feuchtigkeit mit Hilfe des Faktors K_{HD} zu korrigieren.

$$K_{HD} = \frac{1}{1 + A * (H_a - 10,71) + B * (T_a - 298)} \quad (4.26)$$

T_a ... Ansauglufttemperatur [K]

$$A = 0,309 \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRD}} - 0,0266 \quad B = -0,209 \frac{G_{FUEL}}{G_{AIRD}} + 0,00954 \quad (4.27), (4.28)$$

Die über das Motorsteuergerät ausgegebene Luftmasse bezieht sich auf feuchte Luft, daher muss diese auf trockene Luft korrigiert werden.

$$G_{AIRD} = \frac{m_{AirProZykl}}{1 + \frac{H_{abs}}{1000}} \quad (4.29)$$

$m_{AirProZykl}$... mittlere Masse Ansaugluft pro Zyklus

Da auch für Verbrennungsprozesse das Prinzip der Massenerhaltung gilt, lässt sich aus der aufgezeichneten angesaugten Luftmenge und der eingespritzten Kraftstoffmenge die momentan ausgestoßene Abgasmasse berechnen.

$$G_{FUEL} = n_{eng} * V_{inj} * \frac{60 * n_{zyl} * \rho_{Fuel}}{10^6 * 2} \quad (4.30)$$

$$G_{EXHW} = G_{FUEL} + G_{AIRW} \quad (4.31)$$

G_{FUEL}	...	Eingespritzte Kraftstoffmenge [kg/h]
G_{AIRW}	...	Masse der Ansaugluft, feucht [kg/h]
G_{EXHW}	...	Masse des Abgases, feucht [kg/h]
n_{eng}	...	Durchschnittliche Motordrehzahl [1/min]
V_{inj}	...	Eingebrachte Kraftstoffmenge pro Arbeitszyklus [mm ³ /Zykl]
n_{zyl}	...	Anzahl der Zylinder
ρ_{Fuel}	...	Kraftstoffdichte [kg/dm ³]

Aus den so korrigierten Konzentrationen lassen sich mit nachfolgenden Gleichungen die Emissionsmassendurchsätze in g/h berechnen (88/77/EWG 2004).

$$NO_{x\ mass} = 0,001587 * NO_{x\ conc} * K_{HD} * G_{EXHW} \quad (4.32)$$

$$CO_{x\ mass} = 0,00966 * CO_{conc} * G_{EXHW} \quad (4.33)$$

$$HC_{mass} = 0,000479 * HC_{conc} * G_{EXHW} \quad (4.34)$$

Korrelieren die Massen der Schadstoffe der verschiedenen Linien bei konstanten Emissionen miteinander, wird im nächsten Schritt das Verhalten bei dynamischer Fahrt überprüft.

Die aufgezeichneten Daten werden mit dem MEASURE DATE ANALYSER aufbereitet und in einer Excel Tabelle abgelegt (Ergebnisse siehe Kapitel 5.2).

4.3.2 Methoden zur Ermittlung der Totzeiten

Um aus den Schadstoffkonzentrationen und dem ermittelten Volumen die Schadstoffmassen berechnen zu können, müssen zuerst die Totzeiten bestimmt werden. Da, wie in Kapitel 3.3.2 einleitend beschrieben, die Wege zu den Analysatoren nicht gleich sind und auch die Analysatoren selbst unterschiedliche Ansprechzeiten haben, sind ihre Ausgangssignale zueinander und vor allem zum gemessenen Volumen zeitlich verschoben. Nur wenn das Volumen und alle Konzentrationen miteinander zeitlich synchronisiert sind, entspricht das Ergebnis den tatsächlichen Schadstoffmassen. Hierzu gibt es verschiedene Ansätze.

Eine Möglichkeit ist es, durch Gasstöße starke Emissionsanstiege zu provozieren. Aus **Abbildung 4.8** ist ersichtlich, dass die verschiedenen Emissionen zeitversetzt ansteigen. Für die zusätzlich eingetragene Motorleistung ist das Aufzeichnen von Motorsteuergerätedaten nötig.

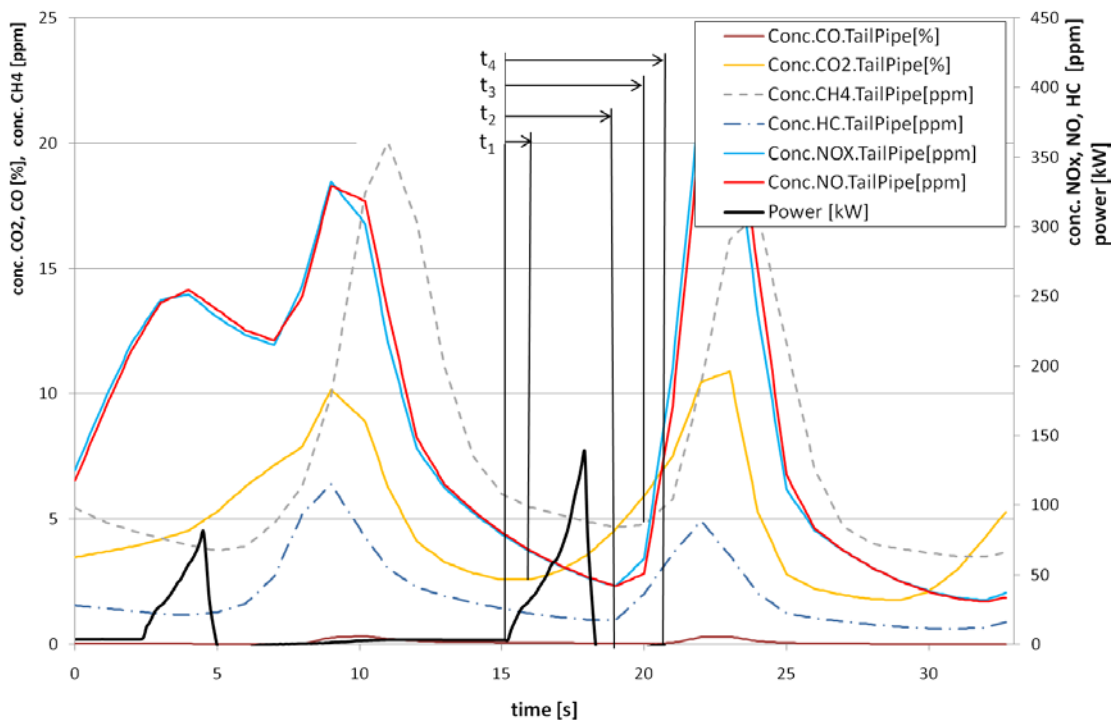


Abbildung 4.8: Zeitlich versetzte Emissionsanstiege nach Gasstößen bei Rohabgasmessung (PKW, 3l Diesel CR)

Eine weitere Möglichkeit ist es, den Emissionsverlauf über einen Fahrzyklus hinweg zu betrachten, und die Emissionsanstiege mit den Geschwindigkeitsanstiegen nach Stillstandsphasen zu synchronisieren. Mit Hilfe dieser Methode wurde vom Hersteller der

Analysetechnik die Totzeit für CO₂ ermittelt und als Konstante für sämtliche Analysatoren im System hinterlegt.

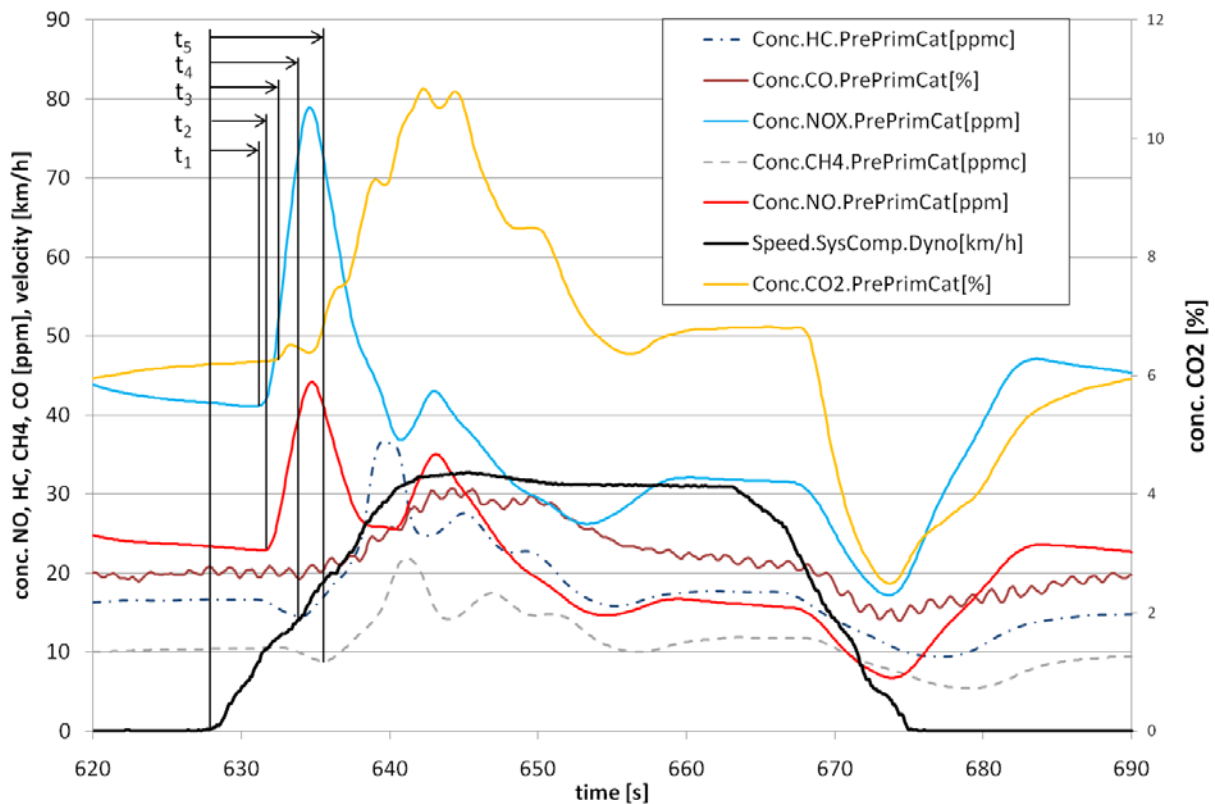


Abbildung 4.9: Zeitlich versetzte Emissionsanstiege nach Beschleunigung bei Rohabgasmessung (PKW, 3l Diesel CR)

Die vom Autor gewählte Methode ist die Synchronisierung der Emissionen mit der Motorleistung, da hier Einflüsse durch das Automatikgetriebe zwischen Leistungsentfaltung des Motors und Geschwindigkeitsanstieg entfallen. Zugleich hat diese Methode nach der erfolgreichen Verschiebung der Emissionskanäle den Vorteil, dass die ebenfalls aus dem Steuergerät ermittelte Abgasmasse auch zu den Emissionen synchronisiert ist. Die momentane Leistung wird wie folgt ermittelt:

$$P = Trq_{eng} * n_{eng} * \frac{2 * \pi}{1000 * 60} \tag{4.35}$$

P ... Leistung [kW]

Trq_{eng} ... Drehmoment aus Motorsteuergerät [Nm]

4.3.3 Ermittlung der Massenemission bei Rohabgasanalyse

Zur Auswertung der am Rollenprüfstand durchgeführten Abgasuntersuchungen stehen folgende Daten zu Verfügung:

1. Standardprotokoll des GEM201 Systems der AVL
Dieses Microsoft Excel Dokument ist das Ergebnisprotokoll für Abgastests mit Emissionsergebnissen in g/km. Des Weiteren sind die Phasenkonzentrationen der einzelnen Analysatoren sowie das Gesamtvolumen des verdünnten Abgases angeführt.
2. Onlineprotokoll des GEM201 Systems der AVL
Dieses Excel Dokument beinhaltet die Rohwerte sämtlicher Analysatoren, Temperaturmessstellen und Durchflussmesser, sowie berechnete Kanäle für die Schadstoffemissionen in g/km. Insgesamt werden 76 Kanäle mit 10Hz aufgezeichnet, jedoch werden für die weiteren Rechnungen nur die Rohkonzentrationen verwendet.
3. INCA-Messfile mit Informationen aus dem Motorsteuergerät
Dieses Messfile enthält unter anderem die Einspritzzeiten bzw. Einspritzmengen, die Motordrehzahl und die angesaugte Luftmasse, die Fahrzeuggeschwindigkeit sowie das Motormoment. Mit diesen Informationen werden der Leistungsverlauf des Motors und das Abgasvolumen ermittelt. Der Leistungsverlauf dient dazu, die Emissionsanstiege mit Leistungsanstiegen zeitlich zu synchronisieren. Das Abgasvolumen wird zur Berechnung der emittierten Schadstoffmassen verwendet.

In einem Excel Auswerteschema werden die Informationen der drei Quellfiles miteinander verknüpft. Ergebnis der Auswertung sind Schadstoffemissionen in g/km aus der CVS-Beutelmessung, der CVS-Modalmessung und den beiden Rohabgaslinien.

Werden alle Quelldaten in das Auswertefile kopiert, führt dies zu einer Datenmenge die das Auswerten sehr verlangsamt. Aus diesem Grund greift das Auswertefile nur über Verknüpfungen auf die drei Quellfiles zu.

Zur Ermittlung der Massenemissionen der Rohlinien werden zunächst die Geschwindigkeitskanäle der Rollenaufzeichnung und der Steuergeräteaufzeichnung miteinander zeitlich synchronisiert. Daraufhin werden die Motorleistung und die Rohwerte der Abgaskonzentrationen über der Zeit grafisch dargestellt. Jetzt ist es möglich, eine eventuell nötige zeitliche Verschiebung der einzelnen Emissionskanäle grafisch zu ermitteln. Dies geschieht durch Abgleich der Flanken und Spitzen der Emissionskurven mit denen der Leistungskurve. In **Abbildung 4.10** sind die Emissionsverläufe eines Dieselfahrzeuges in

einem NEDC - Zyklus dargestellt, während in **Abbildung 4.11** ein vergleichbarer Versuch mit einem Ottofahrzeug zu sehen ist.

Bei Fahrzeugen mit Ottomotor ist eindeutig erkennbar, wie der 3-Wegekatalysator nach kurzer Zeit anspringt und die Konvertierungsrate zunimmt bis keine anderen Emissionen als CO₂ erkennbar sind.

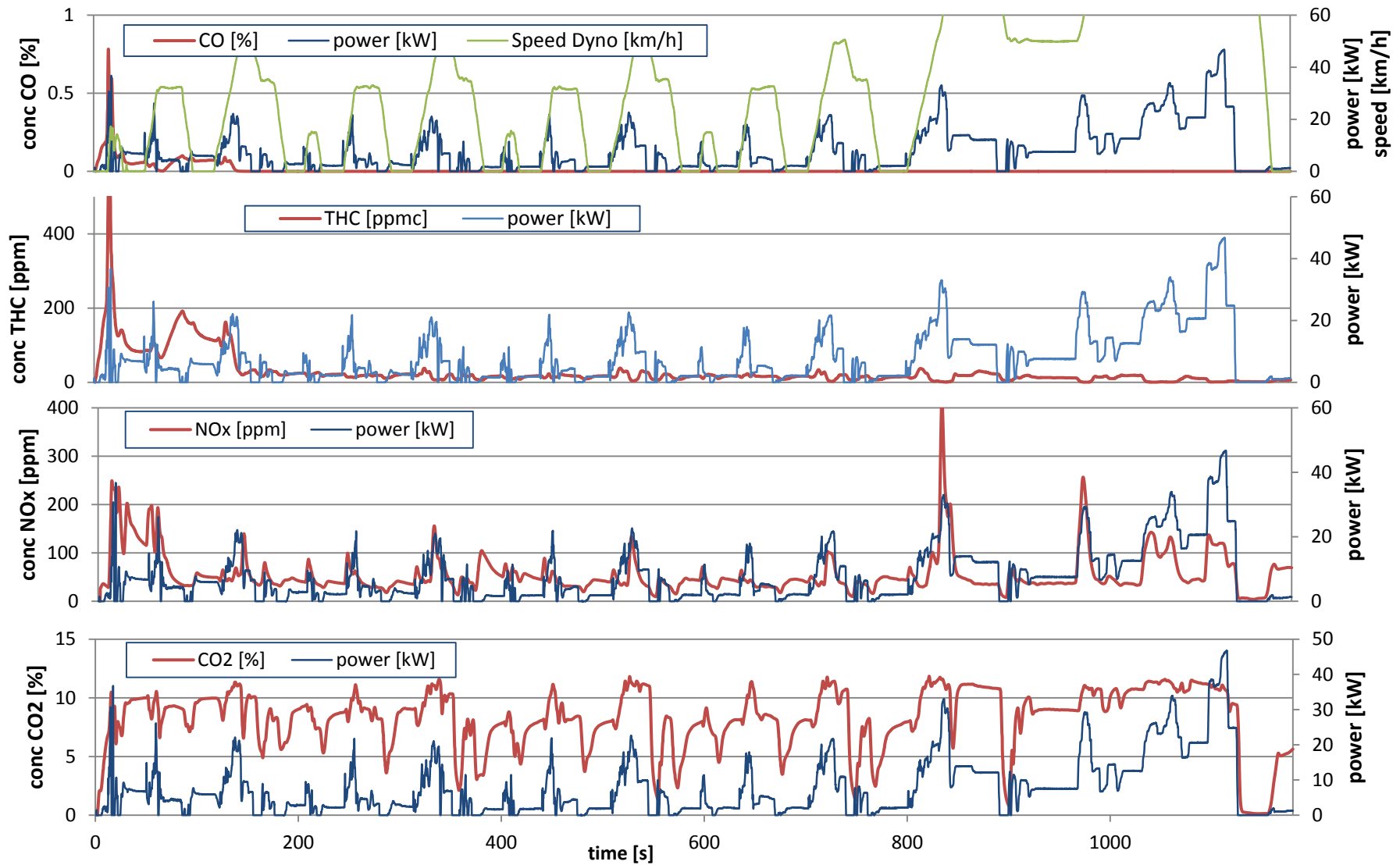


Abbildung 4.10: Verlauf der Schadstoffkonzentrationen im Verlauf eines NEDC Zyklus eines Dieselfahrzeugs auf die Leistung totzeitkorrigiert:

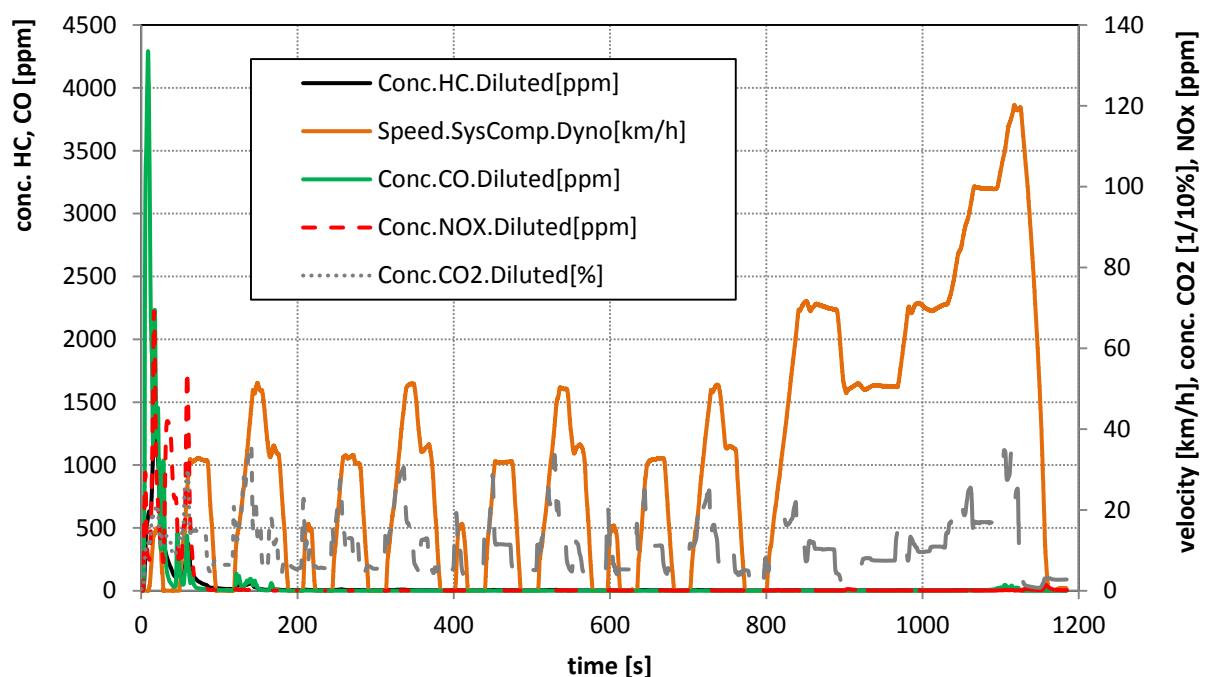


Abbildung 4.11: Emissionsverhalten bei Kaltstart - Ottomotor

Auf die zeitliche Verschiebung der Messkanäle folgt die Berechnung der einzelnen Massenemissionen pro Zyklusphase nach den Gleichungen aus Kapitel 4.3.1. Als Rechengröße dient neben den Rohkonzentrationen der Analysatoren auch die aus der Ansaugluft und dem Kraftstoffverbrauch ermittelte Abgasmasse. Da die Faktoren K_W , F_{FH} , A und B Funktionen des Verhältnisses von eingespritzter Kraftstoffmasse zur Masse der Ansaugluft sind, ändern sich diese ständig und mit ihnen die Korrekturfaktoren für die Konzentrationen der einzelnen Abgasbestandteile. Aus diesem Grund werden für jeden Messpunkt die korrigierten Konzentrationen der einzelnen Komponenten sowie ihr Massenstrom pro Stunde ermittelt. Für diese Massenströme in g/h werden Mittelwerte über den Zeitraum der Testphasen gebildet, die in weiterer Folge zu den gewünschten g/km umgerechnet werden. Diese Werte werden daraufhin mit den Ergebnissen der verdünnten Linie verglichen und interpretiert.

4.3.4 Ermittlung der Massenemissionen bei verdünnter Beutelmessung

Bei der CVS Messung wird ein definierter Teilstrom des verdünnten Abgases in beheizten Kunststoffbeuteln gesammelt und im Anschluss an die Prüfung analysiert. Pro Zyklusphase wird ein Beutelpaar, bestehend aus einem Abgasbeutel und einem Luftbeutel, gefüllt. Da das

im Beutel gesammelte Abgas durchmischt ist, sind die Messergebnisse Integralwerte der Schadstoffkonzentrationen des verdünnten Abgases der einzelnen Phasen. Es steht somit pro Phase und Analysator nur ein Messwert zu Verfügung. Aus diesem Grund genügt es, einen durchschnittlichen Verdünnungsfaktor für die zu analysierende Phase zu bilden. Vereinfacht ist dieser (70/220/EWG 2007):

$$DF = \frac{13,4}{C_{CO_2} + (C_{HC} + C_{CO})10^{-4}} \quad (4.36)$$

Um auf die Konzentrationen des unverdünnten Abgases rückschließen zu können, werden jene des verdünnten um den Einfluss der Verdünnungsluft korrigiert:

$$C_i = C_e - C_d \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (4.37)$$

- DF* ... Verdünnungsfaktor
C_{CO2} ... gemessene CO₂ Konzentration des im Beutel gesammelten Abgases [%]
C_{CO} ... gemessene CO₂ Konzentration des im Beutel gesammelten Abgases [ppm]
C_{HC} ... gemessene HC Konzentration des im Beutel gesammelten Abgases [ppm]
C_i ... korrigierte Konzentration des Schadstoffes im verdünnten Abgas [ppm]
C_e ... gemessene Konzentration des Schadstoffes im verdünnten Abgas [ppm]
C_d ... gemessenen Konzentration des Schadstoffes in der Verdünnungsluft [ppm]

NO_x Konzentrationen müssen bezüglich der Feuchte der Ansaugluft korrigiert werden:

$$k_H = \frac{1}{1 - 0,0329 * (H - 10,71)} \quad (4.38)$$

- H* ... Absolute Feuchte der Ansaugluft [g_{Wasser}/kg_{trLuft}]

Die Masse der emittierten Schadstoffe berechnet sich aus:

$$M_i = \frac{V_{mix} * Q_i * k_H * C_i * 10^{-6}}{d} \quad (4.39)$$

- M_i* ... emittierte Schadstoffmenge [g/km]
V_{mix} ... Volumen des verdünnten Abgases bei Normalbedingungen [l/Test]
Q_i ... Dichte des jeweiligen Schadstoffes bei Normalbedingungen [g/l]
k_H ... Feuchtekorrekturfaktor für NO_x
d ... Der zu analysierenden Phase entsprechende Fahrstrecke [km]

Einzigste Ausnahme stellt die Messung von Kohlenwasserstoffen bei Fahrzeugen mit Dieselmotoren dar. Im Dieselaabgas befinden sich viele langkettige Kohlenwasserstoffe, welche die Tendenz haben, sich im Verdünnungstunnel und in den Beuteln anzulagern. Da dies zu geringeren gemessenen HC-Konzentrationen führen würde, wird ein Teil des Abgases aus dem Tunnel entnommen und über eine mit 190°C beheizte Leitung zum FID-Analysator geführt und hier kontinuierlich gemessen. Die durchschnittliche HC-Konzentration wird somit aus dem Integral der vom FID während der Prüfzeit kontinuierlich gemessenen Konzentrationen gebildet.

$$C_e = \frac{\int_{t_1}^{t_2} C_{HC} dt}{t_2 - t_1} \quad (4.40)$$

c_e ... Durchschnittliche HC-Konzentration über die Messzeit [ppm]

4.3.5 Ermittlung der Massenemissionen bei verdünnter Modalanalyse

Neben der Analyse des in den Beuteln gesammelten verdünnten Abgases ist es auch möglich, einen Teilstrom des verdünnten Abgases aus dem Verdünnungstunnel zu entnehmen und dieses kontinuierlich zu analysieren. Da eine gleichzeitige Messung der Verdünnungsluft und des verdünnten Abgases eine zweite Linie von Analysatoren benötigen würde, wird hierbei die vereinfachte Annahme getroffen, dass die Verdünnungsluft in ihrer Zusammensetzung den Test über konstant bleibt. Die Verdünnungsluft wird vor dem Test mit einer „Hintergrundmessung“ bestimmt und die so ermittelten Konzentrationen als Konstanten hinterlegt. Der Verdünnungsfaktor ändert sich dynamisch, daher müsste dieser für jedes Messintervall neu bestimmt werden.

Für die Überprüfung der Korrelation der verdünnten Modalmessung zur Beutelmessung und Rohmessung werden folgende Vereinfachungen vorgenommen: Es werden die Konzentrationen über die Testphase gemittelt und aus den so erhaltenen durchschnittlichen Konzentrationen der Verdünnungsfaktor gebildet. Mit den aus der Beutelmessung ermittelten Umgebungsluftkonzentrationen, dem CVS-Volumen und den Schadstoffdichten werden die emittierten Massen analog zur Beutelmessung berechnet.

5 Ergebnisse der Untersuchungen

5.1 Ergebnisse der Fahrwiderstandsuntersuchungen

5.1.1 Ergebnisse der Ausrollversuche

Ziel der Versuche ist es, Ausrollversuche an verschiedenen Orten und bei unterschiedlichen Straßenbedingungen durchzuführen und die Ergebnisse zu vergleichen. Hierzu wird ein Excel Auswerteschema verwendet, welches sich vom Gesetzestext unterscheidet, weshalb ebenso ein Vergleich zur gesetzlichen Methode durchgeführt wird.

Die einleitenden Versuche zum Temperaturniveau der Getriebe bei Ausrollversuchen haben ergeben, dass bis zum Erreichen einer Beharrungstemperatur in den Getrieben eine Strecke von etwa 40km bei durchschnittlich 110km/h Autobahnfahrt nötig ist, diese Temperatur aber bei den Ausrollversuchen nicht haltbar ist. Mit der Reihenfolge der Messungen 90km/h - 40km/h, 130km/h – 70km/h, 50km/h – 20km/h wird die Temperatur relativ konstant gehalten, wenngleich unter der Beharrungstemperatur.

Der nächste Schritt ist die Suche nach geeigneten Versuchsstrecken. Diese müssen gerade, möglichst eben und vor allem schwach befahren sein. Die Vergleiche der unterschiedlichen Streckenabschnitte sind im Anhang angeführt.

Um zu sehen, ob eine Stückelung eines Versuches in verschiedene Strecken möglich ist, werden Ausrollversuche in einzelnen Geschwindigkeitssegmenten auf den unterschiedlichen Strecken durchgeführt, und in der Auswertung miteinander kombiniert. In **Abbildung 5.1** ist zu sehen, dass die Kombination von vier Tests auf verschiedenen Strecken im Bereich von 120-40km/h zu einer maximalen Geschwindigkeitsabweichung von weniger als drei Prozent führt, darunter aber stark ansteigt bis sie bei weniger als 25km/h über 8% erreicht.

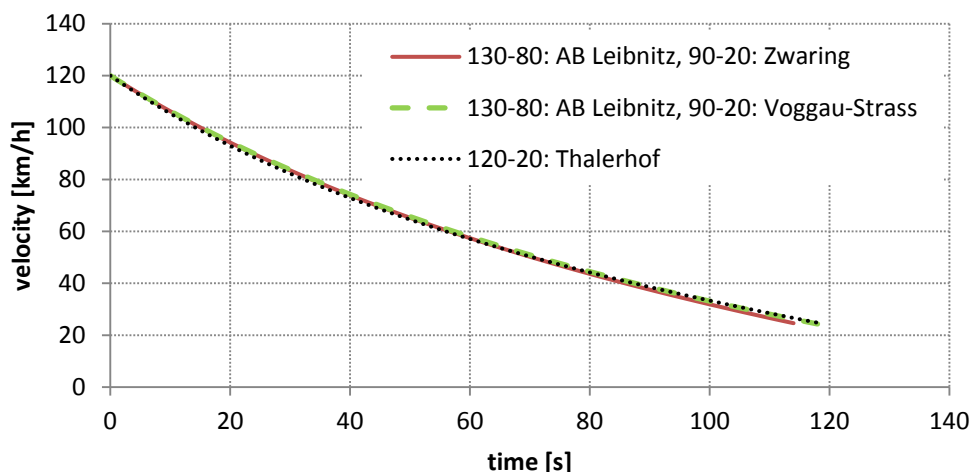


Abbildung 5.1: Vergleich der Ausrollkurven bei Kombination verschiedener Lokalitäten

Diese Beobachtung deckt sich auch mit den Erkenntnissen der folgenden Untersuchung.

Wie in Kapitel 4.1 erläutert, wird zur Auswertung der Ausrollversuche ein Verfahren angewandt, welches von dem vom Gesetzgeber empfohlenen abweicht und in weiterer Folge überprüft werden soll. Zu diesem Zweck werden dieselben Rohdaten einmal mit der in Kapitel 4.1.5 beschriebenen modifizierten und einmal mit der gesetzlichen Methode ausgewertet. Zur besseren Überprüfbarkeit werden die Ergebnisse nicht auf Referenzbedingungen korrigiert, sodass ein Vergleich zur real gemessenen Kurve möglich ist.

Wie in **Abbildung 5.2** zu sehen, ist mit der gesetzlichen Methode kein zufriedenstellendes Ergebnis möglich. Im Vergleich mit dem per GPS aufgezeichneten Geschwindigkeitsverlauf zeigt sich, dass das durch die gesetzliche Methode ermittelte Geschwindigkeitspolynom eine um 20s längere Ausrollzeit ergeben würde. Gründe hierfür sind die geringe Anzahl von Messungen, die eine unzulässig große Standardabweichung der Messzeiten zur Folge hat, die geringe Anzahl von Stützstellen sowie die starken Streuungen bei niedrigen Geschwindigkeiten. Da die gesetzliche Methode für jede Geschwindigkeit das minimale Intervall $v \pm 5\text{km/h}$ vorsieht und die kleinste zur Korrektur auf Referenzbedingungen vorgesehene Geschwindigkeit 20km/h beträgt, müsste die Endgeschwindigkeit jedes Ausrollversuches weniger als 15km/h betragen.

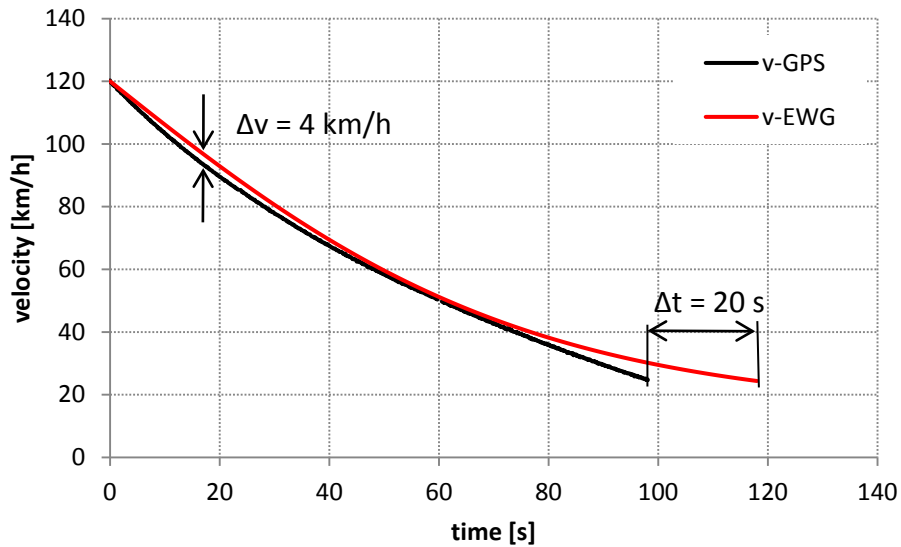


Abbildung 5.2: Vergleich des EWG - Geschwindigkeitspolynoms zum gemessenen Geschwindigkeitsverlauf

Wie schon der Vergleich der Ausrollkurven bei Kombination verschiedener Strecken gezeigt hat, streuen die Ergebnisse mit abnehmender Geschwindigkeit immer stärker. Dies hat mehrere Gründe: Der Einfluss kleiner Unebenheiten der Straße nimmt bei niedrigen Geschwindigkeiten zu, sodass die Messungen teilweise bereits bei 25km/h begrenzt werden müssen. Reproduzierbare Versuche bei geringen Geschwindigkeiten können nur bei idealen Straßenbedingungen durchgeführt werden wie sie nur auf eigenen Teststrecken vorliegen. In **Abbildung 5.3** ist zu sehen, dass die Geschwindigkeitsverläufe bis etwa 25 km/h gut korrelieren, darunter aber immer mehr abweichen.

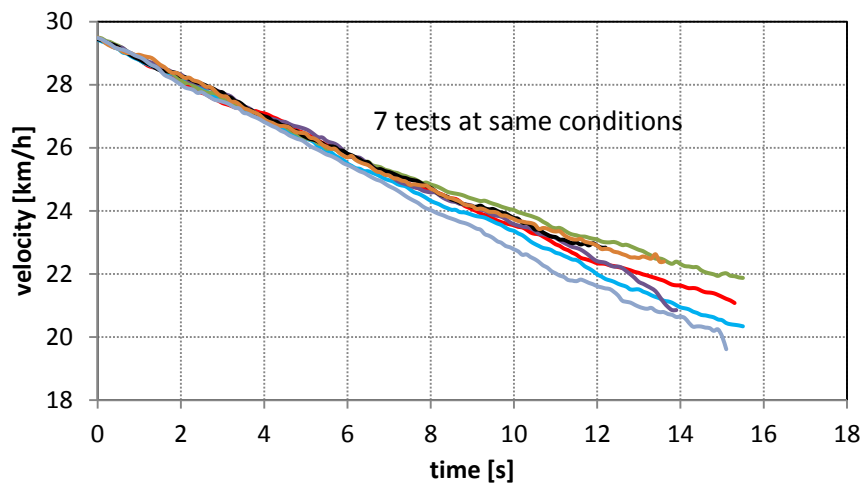


Abbildung 5.3: Geschwindigkeitsverlauf bei Rollen mit geringer Geschwindigkeit

Die Auswertung der verschiedenen Versuche hat gezeigt, dass die gewählte Methode der Durchführung und Auswertung der Ausrollversuche besonders für Geschwindigkeiten größer 40km/h ein schnelles und exaktes Verfahren zur Ermittlung der Fahrwiderstände darstellt. Unter 40km/h ist dieses Verfahren aber fehlerbehaftet, was in erster Linie auf die nicht idealen Testbedingungen zurückzuführen ist.

5.1.2 Ergebnisse der Verbrauchsmessungen bei Konstantfahrten

Ist der Fahrwiderstand korrekt bestimmt und wird er am Rollenprüfstand exakt simuliert, muss sich bei gleichen Umgebungsbedingungen bei Konstantfahrt auch derselbe Kraftstoffverbrauch ergeben. Die hierzu durchgeführten Versuche haben gezeigt, dass eine Überprüfung des Fahrwiderstandes über die Einspritzzeit beziehungsweise die Einspritzmenge ein schnelles und wirksames Verfahren darstellt. Die Abweichung von Straße zu Rolle bleibt bei allen Versuchen in einem Bereich von $\leq 2\%$, was zwei Aussagen zulässt. Zum einen zeigt dies, dass der Prüfstand in sehr geringen Grenzen exakt den selben Fahrwiderstand simuliert, der auch auf der Straße vorherrscht und zum anderen ist dies ein Beweis dafür, dass der Ausrollversuch und die dazugehörige Auswertemethode, mit denen die Koeffizienten für die Einstellung des Rollenprüfstandes ermittelt wurden, ein geeignetes Werkzeug zur Bestimmung der Fahrwiderstände darstellt. Es bestätigt sich aber auch die Beobachtung, dass bei den durchgeführten Ausrollversuchen die Abweichung bei niedrigen Geschwindigkeiten zunimmt.

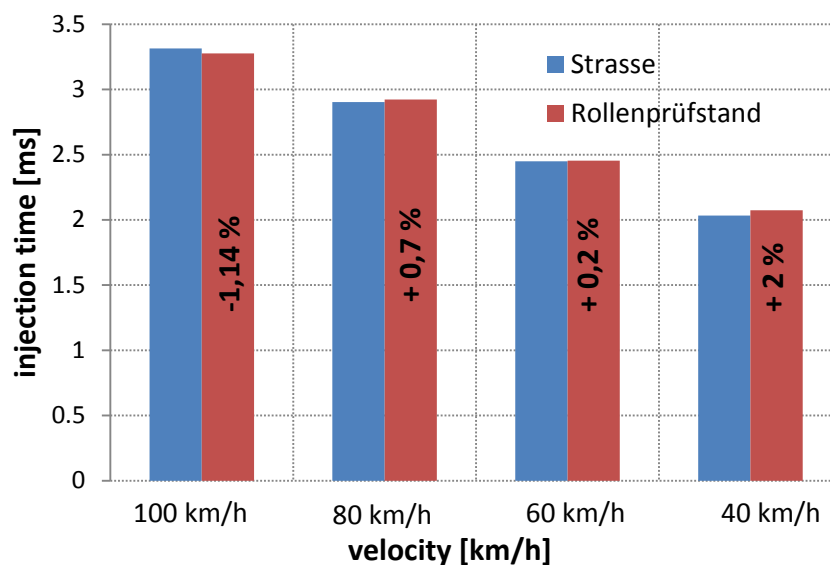


Abbildung 5.4: Einspritzzeiten auf Rolle und Straße bei Konstantfahrten (5,5l V8 Otto)

5.1.3 Ergebnisse der Vollastbeschleunigungen

Die auf der Straße und am Rollenprüfstand durchgeführten Beschleunigungsversuche haben ergeben, dass die Vollastbeschleunigung aus 40km/h unter Zuhilfenahme der Speedlimiter Funktion sehr gut reproduzierbar ist. Bei den verschiedenen Messungen auf der Straße hat sich beim Geschwindigkeitsverlauf eine Standardabweichung von max. 0,6km/h ergeben. Um eventuelle Wind und Steigungseinflüsse auszuschließen wurden sämtliche Straßenmessungen in beide Fahrtrichtungen durchgeführt und die Ergebnisse gemittelt. Die dargestellten Ergebnisse bestehen somit aus den Mittelwerten von 5 Rollenmessungen und jeweils 10 Straßenmessungen.

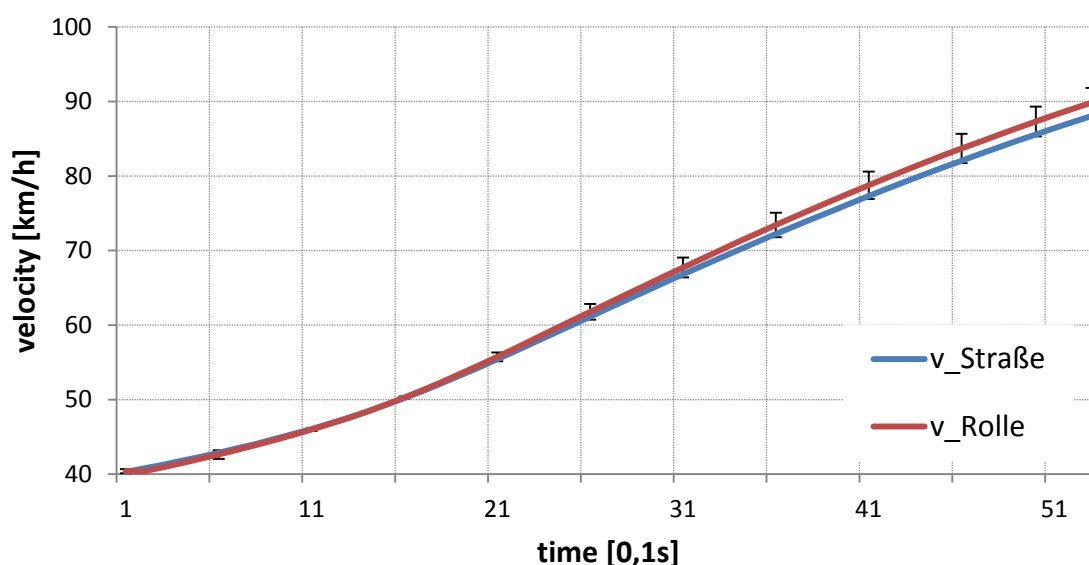


Abbildung 5.5: Geschwindigkeitverläufe bei Vollastbeschleunigungen (3l Diesel)

Der Vergleich der über das Motorsteuergerät ausgegebenen Geschwindigkeiten zeigt, dass die Geschwindigkeiten maximal 2,0% voneinander Abweichen. Die Einspritzmengen korrelieren in einem weiten Bereich mit einer Differenz von unter 1% zueinander, gegen Ende der Beschleunigung ergibt sich ein Unterschied von bis zu 2,5%.

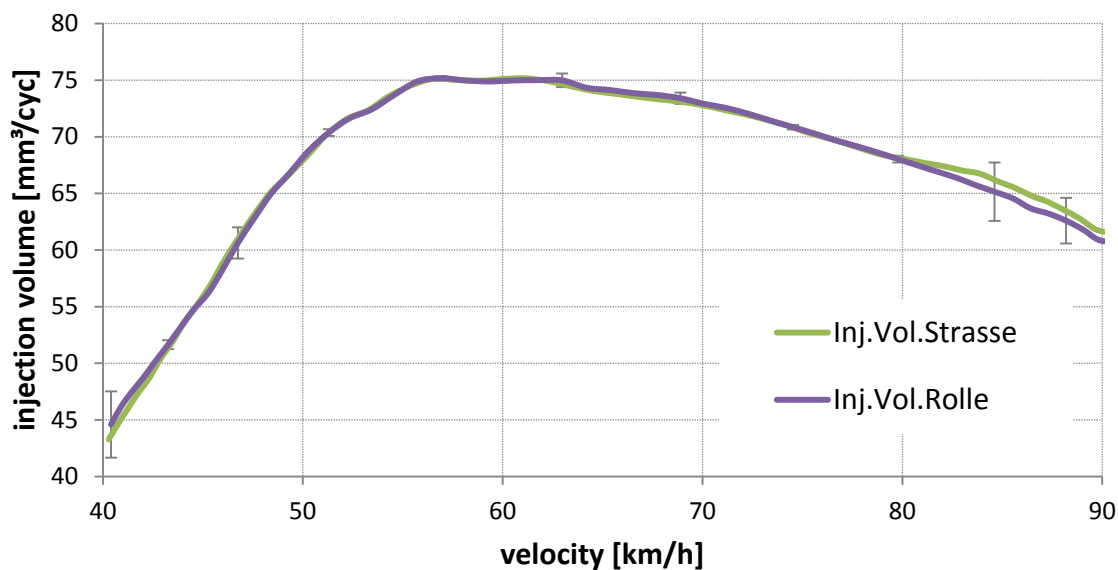


Abbildung 5.6: Verlauf der Einspritzmengen bei Vollastbeschleunigung (3l Diesel)

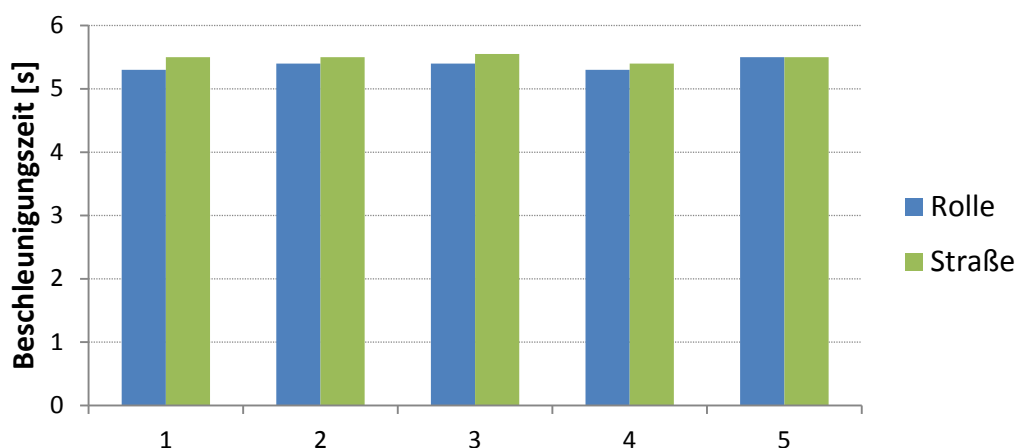


Abbildung 5.7: Beschleunigungszeiten 40-90km/h im 2.Gang (3l Diesel)

Bei einem Vergleich der Beschleunigungszeiten von 40-90km/h ist zu sehen, dass das Versuchsfahrzeug am Rollenprüfstand jeweils früher die 90km/h erreicht. Im Schnitt dauert die Beschleunigung auf der Rolle 5,38s, hingegen auf der Straße 5,49s was einer Abweichung von 2% entspricht.

5.2 Ergebnisse der Abgasuntersuchungen

Um die mögliche Fehlerquelle der Totzeitverschiebung ausschließen zu können, werden zunächst die Schadstoffmassen bei konstanten Konzentrationen verglichen. Hierzu wird ein Versuchsfahrzeug bei konstanter Geschwindigkeit und Last am Rollenprüfstand bewegt, bis

Ergebnisse der Untersuchungen

sich konstante Emissionen einstellen. Daraufhin werden für fünf Minuten die Beutel gefüllt sowie die Messung der Modallinien gestartet. In der Auswertung werden neben den Ergebnissen der Systemauswertung auch die aus den Rohdaten der Messung des unverdünnten Abgases berechneten Werte berücksichtigt. Hierzu werden die aus Kapitel 4.3.3 bekannten Formeln verwendet.

Wie in **Abbildung 5.8** zu sehen, stellt sich sowohl zwischen den unterschiedlichen Linien als auch zwischen der Systemauswertung und der Excel-Auswertung eine gute Vergleichbarkeit mit einem maximalen Fehler kleiner 2,5% ein.

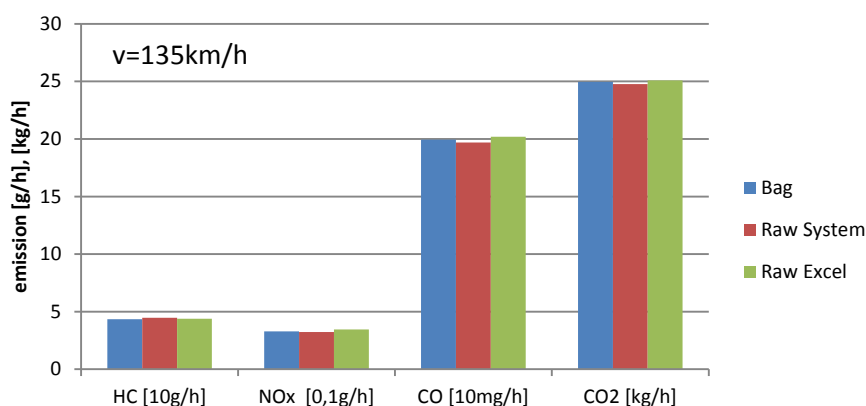


Abbildung 5.8: Vergleich der verschiedenen Messlinien bei konstanten Emissionen (3l Diesel)

Im nächsten Schritt werden unter Berücksichtigung der Totzeitverschiebung gleiche Untersuchungen für NEDC Tests durchgeführt.

Ergebnisse der Untersuchungen

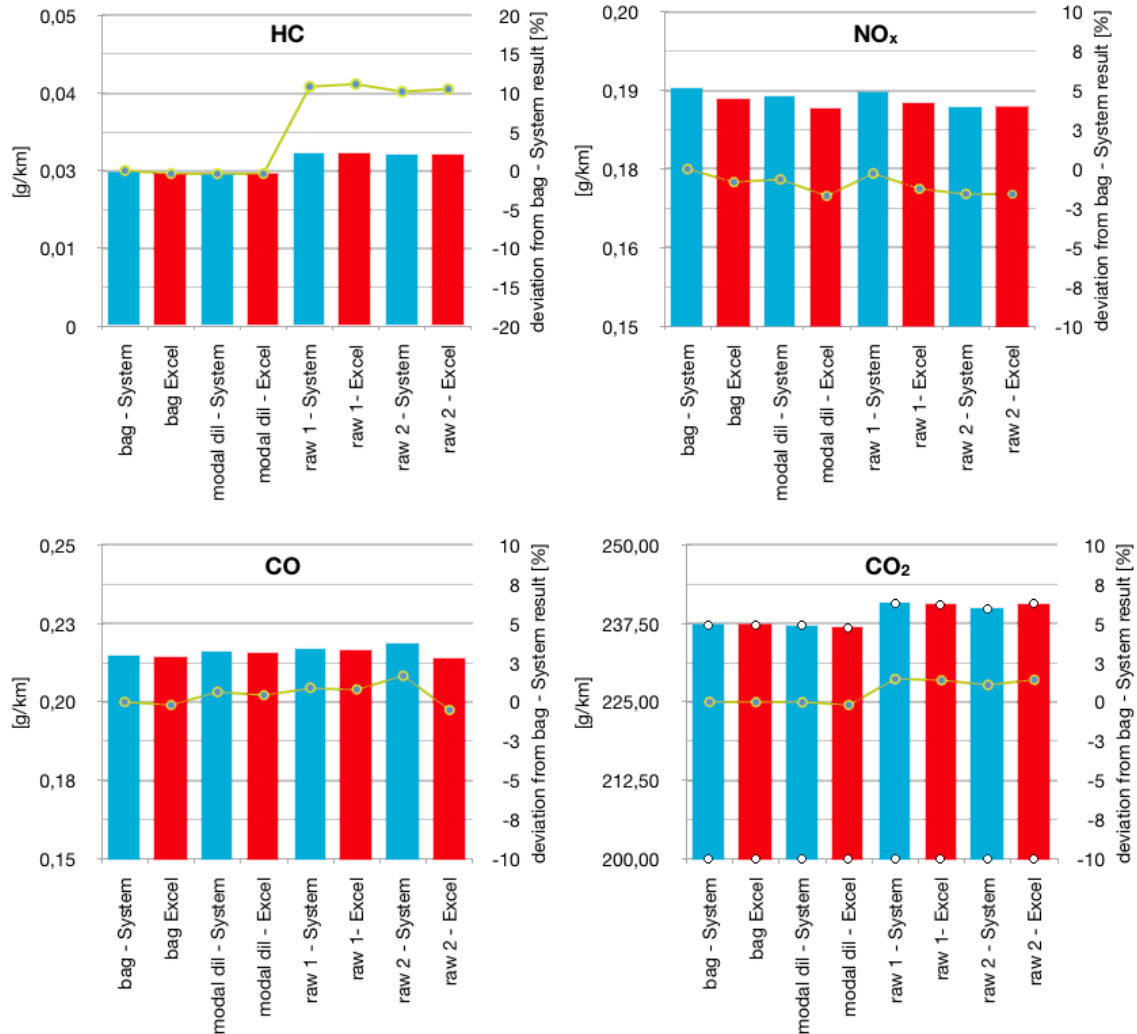


Abbildung 5.9: Ergebnisse der Schadstoffemissionen der unterschiedlichen Messlinien im NEDC bei Dieselmessung (3l Diesel)

Hierbei zeigt sich, dass die mit Hilfe der Motorsteuergerätedaten errechneten Massenemissionen gut mit den Ergebnissen der Systemauswertung korrelieren. Sowohl bei Diesel als auch bei Ottomessung ergibt sich bei HC, NO_x und CO₂ eine maximale Abweichung von unter 1,5% zu den jeweiligen Systemauswertungen, bei CO ist diese maximal 3%. Werden die Beutelergebnisse der Systemauswertung als Basis genommen, ergeben sich bei den Modallinien vor allem bei den Kohlenwasserstoffen deutliche Abweichungen.

Ergebnisse der Untersuchungen

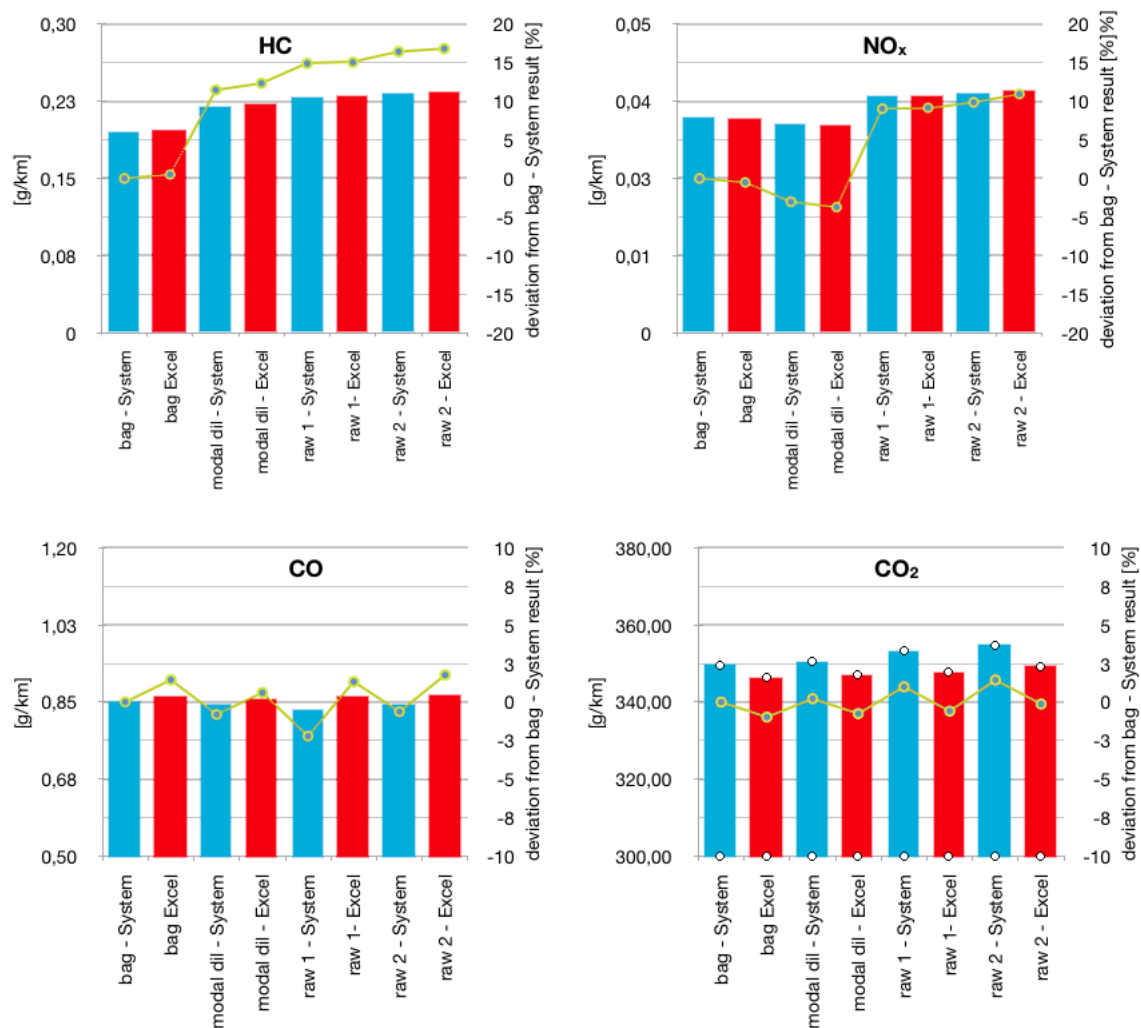


Abbildung 5.10: Ergebnisse der einzelnen Schadstoffemissionen an verschiedenen Messstellen bei Ottomessung (5,5l V8)

In den **Abbildung 5.11** ist erkennbar, dass die Resultate der Rohbench verglichen mit der Beutelanalyse bei den Kohlenwasserstoffen Abweichungen bis zu 25% aufweisen.

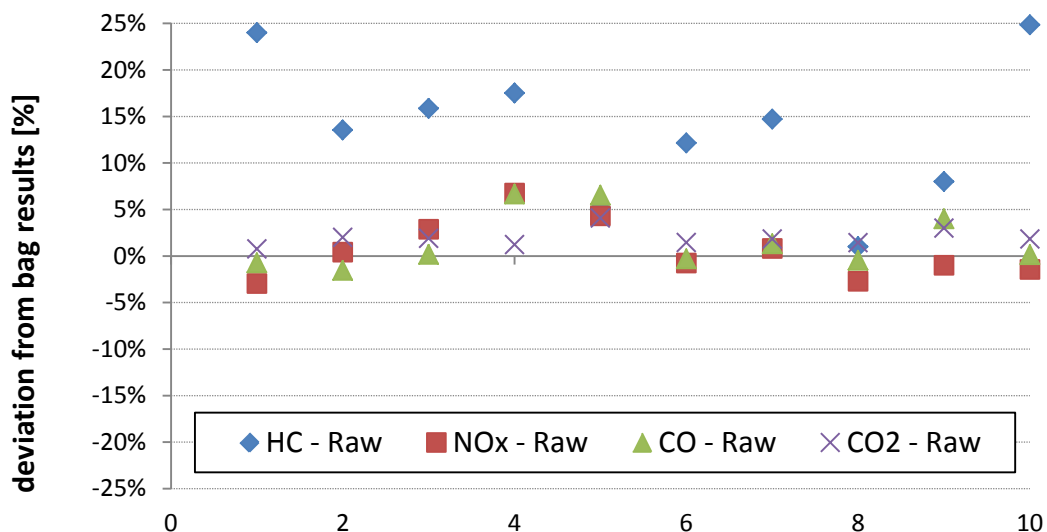


Abbildung 5.11: Abweichungen der Rohbench zur Beutelmessung bei Tests mit 3l CR Dieselmotor

Auch die Resultate der modalen verdünnten Messung zeigen, verglichen mit den Ergebnissen der Beutelmessungen, erhöhte Kohlenwasserstoffwerte. Bei 20 verschiedenen getesteten Fahrzeugen mit 1,6l Ottomotoren stellt sich bei der Modalanalyse ein im Mittel 2,8% höheres HC-Ergebnis ein.

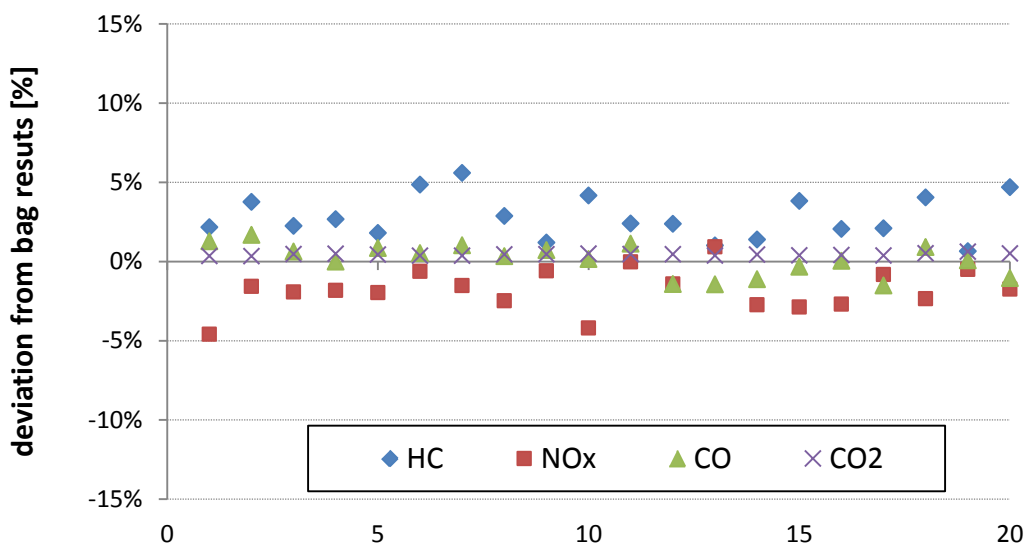


Abbildung 5.12: Abweichungen der modalen Tunnelmessung zur Beutelmessung bei Test mit 1,6l Ottomotoren

Die NOx Emissionen weisen hierbei eine mittlere Abweichung von 1,7% auf, der Verbrauch sowie die Kohlenmonoxid Emissionen zeigen eine Differenz von weniger als 0,8%.

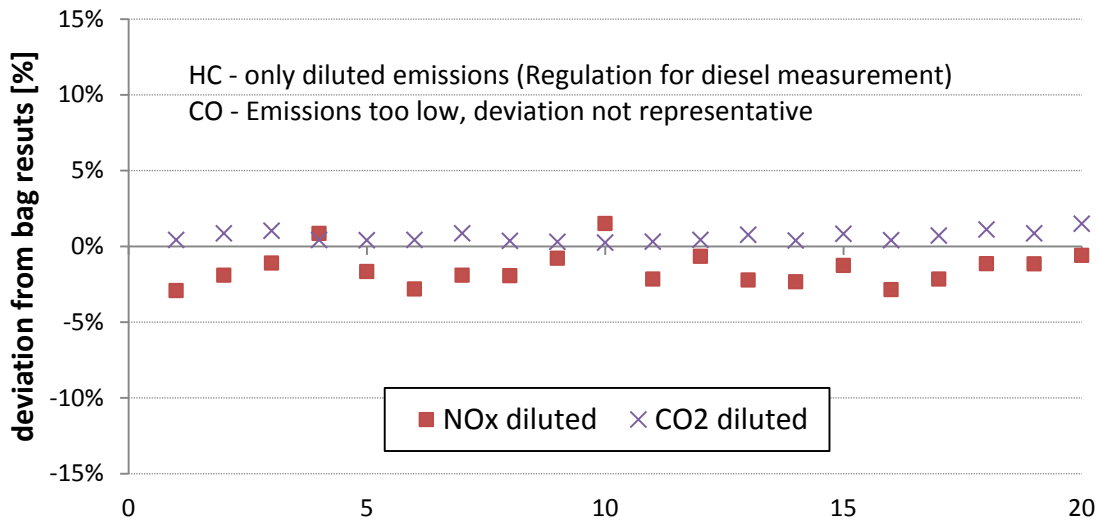


Abbildung 5.13: Abweichungen der modalen Tunnelmessung zur Beutelmessung bei Tests mit Dieselmotoren

Zusammengefasst ergeben sich für die verschiedenen Modallinien die in **Abbildung 5.14** zu sehenden mittleren absoluten Abweichungen. Hierbei sind die Ergebnisse der verdünnten Modallinie Mittelwerte aus 40 Messungen verschiedener Fahrzeuge (50% 1,6l Diesel, 50% 1,6l Otto) und jene der Rohlinien Mittelwerte aus 5 Messungen mit einem Fahrzeug mit 3l V6 Dieselmotor sowie 5 Messungen mit einem Fahrzeug mit 5,5l V8 Ottomotor.

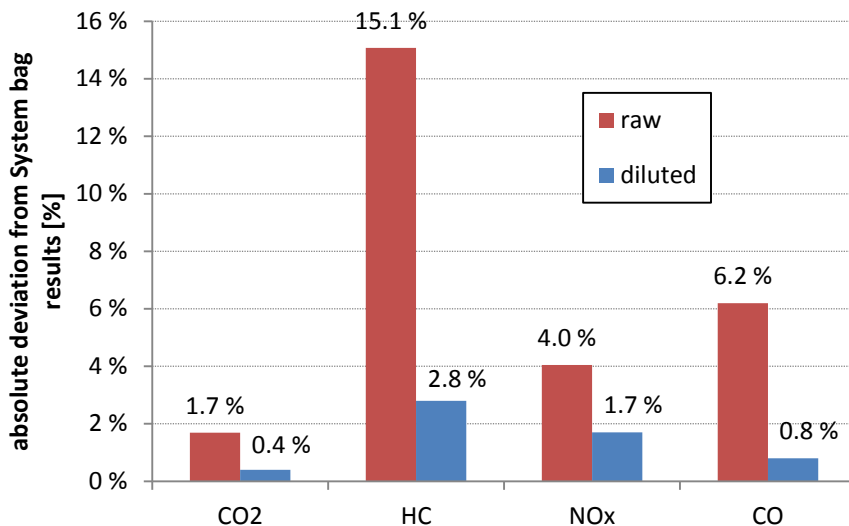


Abbildung 5.14: Mittlere absolute Abweichungen der modalen Linien zur Beutelmessung

5.3 Reproduzierbarkeit der Testergebnisse

Das Ergebnis von Abgastests wird von vielen Faktoren beeinflusst. Diese sind grob eingeteilt die Klimabedingungen, die Vorkonditionierung des Fahrzeuges, die Simulation des Fahrwiderstandes sowie der Schwungmasse, die Abgasmesstechnik und auch der Fahrer.

Um ein reproduzierbares Ergebnis erzielen zu können, müssen all diese Einflussgrößen konstant sein. Zum Beweis der Reproduzierbarkeit wurden mit demselben Fahrzeug immer wieder NEDC-Abgastests durchgeführt und die Ergebnisse miteinander verglichen. Zunächst ergab sich eine starke Streuung der Emissionen, deren Ursachen auf nachstehende Umstände zurückzuführen sind. Einer der Gründe ist, dass das Fahrzeug nicht immer gleich vorkonditioniert wurde, was auf verschiedene Starttemperaturen, undefiniertes Abstellen der Fahrzeuge (lange Leerlaufphasen nach Tests, motorisch getrieben aus dem Prüfraum fahren, unterschiedliche Zyklen als Preconditioning) und unterschiedliche Fahrer zurückzuführen ist. Neben dem Einfluss des Fahrzeuges, liegt eine weitere Ursache in der Abgasmesstechnik, die jeden Abend in den PAUSE Modus versetzt wurde, was ein Erlöschen der Flamme des FID zur Folge hat. Untersuchungen haben ergeben, dass der FID in den ersten sechs Stunden nach Inbetriebnahme ein deutliches Driftverhalten zeigt. In **Abbildung 5.15** ist dies für den kleinsten Messbereich dargestellt, bei dem es zu einer Abweichung von über 5% des Messbereich-Endpunkts kommt.

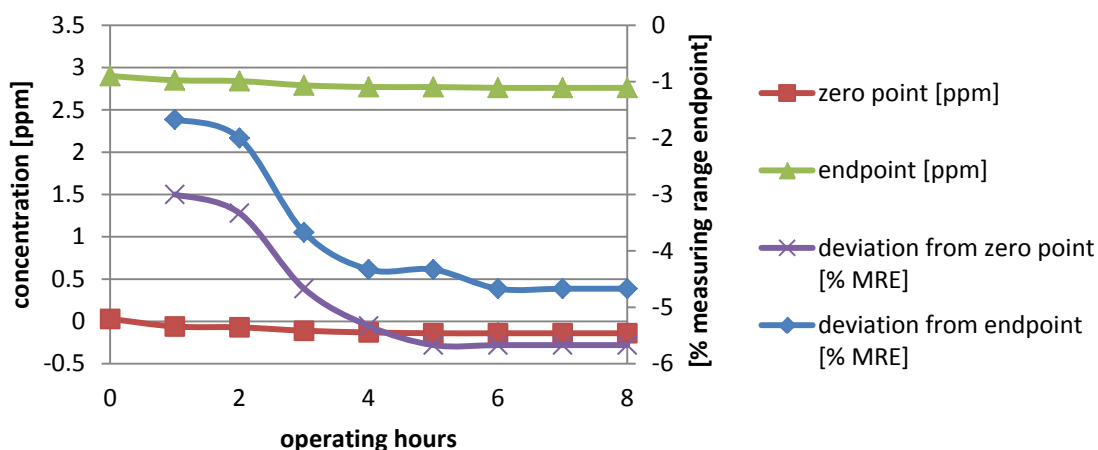


Abbildung 5.15: Driftverhalten des FID nach Inbetriebnahme

Als Folge der mangelnden Reproduzierbarkeit der Tests wurden folgende Veränderungen vorgenommen:

Ergebnisse der Untersuchungen

Jeder Abgastest beginnt mit einem Preconditioning-Test, nach welchem das Fahrzeug sofort abgestellt wird. Daraufhin wird das Fahrzeug aus dem Prüfraum in die Konditionierhalle geschleppt und dort mindestens 12h abgestellt. Bei Bedarf kann diese Zeit auch reduziert werden, jedoch muss hierbei vor Testbeginn die Motortemperatur kontrolliert und protokolliert werden. Während der Abkühlzeit wird die Batterie des Fahrzeuges geladen, um verschieden hohe Ladeströme während des Abgastests zu vermeiden sowie das Potential eventuell vorhandener intelligenter Generatorregelungen ausschöpfen zu können. Die Abgasmesstechnik wird nur mehr an Wochenenden abgeschaltet und am nächsten Arbeitstag gleich in der Früh in Betrieb genommen. Der erste Abgastest darf frühestens sechs Stunden nach Inbetriebnahme durchgeführt werden.

Abbildung 5.16 zeigt die Emissionen eines Fahrzeuges mit 1,6l DI Ottomotor während eines Beobachtungszeitraums von sechs Monaten unter Berücksichtigung oben beschriebenen Erkenntnisse.

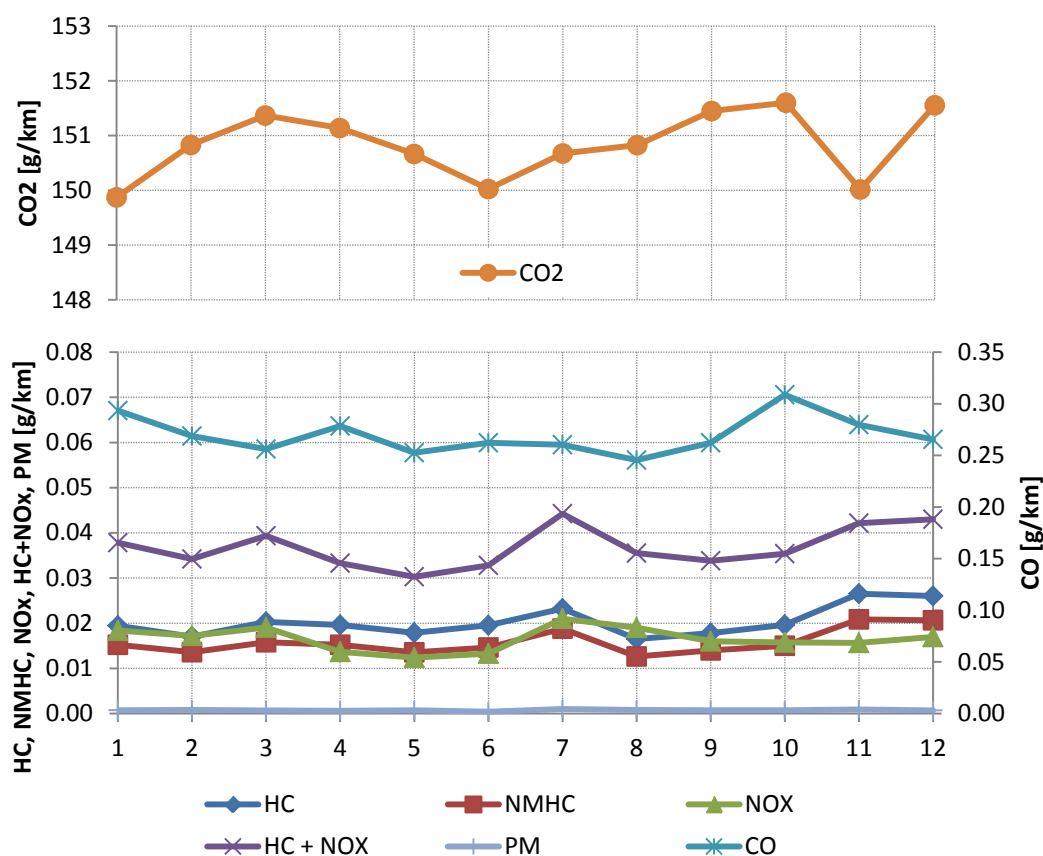


Abbildung 5.16: Ergebnisse von 12 NEDC Abgastests mit einem PKW mit 1,6l DI Ottomotor

5.4 Ringversuch

Egal nach welchem System ein Rollenprüfstand arbeitet, Ziel ist es immer die Straße möglichst ideal nachzubilden. Wird die Straße hinreichend genau abgebildet und funktioniert die Abgasmessstechnik richtig, so müssen bei demselben Fahrzeug an verschiedenen Prüfständen unter gleichen Bedingungen immer nahezu gleiche Ergebnisse messbar sein. Unter diesen Rahmenbedingungen werden in einem sogenannten Ringversuch in mehreren teilnehmenden Prüflabors Versuche durchgeführt. Stimmen die Ergebnisse aus einem Prüflabor nicht mit jenen der anderen überein, müssen die Gründe dafür gefunden werden.

Bei dem im Zuge dieser Arbeit ausgeführten Ringversuch wurde ein Mittelklassefahrzeug mit aufgeladenem 3-Liter Ottomotor mit Direkteinspritzung zuerst beim Hersteller an sechs verschiedenen Prüfständen untersucht und dann nach Graz transportiert, um bei Magna Steyr getestet zu werden. Unter Einhaltung der klar definierten Testbedingungen wurden an vier Tagen NEDC Tests durchgeführt und verglichen. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle dargestellt:

Hersteller-Mittelwerte aus Ergebnissen EU5 (6 Prüfstände mit jeweils 2 Ergebnissen)								
	HC	CH4	NMHC	CO	NO _x	CO2 gesamt	CO2 Phase 1	CO2 Phase 2
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	g/km	g/km	g/km
Mittelwerte	82,76	13,44	68,45	252,88	13,86	236,08	345,97	173,09

Ergebnisse Magna Steyr								
	HC	CH4	NMHC	CO	NO _x	CO2 gesamt	CO2 Phase 1	CO2 Phase 2
	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	mg/km	g/km	g/km	g/km
Mittelwerte	76,83	11,90	65,09	259,23	14,13	233,67	343,55	170,68
1.Test 2WD	70,09	11,00	59,59	253,11	14,86	234,99	345,23	171,85
2.Test 2WD	79,91	11,70	68,28	302,21	15,05	232,57	339,74	171,16
3.Test 2WD	74,90	11,90	63,00	196,40	12,60	234,14	346,60	169,70
4.Test 2WD	82,40	13,00	69,50	285,20	14,00	232,99	342,62	169,99

Std.-Abw.	5,47	0,83	4,63	46,57	1,12	1,10	3,03	1,01
Differenz Min-Max	12,31	2,00	9,91	105,81	2,45	2,42	6,86	2,15

Abbildung 5.17: Ergebnisse des Ringversuches.

5.5 Diskussion der Ergebnisse

Die vorliegende Arbeit wurde während dem Ende der Bauphase der Anlage begonnen. Viele der durchgeführten Untersuchungen fanden somit in einer Phase statt, in der speziell die Abgasmessstechnik noch nicht fehlerfrei in Betrieb war, sodass ständige Programm- und Parameteränderungen das Vergleichen von Ergebnissen untereinander unmöglich machten. Darüber hinaus war keiner der beteiligten Prüfstandstechniker zuvor an einem Rollenprüfstand beschäftigt, wodurch reproduzierbare Testabläufe erst nach Sammlung von Erfahrung möglich waren. Diese Umstände hatten zur Folge, dass zahlreiche in der Anfangsphase durchgeführten Untersuchungen zu nicht verwertbaren Ergebnissen führten und somit gegen Ende wiederholt werden mussten.

Es sei an dieser Stelle betont, dass die Anlage zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieser Arbeit noch in der Evaluierungsphase betrieben wurde. Alle beteiligten Firmen sind darum bemüht, Probleme, die während dieser Phase auftraten, so schnell als möglich zu lösen. Daher sind viele der im Folgenden beschriebenen Erkenntnisse als Momentaufnahmen zu werten.

Fahrwiderstandsuntersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen haben ergeben, dass die angewandte Methode eine einfache und schnelle Möglichkeit darstellt, Fahrwiderstände festzustellen. Die aus dem Versuch ermittelten Fahrwiderstände wurden am Rollenprüfstand überprüft indem bei konstanten Geschwindigkeiten die Einspritzzeiten aus dem Motorsteuergerät aufgezeichnet und verglichen wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Einspritzzeiten zwischen Rolle und Straße bei höheren Geschwindigkeiten um maximal 1,2% unterscheiden, während die Differenz bei 40km/h auf 2% steigt. Auch wenn die ermittelten zwei Prozent Differenz immer noch ein gutes Ergebnis darstellen, deutet die Erhöhung der Abweichung bei geringen Geschwindigkeiten auf eine Problematik hin, welche sich auch bei den Ausrollversuchen zeigt. Hierbei ist zwar bei hohen Geschwindigkeiten eine sehr gute Reproduzierbarkeit selbst bei schlechten Fahrbahneigenschaften möglich, bei geringen Geschwindigkeiten hingegen führen kleine Unebenheiten der Straße zunehmend zu Messstreuungen. Unter 25 km/h wird diese Streuung so groß, dass eine Ermittlung des Fahrwiderstandes auf den gewählten Versuchsstrecken nicht mehr möglich ist.

Der Autor ist der Meinung, dass die Abweichungen der einzelnen Messungen auf den gewählten Strecken im öffentlichen Verkehr zu groß sind, um die kleinen, vom Gesetzgeber vorgeschriebenen Standardabweichungen erreichen zu können. Um zu beweisen, dass die in

Kapitel 4.1.5 beschriebene Methode eine gleichwertige Alternative zur gesetzlichen Methode darstellt, sind weitere Untersuchungen nötig, bei denen mehr Rücksicht auf die Umgebungsbedingungen genommen und auch die Anzahl der Messungen pro Richtung und Geschwindigkeitsintervall erhöht werden müsste.

Die Untersuchung der Massensimulation hat bei den Beschleunigungszeiten sowie den Geschwindigkeitsverläufen eine Abweichung von maximal 2%, beziehungsweise bei den Einspritzmengen von bis zu 2,5% ergeben. Die Abweichungen zeigen, dass die Last am Rollenprüfstand tendenziell immer geringer war. Aus Kapazitätsgründen wurden bei dieser Untersuchung zuerst die Rollenmessungen durchgeführt und erst im Anschluss die Straßenmessungen. In diesem Fall, ist es fast unmöglich, die exakt gleichen Testbedingungen zu gewährleisten. So fand der Straßentest bei 1,5°C höherer Umgebungstemperatur statt, das Fahrzeug hatte um 20kg mehr Treibstoff im Tank und die Luftfeuchtigkeit war geringer. All dies sind Gründe warum die Beschleunigungsleistung geringer werden kann.

Abgasmesstechnik

Wie schon zu Beginn dieses Kapitels beschrieben, war die gesamte Anlage und ganz besonders die Abgasmesstechnik im Beobachtungszeitraum starken Veränderungen unterworfen. Dies ist mit ein Grund dafür, dass bei vielen Messungen Abweichungen feststellbar sind.

Beim Vergleich der Beutelmessungen zur verdünnten Modalmessung hat die Auswertung von 40 Tests ergeben, dass die beiden Messsysteme bei den CO₂ Emissionen eine mittlere Abweichung von 0,4% aufweisen, bei CO, NO_x und HC jedoch Abweichungen von 0,8-2,8%. Noch deutlicher fallen die Abweichungen beim Vergleich der Beutelmessung zum Rohabgas aus. Hier zeigt sich lediglich bei CO₂ eine Streuung unter 2%. Die größte Differenz weist mit durchschnittlich 15% die Rohmessung der Kohlenwasserstoffe auf. Auffällig ist, dass bei der Rohmessung die Ergebnisse der HC-Emissionen im Vergleich zur Beutelmessung bei allen Versuchen deutlich höher waren, während alle anderen Emissionen um den Nullpunkt streuen. Die Kontrolle durch die Berechnung der Massenemissionen aus den gemessenen Konzentrationen und dem aus den Motorsteuergerätedaten abgeleiteten Abgasvolumen lässt jedoch auf keinen Fehler in der Totzeitverschiebung deuten da diese Ergebnisse gut mit der Systemauswertung korrelieren.

Die Untersuchungen bezüglich der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse haben gezeigt, wie wichtig das richtige Vorkonditionieren der Fahrzeuge ist und wie die einzelnen Schritte dabei

auszusehen haben. Eine Reihe von Versuchen mit demselben Fahrzeug hat gezeigt, dass es möglich ist, mit der CVS-Beutelmessung reproduzierbare Messungen der CO₂ Emissionen mit einer mittleren Abweichung < 0,5% durchzuführen. Kohlenwasserstoffe, Stickoxide und Kohlenmonoxid hingegen weisen bei einigen Messungen Ausreißer auf, was zu einer Streuung von bis zu 10% führt.

5.6 Ausblick

Auch wenn die Simulation in der Automobilindustrie mittlerweile eine zentrale Rolle spielt und es ermöglicht, Entwicklungszeiten zu verkürzen sowie die Anzahl teurer Prototypen zu reduzieren, ist es nach wie vor unumgänglich, Funktionen von Bauteilen sowie das Verhalten des Gesamtfahrzeuges im Versuch zu verifizieren. Viele dieser Versuche finden bei extremen Klimabedingungen statt, was zu Einschränkungen bezüglich Ort und Jahreszeiten führt. Da der Fokus dieser Arbeit auf der Abgasmesstechnik und der Fahrwiderstandsermittlung sowie deren Simulation auf der Rolle liegt und sämtliche Untersuchungen bei Normaltemperatur durchgeführt wurden, wurde ein sehr großer Anwendungsbereich ausgeklammert – die Simulation von Hitze, Kälte, Feuchte, Wind und Sonne.

Mit der Durchführung von Tests auf solch einer Prüfeinrichtung, kann man immer gleiche Versuchsbedingungen garantieren und spezielle Extremsituationen provozieren. Dies erleichtert die Entwicklungsarbeit und reduziert Erprobungskosten. Die örtliche Nähe zu den Entwicklungsabteilungen und der Prototypenfertigung ermöglicht es, auf auftretende Probleme rasch zu reagieren und Fahrzeuge vor Ort zu adaptieren, ohne mit hohem Zeitverlust durch Transport konfrontiert zu sein. Von speziellem Interesse für die Entwicklung von Elektro- und Hybridfahrzeugen sind Batteriemanagement- und Ladungsuntersuchungen bei hohen und tiefen Temperaturen. Solange das Fahrzeug nicht bewegt werden muss, können diese auch im Konditioniercontainer durchgeführt werden. Da dieser einfach bewegt und an den Prüfraum dicht angedockt werden kann, können Fahrzeuge bei verschiedenen Temperaturen vorkonditioniert werden, ohne den Prüfstand für lange Zeit zu blockieren.

Die verbaute Abgasmesstechnik entspricht dem neuesten Stand der Technik. Durch die beiden Rohabgaslinien ist es möglich, neben den gesetzlich geforderten Abgastests, auch das Rohabgas und somit beispielsweise das Umsetzverhalten einzelner Katalysatoren zu untersuchen. Die CVS- Messtechnik mit den beheizten Leitungen und Schränken ermöglicht das Messen von Abgas in kleinsten Konzentrationen. Für Euro 6 wird es jedoch notwendig,

Ergebnisse der Untersuchungen

neben der gravimetrischen Partikelmessung auch ein System zur Partikelzählung zu installieren. Hierzu werden Systeme wie sie im theoretischen Teil dieser Arbeit behandelt wurden zum Einsatz kommen.

Nach der Inbetriebnahme der Anlage, der Testphase und der feierlichen Eröffnung im Oktober 2010, war das Audit des deutschen Akkreditierungsrates ein großer Meilenstein, der die Qualität der Anlage und die Kompetenz des Bedienpersonals bestätigte. Seit Februar des Jahres 2011 darf sich das Prüfzentrum GAAZ nach DIN EN ISO/IEC 17025 „Akkreditiertes Prüflabor“ nennen.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

c_i		Konzentration
CLA		Chemilumineszenz-Analysator
CPC		condensation particle counter
CRT		continuously regenerating trap
CVS		constant volume sampling
DPF		Dieselpartikelfilter
EPA		environmental protection agency
EUDC		extra urban driving cycle
FID		Flammionisations-Analysator
FTP		federal test procedure
GAAZ		Gesamt Antriebstrang Applikationszentrum
HCCI		homogeneous charge compression ignition
M_i		Masse
NDIR		nichtdispersiver Infrarot-Absorptionsanalysator
NDUVR		nichtdispersiver Ultraviolett-Resonanz-Absorptionsanalysator
NEDC		new european driving cycle
NMHC		1non methan hydrocarbons
NMOG		non methan organic gas
PAH		polycyclic aromatic hydrocarbon
PM		particulate matter
SCR		Selektive Katalytische Reduktion
SFTP		supplemental federal test procedure
SOF		soluble organic fraction
THC		total hydrocarbons
T_i		Temperatur
V_i		Volumen
VKM_THD		Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik
ρ_i		Dichte
DF	[-]	dilluting factor
Fs	[-]	stöchiometrischer Faktor
Lst	[kmol]	stöchiometrischer Luftbedarf
Ost	[kmol]	stöchiometrischer Sauerstoffbedarf
ϵ	[-]	Verdichtungsverhältnis
λ	[-]	Lambda, Kraftstoff-/Luftverhältnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 2.1: Zusammensetzung des Rohabgases von Verbrennungsmotoren ohne Abgasnachbehandlung
(BOSCH 2002) 9

Abbildung 2.2: Schadstoffemission im Abgas von Ottomotoren (Grafik: EICHLSEDER et al. 2008) 11

Abbildung 2.3: HC - Quellen im Brennraum (EICHLSEDER et al. 2008)..... 12

Abbildung 2.4: Qualitative Darstellung der dieselmotorischen Verbrennung und Schadstoffbildung
(BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005) 15

Abbildung 2.5: Funktionsweise eines Wall-Flow Partikelfilters (Mercedes-Benz Presseaussendung) 20

Abbildung 2.6: Mechanismen der Partikelabscheidung (PECK 2007) 21

Abbildung 2.7: Mechanismen der Partikelabscheidung als Funktion der Partikelgröße
(BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005) 21

Abbildung 2.8: NO_x-Speicherung und Regeneration (BASSHUYSEN und SCHÄFER 2005)..... 23

Abbildung 2.9: Entwicklung der Abgasgesetzgebung der von Euro 1 bis Euro 6 (Darstellung nach
KAMPELMÜHLER/IVANISIN, Magna Steyr)..... 24

Abbildung 2.10: NEDC – New European Driving Cycle..... 26

Abbildung 2.11: FTP-75 Zyklus..... 29

Abbildung 3.1: Logo GAAZ..... 29

Abbildung 3.2: Längsschnitt der Prüfzelle 30

Abbildung 3.3: Prüfraum GAAZ 30

Abbildung 3.4: Otto- und Diesel-Verdünnungstunnel..... 31

Abbildung 3.5: Fahrtwindgenläse LTG..... 33

Abbildung 3.6: Schematische Darstellung der Zusammensetzung des verdünnten Abgases und Verlauf des
Verdünnungsfaktors. 36

Abbildung 3.7: Einfluss der Totzeitverschiebung auf NO_x- Massenkonzentration 40

Abbildung 3.8: Anregungsarten bei Molekülen in den einzelnen Spektralbereichen (KLINGENBERG 1995). 41

Abbildung 3.9: Absorption-, Fluoreszenz- und Phosphoreszenz-Elektronenspektren des Benzols bei 77K
(KLINGENBERG 1995)..... 42

Abbildung 3.10: Schematische Darstellung des IRD-Prinzips (AVL 2008). 43

Abbildung 3.11: Spektrum des Strahlers, Absorptionsbanden des Messgases, Absorptionsbande des
Detektorgases CO (KLINGENBERG 1995). 43

Abbildung 3.12: Schematischer Aufbau des Detektors (AVL 2008) 44

Abbildung 3.13: Prinzipschema eines FID im Unterdruckbetrieb (KLINGENBERG 1995) 45

Abbildung 3.14: Schema des empfohlenen Partikelzählsystems (TSI nach ECE-R83) 49

Abbildung 4.1: Fahrwiderstandskurven unkorrigiert sowie durch 6 Stützstellen auf Referenzbedingungen
korrigiert. 55

Abbildung 4.2: Ausrollverläufe bei jeweils vier Versuchen pro Ausgangsgeschwindigkeit und Fahrtrichtung..... 57

Abbildung 4.3: Vergleich GPS-Geschwindigkeitsverlauf zu Polynom..... 58

Abbildung 4.4: Verlauf der Einspritzzeiten bei 80km/h Konstantfahrt.....	61
Abbildung 4.5: Vollastbeschleunigung aus 40km/h im zweiten Gang (3l V6 Diesel).....	63
Abbildung 4.6: Flussschema der Abgasanalyzesysteme (MAGNA STEYR 2008).....	65
Abbildung 4.7: Schadstoffkonzentrationen bei konstanten Geschwindigkeiten	66
Abbildung 4.8: Zeitlich versetzte Emissionsanstiege nach Gasstößen bei Rohabgasmessung (PKW, 3l Diesel CR).....	70
Abbildung 4.9: Zeitlich versetzte Emissionsanstiege nach Beschleunigung bei Rohabgasmessung (PKW, 3l Diesel CR).....	71
Abbildung 4.10: Verlauf der Schadstoffkonzentrationen im Verlauf eines NEDC Zyklus eines Dieselfahrzeuges auf die Leistung totzeitkorrigiert:	74
Abbildung 4.11: Emissionsverhalten bei Kaltstart - Ottomotor.....	75
Abbildung 5.1: Vergleich der Ausrollkurven bei Kombination verschiedener Lokalitäten	79
Abbildung 5.2: Vergleich des EWG - Geschwindigkeitspolynoms zum gemessenen Geschwindigkeitsverlauf	80
Abbildung 5.3: Geschwindigkeitsverlauf bei Rollen mit geringer Geschwindigkeit.....	80
Abbildung 5.4: Einspritzzeiten auf Rolle und Straße bei Konstantfahrten (5,5l V8 Otto)	81
Abbildung 5.5: Geschwindigkeitverläufe bei Vollastbeschleunigungen (3l Diesel).....	82
Abbildung 5.6: Verlauf der Einspritzmengen bei Vollastbeschleunigung (3l Diesel).....	83
Abbildung 5.7: Beschleunigungszeiten 40-90km/h im 2.Gang (3l Diesel)	83
Abbildung 5.8: Vergleich der verschiedenen Messlinien bei konstanten Emissionen (3l Diesel)	84
Abbildung 5.9: Ergebnisse der Schadstoffemissionen der unterschiedlichen Messlinien im NEDC bei Dieselmessung (3l Diesel).....	85
Abbildung 5.10: Ergebnisse der einzelnen Schadstoffemissionen an verschiedenen Messstellen bei Ottomessung (5,5l V8)	86
Abbildung 5.11: Abweichungen der Rohbench zur Beutelmessung bei Tests mit 3l CR Dieselmotor	87
Abbildung 5.12: Abweichungen der modalen Tunnelmessung zur Beutelmessung bei Test mit 1,6l Ottomotoren	87
Abbildung 5.13: Abweichungen der modalen Tunnelmessung zur Beutelmessung bei Tests mit Dieselmotoren	88
Abbildung 5.14: Mittlere absolute Abweichungen der modalen Linien zur Beutelmessung	88
Abbildung 5.15: Driftverhalten des FID nach Inbetriebnahme	89
Abbildung 5.16: Ergebnisse von 12 NEDC Abgastests mit einem PKW mit 1,6l DI Ottomotor	90
Abbildung 5.17: Ergebnisse des Ringversuches.	91
Abbildung 6.1: Höhenprofil Thalerhof.....	102
Abbildung 6.2: Höhenprofil Zwaring.....	102
Abbildung 6.3: Geschwindigkeitsverlauf bei je vier Messungen in jede Richtung	102
Abbildung 6.4: Höhenprofil Autobahn A9 bei Leibnitz.....	103
Abbildung 6.5: Höhenprofil Voggau-Strass	103

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Zusammensetzung der Luft (MÖLLER 2003)	7
Tabelle 2: Kohlenstoff- und Wasserstoffgehalt handelsüblicher Kraftstoffe (KLINGENBERG 1995)	8
Tabelle 3: Typgenehmigungsprüfungen nach 70/220/EG	25
Tabelle 4: In AMA i60 verbaute Analysatoren (AVL 2008).....	32
Tabelle 5: Bedingungen für Filterkonditionierung nach europäischer und amerikanischer Gesetzgebung.....	48
Tabelle 6: Parameter zur Korrektur der Fahrwiderstände auf Referenzbedingungen (70/220/EWG 2007).....	54

LITERATUR

BAEHR, H.D., 1981, *Thermodynamik*. Springer Verlag).

AVL, (2008): *Benutzerhandbuch AMA i60*. -

BASSHUYSEN, R.v. und SCHÄFER, F., (2002): *Handbuch Verbrennungsmotor*. - Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.

BASSHUYSEN, R.v. und SCHÄFER, F., (2005): *Handbuch Verbrennungsmotor*. - Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden.

BECHMAN, O., CARLI, S., ENGLER, W., GARBE, T., LACH, G., RYAN, L. und SCHINDLER, K., (2002): *Partikelemission und -messung aus der Sicht des Anwenders: heute und morgen*. - Volkswagen AG, Wolfsburg.

BOSCH, (2002): *Dieselmotor-Management*. - Vieweg Verlag, Wiesbaden.

BOSCH, (2003): *Kraftfahrtechnisches Handbuch*. - Friedrich Vieweg und Sohn Verlag, Wiesbaden.

BOSCH, (2005): *Ottomotor-Management*. - Vieweg Verlag, Wiesbaden.

HAAS, F., (1991): *Automatisierung eine CVS-Anlage für Nutzfahrzeuge*. - TU Graz, Graz.

KLINGENBERG, H., (1995): *Automobile Messtechnik Band C: Abgasmesstechnik*. - Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.

MÖLLER, D.P.D., (2003): *Luft: Chemie, Physik, Biologie, Reinhaltung, Recht*. - Walter de Gruyter & Co KG, Berlin.

SAMS, T. und HAUSBERGER, S., (2007): *Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei KFZ*. - VKM-THD TU Graz.

SCHÜSSLER, M., (2008): *Schadstoffbildung und Emissionsminimierung bei KFZ - SCR*. - VKM-THD TU, Graz.

TTM, (2002): *Lexikon Verbrennungsmotor - Partikel*. - Verlag Technik Thermische Maschinen TTM, Niederrohrdorf.

WARNATZ, J., (2001): *Verbrennung: Physikalische Grundlagen, Modellierung und Simulation, Experimente, Schadstoffentstehung*. - Springer Verlag, Berlin Heidelberg.

BRAESS, H.-H. und SEIFFERT, U., (2005): *Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. - In: BRAESS, H.-H. und SEIFFERT, U. (Hrsg.), - Vieweg, Wiesbaden.

EICHLSEDER, H., KLÜTING, M. und PIOK, W.F., (2008): *Grundlagen und Technologien des Ottomotors*. - In: LIST, H. (Hrsg.), *Der Fahrzeugantrieb*. - Springer Verlag, Wien.

JOOS, F., (2006): *Emissionen der Verbrennung von Kohlenwasserstoffen*. - In: (Hrsg.), *Technische Verbrennung*. - Springer Berlin Heidelberg,

MOLLENBAUER, K. und TSCHÖKE, H., (2007): *Teil IV - Umweltbelastung durch Dieselmotoren.* - In: MOLLENBAUER, K. und TSCHÖKE, H. (Hrsg.), *Handbuch Dieselmotoren.* - Springer Verlag, Berlin.

BEHRENTH, MÖRSCH, SEIFERT und WIEBECHT, 2001, *Studies on Enhanced CVS Technology to Achieve SULEV Certification.*

LAVOIE, G.A., HEYWOOD, J.B. und KECK, L.C. (1970): *Experimental and Theoretical Study of Nitric Oxide Formation in Internal Combustion Engines.* MIT, Vol. 1, pp. S. 313-326.

ZELDOVICH, J. (1946): *The Oxidation of Nitrogen in Combustion and Explosions.* Acta Pysicchimica U.R.S.S., Vol 21 No. 4, p. S.577 ñ 628.

70/220/EWG, 2007, 70/220/EWG.

ECE-R83, 2011, *Regulation No. 83 - Uniform provisions concerning the approval of vehicles with regard to the emission of pollutants according to engine fuel requirements.* KOMMISSION, E. (Ed.).

GIFHORN, TIEBER, WIEBRECHT und BALLIK, (2000): *Grundlegende Untersuchung zur Nutzung der CVS-Messtechnik für niedrig emittierende Fahrzeuge mit Ottomotoren.*- In: *MTZ - Motortechnische Zeitschrift II,*

88/77/EWG, 2004, 88/77/EWG. Europäische Kommission).

IVANISIN, M., (2004): *Messtechnische Untersuchung der Partikelzahlemissionen moderner Fahrzeugmotoren.* - Unpubl. TU.

MAHR, A., (2001): *Vergleich und Bewertung unterschiedlicher Ansätze und Auswertemethoden bei Ausrollversuchen.* - Unpubl. Diplomarbeit, Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart.

PECK, R.S., (2007): *Experimentelle Untersuchung und dynamische Simulation von Oxidationskatalysatoren und Diesel-Partikelfiltern.* - Unpubl. Diplomarbeit, Fakultät für Maschinenbau, Universität Stuttgart.

SCHUBIGER, R.A., (2002): *Untersuchungen zur Russbildung und -oxidation in der dieselmotorischen Verbrennung: Thermodynamische Kenngrößen, Verbrennungsanalyse und Mehrfarbenendoskopie.* - Unpubl. Technische Wissenschaften ETH Zürich.

6 Anhang

Vergleich verschiedener Streckenabschnitte für Ausrollversuche

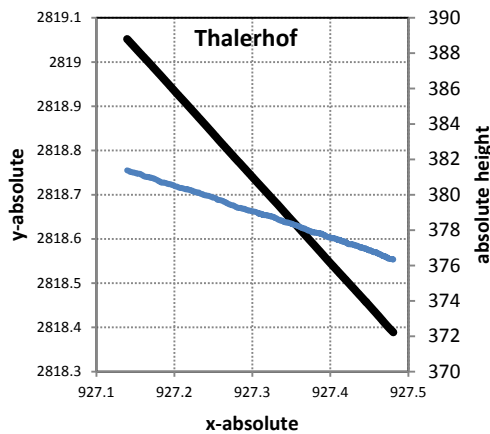
Da die Anfangs für die Versuche gewählte Strecke südlich von Graz aufgrund des starken Verkehrsaufkommens und der Geschwindigkeitsbegrenzung als nicht ideal erachtet wird, werden im Folgenden verschiedene Strecken beschrieben und auf ihre Tauglichkeit zur Durchführung von Ausrollversuchen bewertet. Ziel ist es, eine oder mehrere Strecken zu finden, auf denen die Versuche tagsüber und ohne Übertretung von Geschwindigkeitslimits in möglichst kurzer Zeit durchgeführt werden können, ohne dabei einen negativen Einfluss auf das Ergebnis zu haben.

Neben der Strasse in der Nähe des Flughafens Thalerhof, welche sich trotz sehr guter Beschaffenheit wegen des Verkehrsaufkommens als fragwürdig herausgestellt hat, kommen nach einer Vielzahl von Messfahrten im Umland von Graz vier weitere Strecken in Frage:

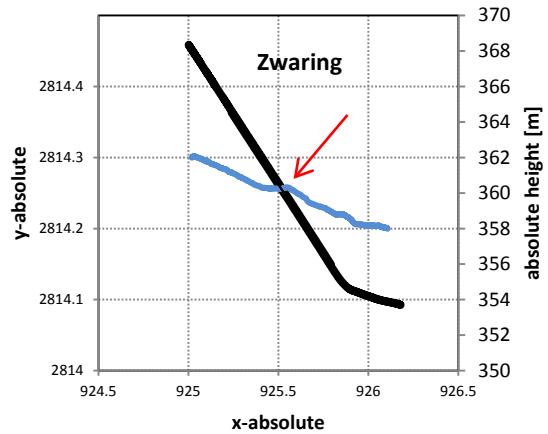
- Bundesstrasse zwischen Voggau und Strass
- Bundesstrasse in Zwaring
- Autobahn A2 zwischen Leibnitz und Voggau
- Autobahn A2 zwischen Flughafen Thalerhof und Abfahrt Graz-Ost

Obwohl der Streckenabschnitt der A2 zwischen Flughafen Thalerhof und Graz-Ost ein ideales Höhenprofil und einen gleichmäßigen Belag aufweist, wird dieser nach wenigen Messfahrten bereits ausgeschlossen, da hier zum Zweck der Feinstaubreduzierung sehr oft Geschwindigkeitsbeschränkungen von 100km/h gelten, was eine erwünschte Startgeschwindigkeit von 125km/h unmöglich macht. Auf allen weiteren genannten Streckenabschnitten werden Versuche durchgeführt und analysiert.

Die folgenden Abbildungen zeigen den Straßenverlauf der einzelnen Versuchsorte mit den zugehörigen Höhenprofilen:



— L379 - Feldkirchner Bundesstr.
— absolute height



— L603 Weitendorfer Landesstr.
— absolute height

Abbildung 6.1: Höhenprofil Thalerhof

Abbildung 6.2: Höhenprofil Zwaring

Die kurze Steigung bei der Hälfte der Strecke in Zwaring spiegelt sich auch im Verlauf der Geschwindigkeiten wieder, was man in **Abbildung 6.3** deutlich erkennen kann. Aus diesem Grund wird die Strecke in Zwaring für weitere Versuche nicht verwendet, auch wenn das Ergebnis der Auswertung gut mit den anderen Strecken korreliert.

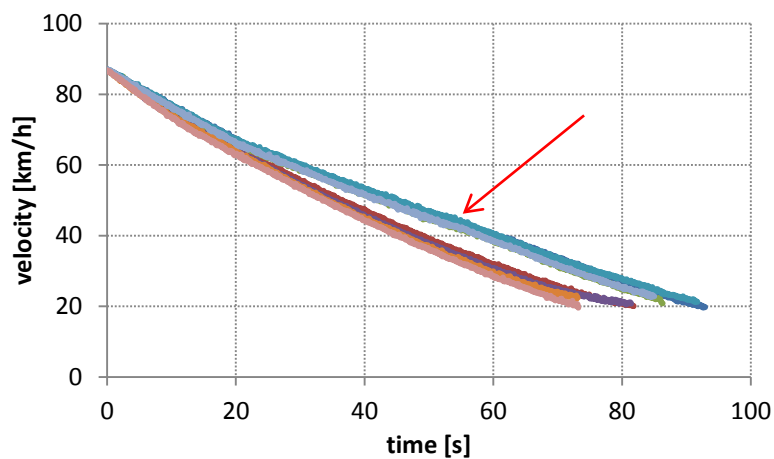


Abbildung 6.3: Geschwindigkeitsverlauf bei je vier Messungen in jede Richtung

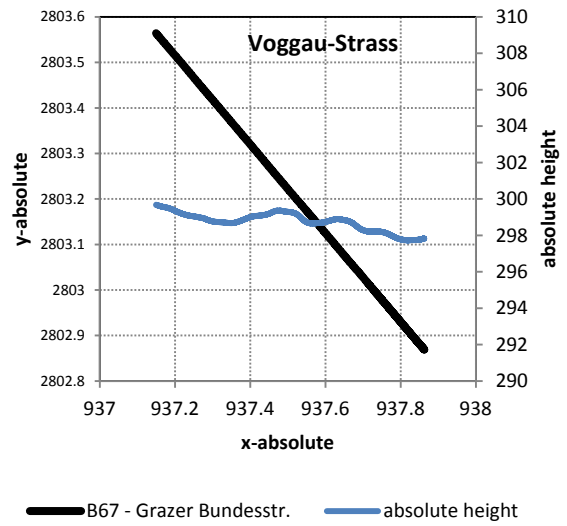
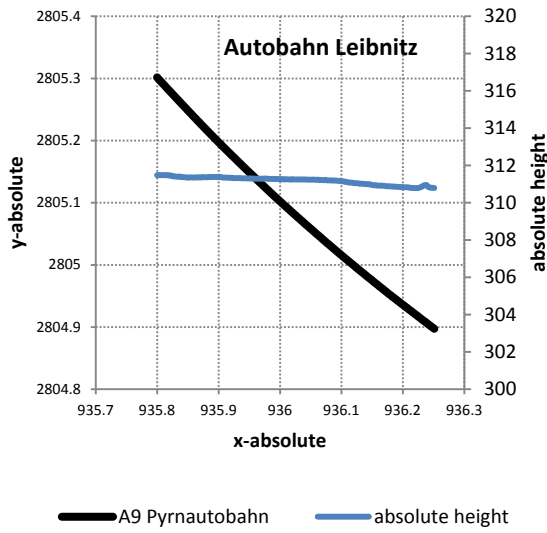


Abbildung 6.4: Höhenprofil Autobahn A9 bei Leibnitz Abbildung 6.5: Höhenprofil Voggau-Strass